

晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征

刘鸿涛, 郑纪勇, 李高亮, 马章怀, 杨凯齐

引用本文:

刘鸿涛, 郑纪勇, 李高亮, 等. 晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 137-143.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0567>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

黄土区露天煤矿不同复垦模式对土壤水稳性团聚体稳定性的影响

王杨扬, 赵中秋, 原野, 陈路明, 郭安宁

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 966-973 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1481>

膨润土对镉污染土壤团聚体结构特征及有机碳含量的影响

王润珑, 徐应明, 李然, 罗文文, 孙约兵

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2701-2710 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0104>

再生水灌溉模式对土壤团聚体及其有机碳分布的影响

胡廷飞, 王辉, 谭帅

农业环境科学学报. 2020, 39(1): 143-151 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0955>

黄土高原旱地不同种植系统对土壤水稳性团聚体及碳氮分布的影响

魏艳春, 马天娥, 魏孝荣, 王昌钊, 郝明德, 张萌

农业环境科学学报. 2016(2): 305-313 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.014>

农业秸秆复合PAM对湖滨带土壤改良效果的研究

陈方鑫, 卢少勇, 冯传平

农业环境科学学报. 2016, 35(4): 711-718 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.04.015>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

刘鸿涛, 郑纪勇, 李高亮, 等. 晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(1): 137–143.

LIU Hong-tao, ZHENG Ji-yong, LI Gao-liang, et al. Characteristics of soil aggregates in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia opencast coal dump, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(1): 137–143.



开放科学 OSID

晋陕蒙露天煤矿排土场土壤团聚体的变化特征

刘鸿涛¹, 郑纪勇^{1,2*}, 李高亮², 马章怀¹, 杨凯齐¹

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所 黄土高原土壤侵蚀和旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 为了探究风化煤和砒砂岩添加对晋陕蒙矿区排土场土壤团聚体特征的影响, 在晋陕蒙矿区建立了沙黄土(L)、沙黄土+砒砂岩(LS)、沙黄土+风化煤(LW)和沙黄土+风化煤+砒砂岩(LSW)4种新构土体。4年后通过干筛法和湿筛法测定土壤团聚体组成, 分析了新构土壤的团聚体组成及其稳定性。结果表明: 在沙黄土中添加砒砂岩和风化煤能够增加力稳性团聚体中<0.25 mm的含量, 提高水稳性团聚体土壤粒径的平均质量直径与几何平均质量直径, 减小土壤分形维数, 分别达到0.843、0.751 mm和2.803。LSW具有最高的有机质含量(21.45 g·kg⁻¹)和水稳性团聚体数量(60.41%), 团聚体破损率(30.85%)达到最低。相关分析结果表明, 在晋陕蒙矿区排土场沙黄土中添加风化煤与砒砂岩可以改善土壤结构, 提高土壤有机质含量, 增加土壤结构稳定性。而单独添加风化煤后, 虽然大团聚体含量显著增加, 但是却降低了土壤稳定性。研究阐明了添加风化煤和砒砂岩对矿区新构排土场土壤团聚体的影响, 对土壤质地恢复和水土保持具有积极意义。

关键词: 水稳性团聚体; 平均质量直径; 几何平均质量直径; 分形维数; 土壤有机质含量

中图分类号: S152; X144; X752 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2021)01-0137-07 doi:10.11654/jaes.2020-0567

Characteristics of soil aggregates in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia opencast coal dump, China

LIU Hong-tao¹, ZHENG Ji-yong^{1,2*}, LI Gao-liang², MA Zhang-huai¹, YANG Kai-qi¹

(1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to explore how the characteristics of new soil aggregates are affected by weathered coal and soft rock, four new soil masses were established in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia mining area: sandy loess, sandy loess mixed with soft rock, sandy loess mixed with weathered coal, and sandy loess mixed with soft rock and weathered coal. After 4 years, the composition of soil aggregates was measured by dry and wet sieve methods, and analyzed the aggregate composition and stability of the new soil mass. Results showed that soft rock and weathered coal mixed with the sand could increase the content of < 0.25 mm air-dried stable aggregates. This combination also increased the mean weight diameter and geometric mean weight diameter, but decreased the fractal dimension to 0.843, 0.751 mm, and 2.803, respectively. In addition, organic matter content and water-stable aggregate percentage of this combination were the largest, reaching 21.45 g·kg⁻¹ and 60.41%, respectively. In addition, it also had the lowest aggregate damage rate of 30.85%. Correlation analysis showed that mixing weathered coal and soft sandstone with the sand increased the organic matter content, improved the soil structure, and strengthened the aggregate. However, mixing weathered coal with the sand increased the compound grain content but decreased the stability of soil. The study illustrates the effects of new soil aggregates on weathering coal and soft sandstone, and brings positive significance to soil texture restoration, and soil and water conservation.

