

DOI: 10.5846/stxb201501240192

唐骏, 党廷辉, 薛江, 文月荣, 徐娜, 吴得峰. 植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响. 生态学报, 2016, 36(16): - .
Tang J, Dang T H, Xue J, Wen Y R, Xu N, Wu D F. Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(16): - .

植被恢复对黄土区煤矿排土场土壤团聚体特征的影响

唐骏¹, 党廷辉^{1,2,*}, 薛江², 文月荣², 徐娜¹, 吴得峰²

¹ 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100

² 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

摘要: 目前关于植被恢复对排土场土壤团聚性的影响还不清楚, 以植被恢复下黄土区露天煤矿排土场为研究对象, 采用湿筛法测定了排土场土壤水稳性团聚体组成, 研究了植被恢复类型(草地、灌木)和排土场地形(平台、边坡)对土壤团聚体特征的影响。结果表明: 植被恢复促进了排土场水稳性团聚体的形成, 平台 0—20 cm 土层水稳性大团聚体数量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)分别达到 31.1%、0.70 mm 和 0.26 mm, 边坡分别达到 13.3%、0.37 mm 和 0.17 mm, 均显著高于裸地, 分形维数(D)在平台和边坡分别为 2.91 和 2.96, 均显著低于裸地; 平台土壤团聚性要好于边坡, 草地对于平台土壤团聚结构改良效果较好, 而灌木对于边坡改良效果较好; 排土场土壤有机碳和粘粒含量均与土壤团聚体指标有显著相关性。植被恢复提高了排土场土壤团聚性, 植被恢复类型和地形对排土场土壤团聚体特征有显著影响。

关键词: 植被恢复; 排土场; 土壤团聚体; 分形维数

Effects of vegetation restoration on soil aggregate characteristics of an opencast coal mine dump in the loess area

TANG Jun¹, DANG Tinghui^{1,2,*}, XUE Jiang², WEN Yuerong², XU Na¹, WU Defeng²

¹ Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China

² College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

Abstract: Water-stable soil aggregates are an important factor affecting soil fertility and erodibility. Reports have suggested that vegetation restoration may affect water-stable soil aggregates, but few studies have assessed vegetation restoration in the mining area on the Loess Plateau. This study was performed in the Heidaigou opencast coal mine dump of the Loess Plateau, which has been restored by vegetation reconstruction for 18 years. To study the effects of vegetation types and landforms on dump soil aggregate characteristics, we assessed three vegetation types (grassland, shrubland, and bare land) and two landforms (platform and slope) with 6 treatments and 126 samples. The water-stable soil aggregate composition was analyzed by wet sieving. The aggregates were separated into six size classes: >5 mm, 5—2 mm, 2—1 mm, 1—0.5 mm, 0.5—0.25 mm, and <0.25 mm. Macro-aggregate content ($R_{0.25}$), mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), and fractal dimension (D) were used as evaluation indexes. Soil particle size distribution was determined by an MS2000 laser granularity analyzer. Soil organic carbon (SOC) content was determined by potassium dichromate volumetry. Results showed that vegetation restoration promoted the formation of water-stable soil aggregates. The $R_{0.25}$, MWD, and GMD of the 0—20 cm soil layer were significantly higher in revegetated land than in abandoned land on both platforms and slopes. The $R_{0.25}$, MWD, GMD, and D in the 0—20 cm soil layer of revegetation land were 31.1%, 0.70 mm, 0.26 mm, and 2.91, respectively, on platforms, and 13.3%, 0.37 mm, 0.17 mm, and 2.96, respectively, on slopes. The soil

基金项目: 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-13)

收稿日期: 2015-01-24; 网络出版日期: 2015-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dangth@ms.iswc.ac.cn