Keywords: water-stable aggregates; mean weight diameter; geometric mean weight diameter; fractal dimension; soil organic matter content

收稿日期: 2020-05-19 录用日期: 2020-09-27

作者简介: 刘鸿涛(1996—), 男, 陕西商洛人, 硕士研究生, 主要从事土壤生态研究。E-mail: liuhongtao@nwfu.edu.cn

*通信作者: 郑纪勇 E-mail: zhjy@ms.iswc.ac.cn

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2017YFC0504504, 2016YFC0501702); 国家自然科学基金项目(41571225)

Project supported: The National Basic Research Program of China (2017YFC0504504, 2016YFC0501702); The National Natural Science Foundation of China (41571225)

晋陕蒙接壤区是我国重要的能源基地,近年来由于对煤炭资源的过度开发,矿区大面积的土地被破坏,生态质量急剧下降,严重限制了该地区的可持续发展^[1]。同时,该接壤区是西北地区典型的风蚀水蚀交错地带,分布着大量的砒砂岩和沙黄土,是黄河水土流失的主要来源。由于该地区水土流失严重,现阶段重构土壤普遍存在土层薄(≤ 50 cm,农用地标准)、质地粗(0.02~2 mm 砂砾 $\geq 70\%$)、保水保肥能力差、肥力低等问题,严重限制了新构土体的生态恢复和复垦^[2]。所以,如何加快排土场的土壤恢复成为当前矿区生态环境建设中最为紧迫的任务。

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其颗粒组成与稳定性是决定土壤结构优劣的关键指标。同时,土壤团聚体是土壤性状的敏感性物理指标,尤其是土壤水稳性团聚体的数量,影响着土壤的稳定性和抗蚀性^[3-5]。研究发现,砒砂岩本身颗粒较细,富含蒙脱石,极易形成土壤团聚体^[6]。同时,砒砂岩的矿物养分含量很高,干时胶结,遇水则迅速膨胀,总孔隙度达45.91%,具有良好的保水保肥能力^[7-9]。当砒砂岩与沙黄土混合后,在碳酸盐等矿物的作用下,砂粒与粉粒之间通过胶结作用形成团聚体且胶结作用力十分稳定^[10]。此外,当地还存在大量的裸露风化煤,风化煤是一种天然土壤改良剂和碳源,本身腐植酸含量高、结构多孔疏松^[11],可以显著提升土壤碳含量和促进土壤团聚体稳定性^[12],对矿区复垦土壤理化性质有明显的改良效果^[13]。近年来,多数学者^[13-14]将沙黄土与砒砂岩复配来提高土壤保水保肥特性或直接添加风化煤增加土壤肥力来促进矿区土壤复垦,研究砒砂岩或风化煤对土壤养分的影响。但将风化煤和砒砂岩分别与沙黄土掺混,利用砒砂岩和沙黄土颗粒互补,风化煤和砒砂岩的增肥保肥特性来促进排土场表层土壤团聚体结构稳定性的研究较少。同时,砒砂岩本身易受水蚀,被称为“地球癌症”,生态效益十分低下,而风化煤经济价值较低且广泛分布,若能充分利用砒砂岩与风化煤和沙黄土有机组合,将对当地表层土壤团聚体结构形成有良好的促进作用,进而对当地生态经济大有裨益。基于此,本研究在内蒙古准旗永利排土场选择单纯沙黄土、沙黄土与砒砂岩、沙黄土与风化煤、沙黄土与砒砂岩加风化煤掺混4种新构土体,对矿区土壤进行改良,分析比较6年后新建排土场土壤表层团聚体变化特征,旨在研究砒砂岩和风化煤的添加对土壤团聚体特征的影响,探讨4种新构土体土壤质地恢复和水土保持效应。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于内蒙古自治区准格尔旗永利煤矿排土场(39°69'N, 110°27'E),地处黄土高原边缘,是黄土高原与鄂尔多斯高原交错地带,属于典型的砒砂岩、沙黄土分布区。当地海拔1 409.9 m,年平均气温6.2~8.7℃,年平均降水量400 mm,主要集中在7—9月,年潜在蒸发量约2 000~3 000 mm,平均日照时数为2 900~3 100 h,常年多风沙天气,平均风速3.4 m·s⁻¹,远离海洋,属典型的半干旱大陆性季风气候地区。

1.2 试验设计

在永利煤矿排土场修筑新构排土场小区,分析4种新构土体土壤团聚体稳定性变化。研究设置4个处理,每个处理3个重复。

处理1:0~50 cm范围内将砒砂岩按7:3(沙黄土:砒砂岩, $m:m$)比例与沙黄土混掺,风化煤表施后翻耕,施用量为27 t·hm⁻²,编号LSW;处理2:0~50 cm纯沙黄土,风化煤表施后翻耕,施用量为27 t·hm⁻²,编号LW;处理3:0~50 cm范围内将砒砂岩按7:3(沙黄土:砒砂岩, $m:m$)比例与沙黄土混掺,编号LS;处理4:0~50 cm纯沙黄土,编号L。处理中L代表沙黄土,S代表砒砂岩,W代表风化煤,试验设计见表1。