aggregate quality was better on the platform than on the slope. Artificial grassland had more significant improvement in soil aggregate quality than the shrubland on the platform of the dump, but the shrubland was better on the slope. The soil aggregate quality was lower in the surface layer than sub-surface layer on the platform. SOC content and soil clay content were significantly related to soil aggregate quality. Higher SOC content was noted with vegetation restoration on the platform than on the slope. The distribution of SOC content changed in the order grassland > shrubland > bare land on the platform, but in the order shrubland > grassland > bare land on the slope. The clay, silt, and sand contents, respectively, averaged 10.52%, 54%, and 35.48% on the platform and 7.68%, 42.82%, and 49.50% on the slope. Significant and positive correlations were noted between SOC content and soil aggregate indexes and between soil clay content and soil aggregate indexes. Correlation analysis showed that water-stable soil aggregate properties were better with higher SOC and soil clay. Further, soil clay promoted the formation of water-stable soil aggregates, while the high SOC increased the particle size of water-stable soil aggregates and changed their size distribution. Our results suggested that soil aggregate quality improved significantly after 18 years of vegetation restoration, and vegetation types and landforms had significant influences on soil aggregate properties in this mining area on the Loess Plateau. In addition, our results showed the positive effects of vegetation restoration on water stability and soil structure of an opencast coal mine dump on the Loess Plateau, which reduced soil erosion and improved soil quality in this region.

Key Words: vegetation restoration; dump; soil aggregate; fractal dimension

晋陕蒙接壤的黄土地区是典型的生态脆弱区,煤炭开采加重了这一地区的生态和环境问题^[1]。由于露天煤矿在开采能力和安全性等方面的优势,近年来我国的露天煤矿生产与建设快速发展,其煤炭产量已占煤炭总产量的 9.93%,未来并将逐步提高达到 15%左右,同时露天开采对矿区土地资源及生态环境的破坏也日益严重,我国因露天开采煤炭而每年损毁的土地面积在 6600 hm²左右,其中外排土场压占土地面积为 3000 hm²左右^[2]。而我国可供露天开采的煤炭几乎全部集中在晋陕蒙地区,晋陕蒙接壤的黄土地区分布着中国和世界上罕见的特大煤田,现已探明含煤面积 3 万 km²,煤炭储量 2505 亿 t,占全国的 26.3%,该地区广泛的露天开采形成了许多大型露天煤矿排土场。同时该地区也是少有的水土流失严重的典型生态脆弱地区,排土场治理得当便可以提供大量土地资源并发挥其重要的生态功能,治理不当便会引发水土流失等一系列生态和环境问题^[3]。因此,黄土区煤矿排土场的治理对于保护该地区的生态安全及国家绿色生态屏障构建具有重要意义。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其组成及基本特性是决定土壤侵蚀、压实、板结等物理过程与作用的关键指标之一,是评价土壤肥力和抗蚀性的重要指标^[4]。排土场土壤为复填土,堆积过程中不断进行碾压,土壤团聚结构遭到破坏,土壤结构性差极易发生水土流失。植被恢复是排土场治理和生态恢复的主要措施,目前关于植被恢复对土壤团聚体的影响研究主要集中在自然地貌土壤^[5-7],植被恢复下排土场土壤质量研究也主要集中在土壤化学性质和土壤侵蚀^[8-10],而对于排土场这种重构土壤在植被恢复下土壤团聚体特征变化的研究还较少。本研究以植被恢复下黄土区大型露天煤矿排土场为研究对象,研究植被恢复类型和排土场地形对土壤团聚体特征的影响,探讨黄土区露天煤矿排土场植被恢复的土壤改良作用 and 水土保持效应,旨在为黄土区露天煤矿排土场土地复垦与生态恢复提供技术支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黑岱沟露天煤矿(39°43'—39°49'N,111°13'—111°20'E)位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗东部,地处黄河西岸鄂尔多斯台地,面积达 52.11 km²,属于晋、陕、蒙接壤黄土区一部分。矿区年均气温 7.2 °C,年均降水量 404.1 mm,降水多集中在 7,8,9 月份,约占全年降水量的 60%—70%,年蒸发量为 2082.2 mm。海拔在

1025—1302 m 之间,地形呈东北高西南低,多为波状起伏的黄土梁、峁和丘陵,沟壑纵横交错,地形切割剧烈。

研究试验地选择在黑岱沟露天煤矿区内已治理 18 年的排土场(1996 年建成的东排土场),面积 2.75 km²,排土场地貌类型为人为排土填沟形成的平坦地貌,有平台和边坡两种地形。平台宽广平坦,水土流失轻微,利于植被生长;边坡为高边坡,坡度在 45°—60°,坡长在 20 m 左右,水土流失强烈。研究区内原生土壤主要为黄绵土与风沙土交错分布,排土场土壤为复填土,堆积过程经过了剧烈扰动和碾压,其土壤质地为粉壤,容重较大,土壤养分含量低。以土壤熟化为目的,治理排土场实施了大规模的植被重建,其植被恢复较好,有多种植被恢复模式,每种植被模式均成块种植,植物盖度较高,但是类型单一。排土场堆积过程中土体来源和堆积工艺一致,机械组成显示其土壤质地一致,不同植被恢复模式也是随机排列;同时对紧邻该排土场的新建排土场(未进行植被恢复)进行了随机采样(10 个样点),并测定了 0—20cm 土层的机械组成和有机碳含量(表 1),结果显示排土场土壤粘粒、粉粒、砂粒和有机碳含量的变异系数分别为 18%,17%,12%和 15%,均为中等强度变异,属于同一田间试验区的正常变异范围^[11],因此可以认为排土场不同植被恢复样地治理前其土壤背景状况较为相似。

表 1 新建排土场土壤背景状况

Table 1 Basic soil properties of the new dump

指标 Indexes	样点 Sample										平均 Average
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
粘粒 Clay/%	10.08	7.85	10.17	8.83	10.40	9.36	7.76	11.27	8.96	7.24	9.19±1.31
粉粒 Silt/%	45.61	48.21	47.47	50.84	57.58	45.23	40.74	48.76	46.55	34.70	46.57±6.01
砂粒 Sand/%	44.31	43.94	42.36	40.33	32.02	45.41	51.50	39.98	44.49	58.06	44.24±6.92
有机碳 SOC/(g/kg)	1.82	1.78	1.62	2.04	1.43	1.99	1.49	2.19	1.49	1.59	1.74±0.26

1.2 试验设计

在植被恢复 18 年的治理排土场,平台和边坡两种地形下均选择草地和灌木林地两种主要植被恢复类型,并以无植被措施自然撂荒的裸地作为对照。在不同地形下每种植被恢复类型各选择 3—4 块样地,共选择 21 块样地,其中平台 11 块样地,边坡 10 块样地,在每块样地采集原状土壤,通过湿筛法测定土壤水稳性团聚体数量,分析植被类型和地形对排土场土壤团聚体特征的影响。样地信息见表 2。

表 2 研究样地基本情况

Table 2 Basic status of the study sites

地形 Landform	植被类型 Vegetation types	样点数和样方面积 Sample number and area	植被 Vegetation
平台 Platform	裸地	3 20 m×20 m	自然恢复,无人工措施,植被盖度低,赖草(<i>Leymus secalinus</i> (Georgi) Tzvel)、白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng)等
	草地	4 20 m×20 m	人工草地,类型单一,主要为紫花苜蓿(<i>Medicago sativa</i>),沙打旺(<i>Astragalus adsurgens</i>),冰草(<i>Agropyron cristatum</i>),甘草(<i>Glycyrrhiza uralensis</i>)等,盖度较高
	灌木	4 20 m×20 m	人工灌木,纯林或混交林,主要植被类型有沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)、柠条(<i>Caragana Korshinskii</i> Kom)、紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>)等
边坡 Slope	裸地	3 20 m×20 m	自然恢复,无人工措施,植被盖度低,水土流失严重
	草地	4 20 m×20 m	人工草地,冰草(<i>Agropyron cristatum</i>)占优势,有铁杆蒿(<i>Artemisi asacrorum</i>)、白羊草(<i>Bothriochloa ischaemum</i> (L.) Keng)等杂草
	灌木	3 20 m×20 m	人工灌木,主要为沙棘(<i>Hippophae rhamnoides</i>)和柠条(<i>Caragana Korshinskii</i> Kom)的纯林和混交林

1.2.1 采样方法

采样于 2014 年 7 月上旬进行。在每块样地划定一个 20 m×20 m 的样方,在每个样方内样地按照“品”字形 3 点取样(边坡沿坡长方向进行采样)分别采集 0—10,10—20 cm 两个层次原状土样,每个样地 3 次重复,

平台和边坡共采集 126 个原装土样。在每个在采集和运输过程中尽量减少对土样的扰动,以免破坏团聚体。原状土样在风干过程中沿自然裂隙掰成直径为 1 cm 左右的小块,并且去除粗根及小石块。