试验小区规格为4 m×5 m、深50 cm,共12个,修建于2013年7月。修建时对所有土体表层土壤施加农家肥(羊粪,25 t·hm⁻²)、菌肥(金宝贝微生物菌肥,60 kg·hm⁻²)和化肥(磷酸二铵,600 kg·hm⁻²)。试验所用沙黄土、风化煤采自当地,砒砂岩采自内蒙古鄂尔多斯砒砂岩生态示范园区。风化煤添加量为27 t·hm⁻²,有机质含量为5.85 g·kg⁻¹,添加方式为表施后翻耕。沙黄土和砒砂岩性质如表2所示。

1.3 分析方法

团聚体粒径分级采用萨维诺夫法^[15]。干筛法(力

表1 试验设计

Table 1 Design of experiment

处理 Treatments	沙黄土 Sandy loess	砒砂岩 Soft rock	风化煤 Weathered coal
LSW	+	+	+
LW	+	-	+
LS	+	+	-
L	+	-	-

注:“+”代表有,“-”代表没有。

Note: “+” means existence, “-” means inexistence.

稳性团聚体):将风干的土样混匀,取出500.00 g土样,放入孔径分别为7、5、3、2、1、0.5 mm及0.25 mm的套筛中,以60次·min⁻¹的频率振荡进行筛分,分别得到>7、7~5、5~3、3~2、2~1、1~0.5、0.5~0.25 mm的土壤团聚体,将各级筛子上的团聚体土粒分别称量(精确至0.01 g),计算干筛的各级团聚体占土样总量的百分含量,按其百分比,配成2份质量为50.00 g的土样,以备湿筛分析使用。用湿筛法测定土壤水稳性团聚体数量:将2份配好的土样置于表面皿中,加水润湿30 min后,将分散后的土样放入不同孔径(5、2、1、0.5、0.25 mm)的套筛中,将套筛小心放入沉降筒,上下振荡,30 s后将套筛取出,经过冲洗和沙浴,称量套筛中土壤质量,得到土样中各孔径质量分数分布。用重铬酸钾容量法-外加加热法测定土壤有机碳^[16]。

1.4 数据处理

采用平均质量直径(MWD)^[17]和几何平均直径(GMD)^[18]评价团聚体稳定性特征,采用分形维数(D)^[19]来评价土壤分形结构,采用团聚体破损率(PAD)^[20]来评价干湿筛团聚体破损百分含量,使用加权求和的方法计算土壤的平均直径,具体见公式(1)~(3);对公式(4)取对数得到公式(5),采用线性回归分析法得到各土壤分形维数值。

$$MWD = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left(\sum_{i=1}^n \frac{W_i}{M} \lg \bar{R}_i \right) \quad (2)$$

$$PAD = \left(\frac{M_{(\text{干筛}) > 0.25 \text{ mm}} - M_{(\text{湿筛}) > 0.25 \text{ mm}}}{M_{(\text{干筛}) > 0.25 \text{ mm}}} \right) \times 100\% \quad (3)$$

$$\frac{m(r \leq \bar{R}_i)}{M} = \left(\frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (4)$$

$$\lg \frac{m(r \leq \bar{R}_i)}{M_i} = (3-D) \lg \frac{\bar{R}_i}{R_{\max}} \quad (5)$$

式中: MWD 为平均质量直径,mm; GMD 为几何平均质量直径,mm; PAD 为团聚体破损百分含量,%; D 为分形维数; m_i 为各级颗粒质量百分含量,%; r_i 为第*i*个筛的孔径大小,mm; n 为筛子的数量; M 为样品的总质

量,g; W_i 为各粒级团聚体的质量,g; $\bar{R}_i$ 为某粒级团聚体平均直径,mm; $m(r \leq \bar{R}_i)$ 为粒径小于 $\bar{R}_i$ 的团聚体质量,g; $R_{\max}$ 为团聚体的最大粒径,mm。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和Duncan检验($P < 0.05$)对4种新构土体团聚体数量进行比较。所有数据均采用Excel和SPSS 16.0进行统计分析,使用Origin 8.0进行制图。

2 结果与分析

2.1 新构土体土壤团聚体含量

2.1.1 力稳性团聚体百分含量

新构土体力稳性团聚体百分含量如表3。不同新构模式下,土壤中>0.25 mm风干团聚体的含量变化为L>LW>LS>LSW,砒砂岩和风化煤的加入使得<0.25 mm团聚体增加,这可能与砒砂岩的粒径较细、风化煤改善土壤结构有关。吴利杰等^[21]通过光学显微照相和图像分析处理技术对砒砂岩微结构进行定量研究,发现砒砂岩的粒度大小为0.01~1.25 mm。砒砂岩的加入使得复配土粒径组成向较细的方向转变。该结果与张露等^[22]通过对砒砂岩和风沙土复配后的粒度组成变化分析的研究结果一致。随着砒砂岩质量分数的增加,较粗粒径质量分数逐渐降低。此外,添加风化煤促进了土壤微团聚体的形成,进而降低了土体稳定性。因此,向沙黄土中添加风化煤和砒砂岩确实能够改善沙黄土颗粒大、结构差等问题,优化土壤结构,但却降低了团聚体的力稳定性,减弱土壤抗风蚀能力。

2.1.2 水稳性团聚体百分含量

湿筛处理后,不同土体水稳性团聚体百分含量和团聚体破损率见表4。从表4中可以看出,湿筛处理下土壤中>0.25 mm团聚体的含量变化为LSW>LS>L>LW($P < 0.05$),其中最小值为LW(56.05%),团聚体破损率为LSW(30.85%)<LS(35.38%)<L(36.67%)<LW(38.24%)($P < 0.05$)。通常情况下,将>0.25 mm的团聚体称为大团聚体,而将<0.25 mm的团聚体称为微团聚体。干筛法和湿筛法处理后团聚体数量越

表2 供试土壤的基本性质

Table 2 Physical property of tested soil

土壤类型 Soil type	土壤质地 Soil texture	砂粒质量分数 (0.02~2 mm) Sand content/%	粉粒质量分数 (0.002~0.02 mm) Silt content/%	黏粒质量分数 (<0.002 mm) Clay content/%	有机质含量 Organic matter/(g·kg ⁻¹)
砒砂岩 Soft sandstone	粉砂质壤土 Silty loam soil	34.55	59.08	6.37	1.88
沙黄土 Sandy loess	砂质壤土 Sandy loam soil	70.14	16.41	13.45	1.73

多,表示团聚体的稳定性越强^[23]。在沙黄土中加入砒砂岩和风化煤可以显著增加土壤水稳定性团聚体数量,降低团聚体破损率,提高团聚体水稳定性。而单一添加风化煤并没有增加土壤水稳性团聚体数量,相反团聚体数量处于最低,水稳性团聚体破损率达到最高。因此,向沙黄土中添加砒砂岩和风化煤能够增加土壤水稳定性团聚体数量,减少团聚体破损,但单一添加风化煤起抑制作用。

2.2 新构土体土壤团聚体稳定性特征

2.2.1 平均质量直径和几何平均质量直径

土壤团聚体平均质量直径(*MWD*)和几何平均质量直径(*GMD*)是反映土壤团聚体直径大小和数量分布状况的综合指标。*MWD*的值越大,表示土壤团聚体的大粒径团聚体质量分数越高^[24];*GMD*则是通过对团聚体直径取对数进行加权求和,弱化了团聚体粒径直径大小的影响,重在团聚体各粒级数量的体现^[25]。不同土体团聚体平均质量直径和几何平均质量直径计算结果见图1。*MWD*的值为0.676~0.843 mm,*GMD*的值为0.711~0.751 mm,*MWD*和*GMD*均表现为LSW≈LS>L>LW($P<0.05$)。在土壤中加入砒砂岩,可以提高土壤团聚体直径,单一加入风化煤,团聚体直径反而减小,砒砂岩与风化煤混合可以提高团聚体直径,但与单一加入砒砂岩效果一致。

2.2.2 分形维数

分形维数(*D*)是一种分析土壤结构和组成的重要方法,*D*值越小,表明大团聚体数量越多,土壤容重越小,土壤越疏松,土壤结构越好^[26]。图2是不同土

体土壤分形维数*D*值(R^2 在0.733~0.892),其值在2.803~2.835之间变化,且LSW≈LS<LW<L($P<0.05$)。其中,LSW的*D*值最小,为2.803。

2.3 土壤有机质含量

图3是不同土体2014、2019年土壤有机质含量,通过对不同土体2014、2019年土壤0~10 cm有机质含量比较发现,5年的质地改良土体有机质含量均呈上升趋势,其中2019年土壤有机质含量变化最为显著:LSW(21.45 g·kg⁻¹)>LS(16.09 g·kg⁻¹)>LW(11.54 g·kg⁻¹)>L(5.01 g·kg⁻¹)($P<0.01$)。对于LS和L土体,LS土体土壤有机质含量显著高于L,砒砂岩的加入能够显著提高土体有机质含量,这可能是由于砒砂岩本身养分含量高和具有良好的保肥效果^[27]。风化煤本身富含腐殖质,向土体中加入风化煤,应该会直接提升土壤有机质含量,但LW土体有机质总量提升却不如直接添加砒砂岩的LS土体,一方面可能由于风化煤的物理增温,促进了土壤微生物的矿化作用,另一方面可能是LW土体表层有机质流失。因此,向土体中同时添加风化煤和砒砂岩既可以提高土壤有机质含量,又能改善土壤养分低、保肥差等问题,进而改良土壤结构,增强土壤团聚体稳定性。