1.2.2 样品测定

团聚体分析采用湿筛法^[12],具体方法如下:先取 500 g 风干土样通过沙维诺夫法进行干筛,当筛分完成后测定各粒级土样重量,按比例配成 50 g 风干土样,根据约得法进行湿筛。使用团聚体分析仪(南京土壤所制)湿筛 1 分钟,通过一套直径为 10 cm,孔径顺次为 5, 2, 1, 0.5 和 0.25 mm 的筛组。将已筛好的筛组拆开留在各级筛子上的团聚体用细水流通过漏斗洗入烧杯中,得到 >5 mm, 5—2 mm, 2—1mm, 1—0.5, 0.5—0.25 mm, <0.25 mm 各粒级水稳性团聚体,使用沙浴烘干,然后称量。

将风干土样过 1mm 筛,采用英国马尔文公司生产的 MS2000 型激光粒度测量仪测定颗粒分布。根据美国制分类标准分为砂粒(0.05—1 mm)、粉粒(0.002—0.05 mm)和黏粒(<0.002 mm)。风干土样研磨过 0.15mm 的筛,用重铬酸钾外加热法测定土壤有机碳含量。

1.2.3 分析方法

根据相关研究结果,本文综合应用大于 0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)和分形维数(D)等指标来描述土壤团聚体的分布状况和稳定性特征。

计算公式:

$$R_{0.25} = 1 - \frac{M_{r < 0.25}}{M_T} \quad (1)$$

$$\text{MWD} = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x}_i w_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (2)$$

$$\text{GMD} = \frac{\sum_{i=1}^n (w_i \ln \bar{x}_i)}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (3)$$

$$\log \left[\frac{M(r < \bar{x}_i)}{M_T} \right] = (3 - D) \log \left[\frac{\bar{x}_i}{x_{\max}} \right] \quad (4)$$

利用公式(4)通过数据拟合,可求得 D。

其中, \bar{x}_i 为某级团聚体平均直径, $M(r < \bar{x}_i)$ 为粒径小于 \bar{x}_i 的团聚体重量, M_T 为团聚体总重量, x_{\max} 为团聚体的最大粒径。

数据通过 EXCEL 进行初步整理,使用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,LSD 法进行差异显著性检验,用 sigma Plot 10.0 软件作图。

2 结果

2.1 植被恢复类型和地形对排土场土壤各粒级团聚体比例的影响

对排土场各样地土壤各粒级水稳性团聚体含量进行分析(表 3),排土场植被恢复下各样地均以 <0.25 mm 小粒级团聚体所占比例最高,其所占比例为 67.36%—92.86%,而大粒级团聚体中 0.25—2 mm 团聚体所占比例要显著高于 >2 mm 粒级团聚体,不同样地 >5 mm 团聚体差异较大。土壤中大于 0.25 mm 的团聚体称为土壤大团聚体,其数量和分布特征能够表征土壤结构和抗蚀性^[13]。植被恢复下排土场平台土壤 0—10, 10—20 cm 土层大团聚体比例($R_{0.25}$)分别为 31.7%和 30.5%,边坡各土层分别为 13.4%和 13.1%,而裸地 0—10, 10—20 cm 土层 $R_{0.25}$ 平台为 4.3%和 4.1%,边坡为 1.7%和 1.8%,植被恢复下 $R_{0.25}$ 要显著高于裸地。

不同植被类型和地形对土壤水稳性团聚体数量有显著影响。平台不同植被类型下各土层 $R_{0.25}$ 均为草地 >灌木 >裸地,草地和灌木未达到显著差异($P < 0.05$),但均显著高于裸地;边坡各土层均为灌木 >草地 >裸地,差异显著($P < 0.05$)。相同植被类型下,各粒级大团聚体数量均表现出平台显著高于边坡的规律,表明植被恢

复下平台土壤团聚性要好于边坡。平台植被恢复下各粒级大团聚体含量均较高,平台草地和灌木 0—10 cm 土层 >5 mm 团聚体含量分别达到 5.71% 和 4.49%, 显著高于边坡;边坡植被恢复下各粒级大团聚体含量相对较低,仅灌木地 0.25—0.5 mm 和 0.5—1 mm 两个粒径团聚体含量与平台相差较小在 5.04%—7.70% 范围,其它大团聚体含量在 0.92%—2.73%, 含量很低。不同植被类型和地形下各粒级团聚体含量差异很大,尤其是大粒径团聚体差异最为显著。

表 3 不同植被类型和地形下土壤各粒级团聚体比例

Table 3 Aggregates content under different vegetation types and landforms

土层 Soil layer/cm	地形 Landform	植被类型 Vegetation types	团聚体含量 Content of aggregate/%						大团聚体 含量/% R _{0.25}
			>5mm	2—5mm	1—2mm	0.5—1mm	0.25—0.5mm	<0.25mm	
0—10	平台	草地	5.71±1.17a	5.29±1.26a	6.70±1.83b	8.56±1.36a	6.38±1.64a	67.36±7.93b	32.63±7.93a
		灌木	4.49±1.07b	3.06±1.18b	9.70±1.73a	6.79±1.89b	6.45±1.78a	69.50±12.90b	30.50±12.90a
		裸地	0.25±0.35c	0.66±0.34c	0.68±0.71c	1.15±1.09c	1.54±1.47b	95.71±3.39a	4.29±3.39b
	边坡	草地	1.38±0.39a	1.57±0.64a	1.76±0.18b	2.00±0.84b	1.98±0.87b	91.30±1.24b	8.70±1.24b
		灌木	1.93±0.75a	2.27±0.41a	2.73±0.39a	5.61±1.29a	5.50±0.50a	81.96±2.84c	18.04±2.84a
		裸地	0.65±0.22b	0.32±0.07b	0.12±0.07b	0.21±0.14c	0.37±0.19c	98.22±0.32a	1.78±0.32c
10—20	平台	草地	2.87±1.88a	3.79±1.17a	6.47±1.97a	9.69±2.28a	9.32±2.68a	67.86±4.96b	32.14±4.96a
		灌木	2.03±1.45a	3.16±1.42a	5.59±1.92a	9.63±2.58a	8.73±1.34a	70.86±4.87b	29.14±4.87a
		裸地	0.43±0.75b	0.27±0.41b	0.42±0.64c	0.95±1.15b	2.07±2.41b	95.85±4.18a	4.15±4.18b
	边坡	草地	1.37±0.81a	0.92±0.36b	1.26±0.67b	1.46±0.46b	2.14±1.34b	92.86±1.82b	7.14±1.82b
		灌木	1.78±1.28a	2.02±0.66a	2.52±0.29a	5.04±2.04a	7.70±1.69a	80.93±3.12c	19.07±3.12a
		裸地	0.70±0.39b	0.33±0.12c	0.23±0.10c	0.25±0.10c	0.22±0.14c	98.20±0.34a	1.80±0.34c

不同小写字母表示相同地形下、不同植被类型土壤团聚体之间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 植被恢复类型和地形对排土场土壤 MWD 和 GMD 的影响

平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指标, MWD 和 GMD 值越大表示土壤团聚体的团聚度越高, 稳定性越好。比较边坡与平台不同植被恢复类型下土壤 MWD 和 GMD (图 1), MWD 和 GMD 变化具有较为一致的规律。平台与边坡植被恢复措施下各土层 MWD 和 GMD 均要显著高于裸地, 平台植被恢复下 0—10 cm 土层 MWD 和 GMD 分别比裸地提高 339.84% 和 100.91%, 10—20 cm 分别提高 221.65% 和 75.75%; 边坡植被恢复下 0—10 cm 土层 MWD 和 GMD 分别比裸地提高 104.23% 和 30.44%, 10—20 cm 分别提高 85.08% 和 27.31%, 表明植被恢复提高了排土场土壤 MWD 和 GMD。地形对排土场土壤 MWD 和 GMD 有显著影响, 植被恢复下平台土壤 MWD 和 GMD 均显著高于边坡。植被恢复类型对排土场土壤 MWD 和 GMD 也有显著影响, MWD 在平台各土层均表现为草地 > 灌木 > 裸地, 在边坡各土层均表现为灌木 > 草地 > 裸地, 差异显著 ($P < 0.05$); GMD 在平台各土层均表现为草地 > 灌木 > 裸地, 在边坡各土层均表现为灌木 > 草地 > 裸地, 灌木与草地未达到显著差异, 但均显著高于裸地 ($P < 0.05$)。平台草地和灌木恢复下 MWD 均表现为表层 (0—10 cm) 显著高于次表层 (10—20 cm), 边坡植被恢复下表层与次表层 MWD 差异不显著, GMD 在不同土层间也表现出相同规律, 但随土层加深其降低幅度要小于 MWD, 两土层间差距不大。