3 讨论

研究发现团聚体是有机碳的主要存在场所,有机碳是团聚体内的主要胶结物质^[28],其数量往往和土壤的稳定性呈正相关关系^[29],有机碳的增加有利于团聚体的形成和团聚体稳定性的提高^[30]。风化煤作为一

表3 新构土体土壤团聚体含量(干筛法)(%)
Table 3 Composition of soil aggregate of new mass(dry sieving method)(%)

处理 Treatments	>7 mm	5~7 mm	3~5 mm	2~3 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
LSW	19.82a	7.04a	10.15b	5.36b	10.33b	19.56b	16.23a	11.51a
LW	19.78a	8.46a	11.44a	6.04b	10.85b	18.52b	15.47a	9.44a
LS	16.43a	7.70a	10.84a	5.70b	10.54b	22.85ab	15.66a	10.28a
L	16.82a	8.67a	13.14a	6.98a	13.16a	23.12a	10.63a	7.48b

注:同列不同字母表示不同处理间的差异达显著水平($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters indicate significant difference, among different treatments ($P<0.05$). The same below.

表4 新构土体土壤团聚体组成(湿筛法)(%)
Table 4 Composition of soil aggregate of new mass(wet sieving method)(%)

处理 Treatments	>5 mm	2~5 mm	1~2 mm	0.5~1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm	团聚体破损率 Percentage of aggregation destruction
LSW	3.96a	4.63a	8.99b	21.76b	21.07a	39.59b	30.85d
LW	1.76b	3.62a	7.58b	20.28b	22.81a	43.95a	38.24a
LS	3.62a	4.77a	10.50a	23.42a	16.39b	41.30ab	35.38c
L	4.72a	3.88a	7.09b	19.35b	22.95a	42.01ab	36.67b

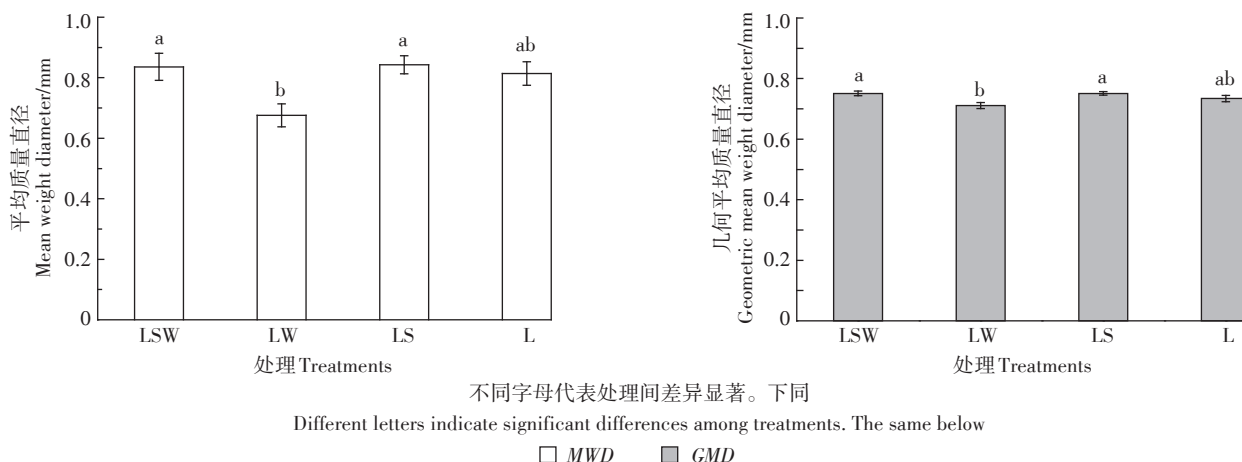


图1 新构土体土壤水稳定性团聚体的平均质量直径(MWD)和几何平均质量直径(GMD)

Figure 1 The mean weight diameter(MWD) and geometric mean weight diameter diagram(GMD) of soil water stability aggregates in new mass