2.3 植被恢复类型和地形对排土场土壤分形维数的影响

土壤团粒结构的分形维数反映了土壤水稳性团聚体含量对土壤结构与稳定性的影响趋势, 即团粒结构分形维数越小, 土壤越具有良好的结构与稳定性, 抗蚀能力越强。比较平台与边坡不同植被恢复类型下土壤分形维数 (如图 2), 平台与边坡植被恢复下各土层分形维数均要显著低于裸地, 表明植被恢复降低了排土场土壤团聚体分形维数。植被恢复下平台表层和次表层团聚体分形维数降低为 2.908 和 2.922, 边坡表层和次表层分别降低为 2.966 和 2.968。平台的团聚体分形维数要显著低于坡地, 植被恢复对平台土壤结构改良效果要优于边坡, 平台土壤团聚度和抗侵蚀能力都强于边坡。不同植被恢复类型下平台各土层土壤分形维数为草

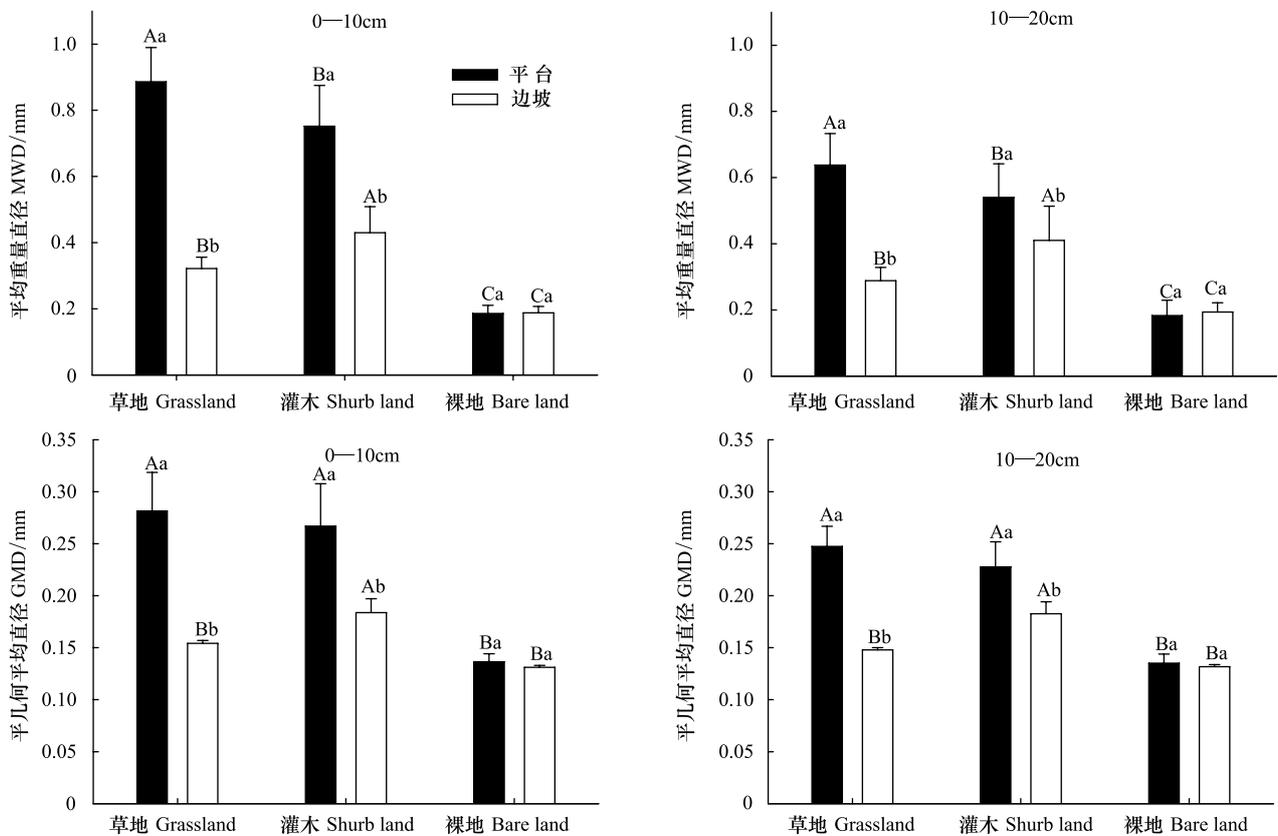


图1 不同植被类型和地形下土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径

Fig.1 Mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) under different vegetation types and landforms

不同大写字母表示相同地形下、不同植被类型土壤团聚体之间差异显著 ($P < 0.05$); 不同小写字母表示同一植被类型下、不同地形土壤团聚体之间差异显著

地 < 灌木 < 裸地, 边坡各土层分形维数均表现为灌木 < 草地 < 裸地, 除平台 0—10 cm 土层草地与灌木分形维数差异不显著其余均达到显著性差异 ($P < 0.05$), 草地对于提高平台土壤团聚度效果要好于灌木, 而在边坡灌木的改良效果要好于草地。平台草地和灌木恢复土壤下分形维数均表现为表层 (0—10 cm) 显著低于次表层 (10—20 cm), 边坡植被恢复下表层与次表层土壤分形维数相差不大, 差异不显著。