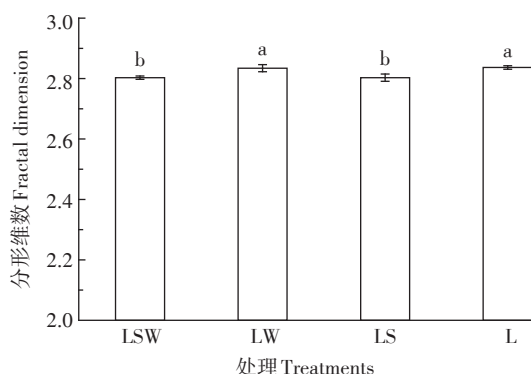


图2 不同土体土壤分形维数

Figure 2 The soil fractal dimension of new mass

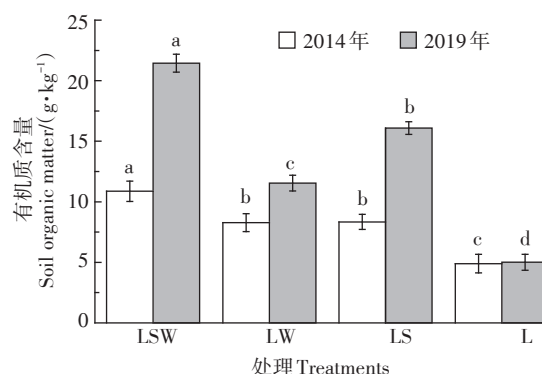


图3 不同土体2014、2019年土壤有机质含量

Figure 3 Soil organic matter in 2014 and 2019

种有机质,本身富含腐殖质,添加风化煤可以显著增加土壤有机质含量和提升团聚结构体的稳定性^[31-32]。在沙黄土中加入风化煤能够一定程度改善土壤结构,提高土壤有机质含量。但在沙黄土中加入风化煤后,虽然改善了风干团聚体粒径较大的问题,却使得粒径向减小变化,微团聚体含量升高,力稳定性反而降低。同时,在水稳性团聚体中,LW的团聚体破损率达38.24%,水稳性团聚体数量处于最低。这一方面是由于风化煤促进力稳性团聚体复粒的形成,而添加风化煤的LW土地力稳性团聚体各粒径中>7 mm团聚体数量最多,较未添加风化煤的土地显著增加69.03%,复粒数量显著增加。其次是大团聚体受水分扰动较大,尤其是在重力和水分侵蚀下土壤大粒径团聚体大量破碎分解。此外,添加风化煤的LW土壤有机质总量不高,仅为11.54 g·kg⁻¹,水稳性团聚体数量也相对较低。而砒砂岩本身富含矿物养分,保肥能力强,添加砒砂岩能够改善土壤结构和提高土壤养分

含量^[33-34]。在沙黄土中单一地加入砒砂岩后,土壤有机质含量达到16.09 g·kg⁻¹,水稳性团聚体平均质量直径和几何平均质量直径增加0.031 mm和0.022 mm,显著提升3.811%和3.096%。这一方面因为添加砒砂岩提高了土壤有机质含量,团聚体稳定性得以加强。另一方面是砒砂岩小颗粒多,沙黄土与砒砂岩之间产生胶结作用力,提高了团聚体的稳定性。郭航等^[35]在基于拉曼光谱的研究中发现,当砒砂岩的体积分数不超过50%时,砒砂岩和沙黄土之间会产生拉应力,从而使得复配土小颗粒含量会越来越多。由于小颗粒的比表面积大,相互之间的黏结、聚合作用力逐渐增强。虽然砒砂岩的加入减小了土壤粒径大小,却提高了团聚体水稳性,增加了有机质含量,使土壤结构得以加强。

在沙黄土中同时加入砒砂岩和风化煤,LSW土体的有机质含量达到最高,为21.45 g·kg⁻¹,水稳性团聚体数量最高,团聚体破损率最低,团聚体平均质量

直径和几何平均质量直径增加 0.16 mm 和 0.04 mm, 分别提升 23.72% 和 5.65%。砒砂岩虽遇水破裂, 导致大团聚体分解, 但砒砂岩本身的 Ca^{2+} 与风化煤中的腐殖质(主要是胡敏酸)结合形成不可逆凝聚状态, 反而促进了团聚体的抵抗能力。风化煤虽然可以短期增加土壤有机质, 但其总量却不是很高, 土体的保肥能力较弱, 土壤表面有机质流失。理论上, 加入砒砂岩和风化煤的土体水稳定性最强, 应该具有最高的平均质量直径、几何平均质量直径和最小的分形维数, 但是 LSW 的 *MWD*、*GMD*、*D* 值较 LS 土体提升较小, 这主要是因为加入风化煤后促进了力稳性团聚体复粒的形成, LSW 土体复粒数量显著增加, 而大团聚体因砒砂岩受水分扰动较大, 尤其是在重力和水分侵蚀下土壤大粒级团聚体大量破碎分解, 导致其稳定性指标提升较小。

4 结论

(1) 不同改良模式下, 在晋陕蒙矿区排土场沙黄土中掺混砒砂岩和风化煤能够快速提升土壤有机质含量 ($21.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 改善土壤结构, 提高团聚体稳定性, 增强土壤抗风蚀水蚀能力。新构土体中, LSW 土体的水稳性团聚体含量和团聚体稳定性指数最高, *MWD* 和 *GMD* 的值分别为 0.676 mm 和 0.711 mm, 土壤分形结构最好 (2.803)。

(2) 风化煤作为一种有机质, 在沙黄土中单独添加能够提高土壤有机质含量 ($11.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$), 但土体水稳性团聚体数量和团聚体稳定性指标 (*MWD*、*GMD*) 反而降低。在土体中加入砒砂岩能够促进土体稳定性指标稳步上升。因此, 应因地制宜、变废为宝, 将当地广泛分布的砒砂岩与风化煤结合, 构建新的排土场土体, 改善生态环境的同时降低经济成本。

参考文献:

- [1] 王晓琳, 王丽梅, 张晓媛, 等. 不同植被对晋陕蒙矿区排土场土壤养分 16 a 恢复程度的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(9): 198-203. WANG Xiao-lin, WANG Li-mei, ZHANG Xiao-yuan, et al. Effects of different vegetation on soil nutrients remediation degree in earth disposal site after 16 a in mining area of Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(9): 198-203.
- [2] 任志胜, 齐瑞鹏, 王彤彤, 等. 风化煤对晋陕蒙矿区排土场新构土体土壤呼吸的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(23): 230-237. REN Zhi-sheng, QI Rui-peng, WANG Tong-tong, et al. Effect of weathered coal on soil respiration of reconstructed soils on mining area's earth disposal sites in Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia adjacent area[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(23): 230-237.
- [3] 苏静, 赵世伟. 土壤团聚体稳定性评价方法比较[J]. 水土保持通报, 2009, 29(5): 114-117. SU Jing, ZHAO Shi-wei. Comparison of the analysis methods for soil aggregate stability[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(5): 114-117.
- [4] Peng X H, Zhu Q H, Zhang Z B, et al. Combined turnover of carbon and soil aggregates using rare earth oxides and isotopically labelled carbon as tracers[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 109: 81-94.
- [5] Valmis S, Dimoyiannis D, Danalatos N G. Assessing interrill erosion rate from soil aggregate instability index, rainfall intensity and slope angle on cultivated soils in central Greece[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 80(1/2): 139-147.
- [6] 李长明, 王立久, 杨大令, 等. 黄河砒砂岩中蒙脱石的基本特征[J]. 人民黄河, 2016, 38(6): 11-14. LI Chang-ming, WANG Li-jiu, YANG Da-ling, et al. Characters of montmorillonite of Pisha sandstone [J]. *Yellow River*, 2016, 38(6): 11-14.
- [7] Ahmadi A, Neyshabouri M R, Rouhipour H, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3/4): 305-311.
- [8] Li Q Y, Yue L. Study on change of soil property of artificial seabuckthorn plantation in Arsenic sandstone area[J]. *The Global Seabuckthorn Research and Development*, 2007, 5(4): 1-5.
- [9] Li X L, Su Y, Qi X H, et al. The experimental analysis study of soft sandstone soil properties in the plateau hilly region[J]. *Journal of Inner Mongolia Agricultural University*, 2011, 32(1): 315-318.
- [10] 柴苗苗, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙混合比例及作物种植季数对复配土壤性质和作物产量的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(10): 179-184. CHAI Miao-miao, HAN Ji-chang, LUO Lin-tao, et al. Effects of soft rock and sand mixing ratios and crop planting frequency on soil and crop yield[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2013, 41(10): 179-184.
- [11] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18. WANG Yuan-chang, WU Yong-hong, KOU Quan, et al. Definition of arsenic rock zone borderline and its classification[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5(1): 14-18.
- [12] 李华, 李永青, 沈成斌, 等. 风化煤施用对黄土高原露天煤矿区复垦土壤理化性质的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(5): 1752-1756. LI Hua, LI Yong-qing, SHEN Cheng-bin, et al. Physicochemical properties of reclaimed soil with weathered coal in open cast mining areas of Loess Plateau[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5): 1752-1756.
- [13] 武瑞平, 李华, 曹鹏. 风化煤施用对复垦土壤理化性质酶活性及植被恢复的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1855-1861. WU Rui-ping, LI Hua, CAO Peng. Amelioration of weathered coal on soil physical, chemical properties and enzyme activities with vegetation restoration[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1855-1861.
- [14] 李娟, 韩霁昌. 砒砂岩与沙复配土壤的物理性状和相关光谱特性[J]. 麦类作物学报, 2015(8): 1796-1802. LI Juan, HAN Ji-chang. Physical properties and relative spectral characteristics of the compos-