2.4 排土场土壤有机碳含量及颗粒分布与土壤团聚体特征的关系

土壤有机碳 (SOC) 被认为是土壤质量的重要评价指标^[14], 并且对土壤团聚体的形成及稳定有重要作用^[15]。对排土场不同种被恢复下 SOC 进行比较 (如图 3), 结果表明不同植被恢复下 SOC 与土壤团聚体指标表现出较为一致的规律。无论平台还是边坡, 植被恢复均显著提高了排土场 0—10 cm 和 10—20 cm 土层 SOC, 在平台 SOC 表现为草地 > 灌木 > 裸地, 边坡表现为灌木 > 草地 > 裸地, 除边坡 0—10 cm 土层草地与灌木 SOC 差异不显著, 其余均达到显著性差异 ($P < 0.05$); 草地恢复下 0—10 cm 和 10—20 cm 土层均为平台显著高于边坡, 而灌木恢复下边坡较高与平台, 但未达到显著差异。与土壤团聚体指标不同, 排土场 0—10 cm 和 10—20 cm 土层相比 SOC 差异较大, 在 10—20 cm 土层不同植被恢复下 SOC 差异较小, 表明植被恢复对表层 SOC 影响较大, 而对次表层 SOC 影响较小。

将 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD、D 分别与土壤有机碳进行相关分析 (如图 4), 各指标均与 SOC 具有显著地线性相关关系。SOC 与 $R_{0.25}$ 、MWD 和 GMD 有极显著的正相关, 与 D 有极显著的负相关, 表明土壤有机碳对土壤团聚体形成和分布有显著影响, 其含量越高则土壤团聚性越好。其中 MWD 与土壤有机碳的相关性最高, R^2 达到了 0.44, $R_{0.25}$ 与土壤有机碳相关性最低, R^2 仅为 0.28, GMD 和 D 与土壤有机碳的相关性较高, R^2 分别为 0.37 和 0.34。