- ite soil of arsenic sandstone and sand[J]. *Acta Triticeae*, 2015(8): 1796-1802.
- [15] 中国科学院南京土壤研究所土壤物理研究室. 土壤物理性质测定法[M]. 北京: 科学出版社, 1978: 77-88. Department of Soil Physics, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Determination of soil physical properties[M]. Beijing: Science Press, 1978: 77-88.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. BAO Shi-dan. Soil and agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 66(6): 1981-1987.
- [18] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007, 40(9): 1973-1979. ZHOU Hu, LÜ Yi-zhong, YANG Zhi-chen, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1973-1979.
- [19] Ran Y, Ma M, Liu Y, et al. Physicochemical determinants in stabilizing soil aggregates along a hydrological stress gradient on reservoir riparian habitats: Implications to soil restoration[J]. *Ecological Engineering*, 2020, 143: 105664.
- [20] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对壤土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1969-1976. SHANG Jie, GENG Zeng-chao, ZHAO Jun, et al. Effects of biochar on water thermal properties and aggregate stability of Lou soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1969-1976.
- [21] 吴利杰, 李新勇, 石建省, 等. 砒砂岩的微结构定量化特征研究[J]. 地球学报, 2007, 28(6): 597-602. WU Li-jie, LI Xin-yong, SHI Jian-sheng, et al. Quantitative characteristics of the microstructure of Pisha-sandstone[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2007, 28(6): 597-602.
- [22] 张露, 韩霁昌, 王欢元, 等. 砒砂岩与风沙土复配后的粒度组成变化[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(2): 44-49. ZHANG Lu, HAN Ji-chang, WANG Huan-yuan, et al. Grain size composition change after feldspathic sandstone and aeolian sandy soil compounding[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(2): 44-49.
- [23] 李霄云, 王益权, 孙慧敏, 等. 有机污染型灌溉水对土壤团聚体的影响[J]. 土壤学报, 2011, 48(6): 1125-1132. LI Xiao-yun, WANG Yi-quan, SUN Hui-min, et al. Effects of irrigation water polluted with organic contaminants on soil aggregates[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(6): 1125-1132.
- [24] 李娟, 韩霁昌, 成生权, 等. 砒砂岩与沙复配土对土壤团聚体和有机碳质量分数的影响[J]. 西北农业学报, 2015, 24(11): 140-148. LI Juan, HAN Ji-chang, CHENG Sheng-quan, et al. Effects of composite soil with feldspathic sandstone and sand on soil aggregates and organic carbon mass fraction[J]. *Acta Agriculturae Borealioccidentalis Sinica*, 2015, 24(11): 140-148.
- [25] 祁迎春, 王益权, 刘军, 等. 不同土地利用方式土壤团聚体组成及几种团聚体稳定性指标的比较[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 340-347. QI Ying-chun, WANG Yi-quan, LIU Jun, et al. Comparative study on composition of soil aggregates with different land use patterns and several kinds of soil aggregate stability index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(1): 340-347.
- [26] 赵文智, 刘志民, 程国栋. 土地沙质荒漠化过程的土壤分形特征[J]. 土壤学报, 2002, 39(6): 877-881. ZHAO Wen-zhi, LIU Zhi-min, CHENG Guo-dong. Fractal dimension of soil particle for sand desertification[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(6): 877-881.
- [27] 王欢元, 韩霁昌, 罗林涛, 等. 砒砂岩与沙复配成土过程中沙的调控作用[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 286-290. WANG Huan-yuan, HAN Ji-chang, LUO Lin-tao, et al. Regulatory role of sand in soil formation from soft rock and sand[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2014, 45(2): 286-290.
- [28] Blanco C H, Lal R, Owens L B, et al. Mechanical properties and organic carbon of soil aggregates in the northern Appalachians[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(5): 1472-1481.
- [29] Li T, Zhang Y, Bei S, et al. Contrasting impacts of manure and inorganic fertilizer applications for nine years on soil organic carbon and its labile fractions in bulk soil and soil aggregates[J]. *Catena*, 2020, 194: 104739.
- [30] Mikutta R, Kleber M, Torn M S, et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(1): 25-56.
- [31] Li H. Improving soil enzyme activities and related quality properties of reclaimed soil by applying weathered coal in opencast-mining areas of the Chinese Loess[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 40(3): 233-238.
- [32] Imbufe A U, Patti A F, Burrow D, et al. Effects of potassium humate on aggregate stability of two soils from Victoria, Australia[J]. *Geoderma*, 2005, 125(3/4): 321-330.
- [33] 摄晓燕, 张兴昌, 魏孝荣. 适量砒砂岩改良风沙土的吸水性和保水性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(14): 115-123. SHE Xiao-yan, ZHANG Xing-chang, WEI Xiao-rong. Improvement of water absorbing and holding capacities of sandy soil by appropriate amount of soft rock[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(14): 115-123.
- [34] 王丽丽, 甄庆, 王颖, 等. 晋陕蒙矿区排土场不同改良模式下土壤养分效应研究[J]. 土壤学报, 2018, 55(6): 1525-1533. WANG Li-li, ZHEN Qing, WANG Ying, et al. Effect of soil amelioration on soil nutrients at mining dumps in the Shanxi-Shaanxi-Inner Mongolia Region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(6): 1525-1533.
- [35] 郭航, 韩霁昌, 张杨, 等. 基于拉曼光谱研究砒砂岩与沙复配土的胶结作用力[J]. 激光与光电子学进展, 2017(11): 436-442. GUO Hang, HAN Ji-chang, ZHANG Yang, et al. Cementation force of compound soil mixed by soft rock and sand: Raman spectrum study[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017(11): 436-442.