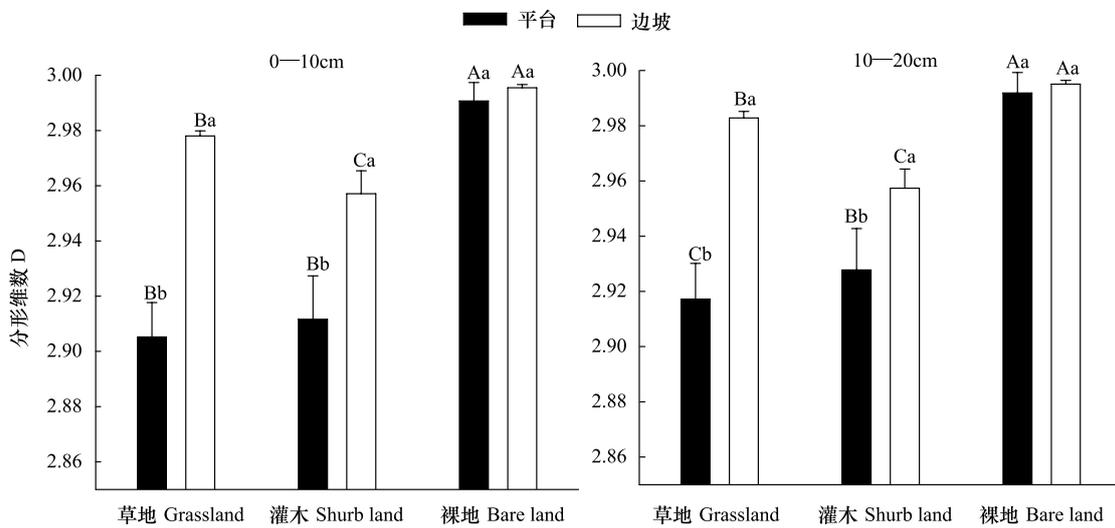


图 2 不同植被类型和地形下土壤分形维数

Fig.2 Fractal dimension of soil aggregates under different vegetation types and landforms

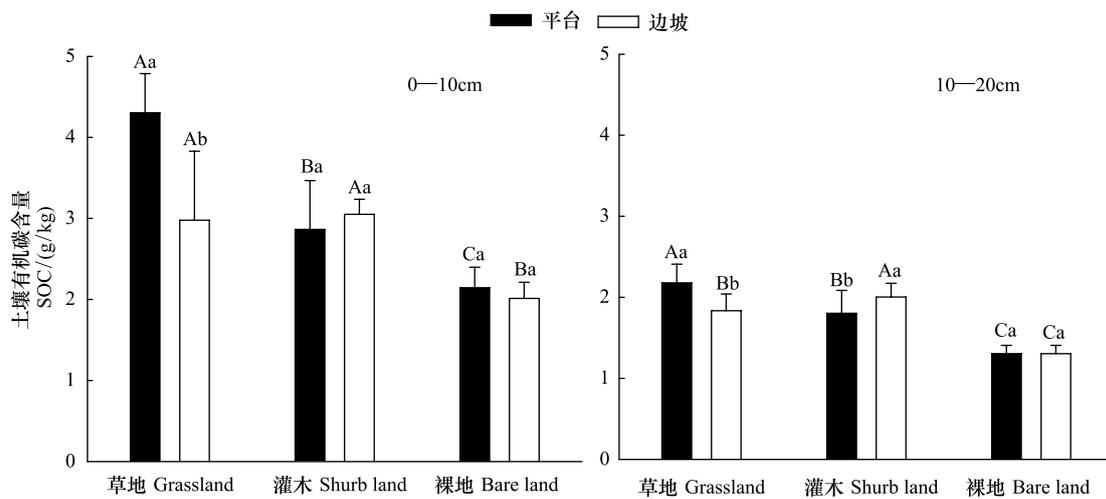


图 3 不同植被类型和地形下土壤有机碳含量

Fig.3 Content of soil organic carbon under different vegetation types and landforms

对植被恢复下排土场颗粒分布进行分析(表 4)。由于排土场堆积过程中土体来源和堆积工艺一致,排土场土壤颗粒分布变异较小,土壤质地一致。植被恢复下排土场平台土壤粘粒、粉粒和砂粒含量分别为 10.52%,54%和 35.48%,变异系数分别为 9%,10%和 17%;边坡土壤粘粒、粉粒和砂粒含量分别为 8.93%,48.02%和 43.05%,变异系数分别为 21%,16%和 21%。排土场植被恢复下土壤粒径分布较为一致,属于弱变异和中度变异,粘粒含量较少粉粒含量最多,土壤质地为粉壤。排土场平台和边坡裸地的粘粒、粉粒和砂粒含量分别为 6.63%,33.91%,59.46%和 5.68%,33.45%,60.87%。

表 4 不同植被类型和地形下土壤颗粒分布

Table 4 Soil particle size distribution under different vegetation types and landforms

土层 Soil layer/cm	地形 Landform	植被类型 Vegetation types	土壤颗粒分布 Soil particle size distribution/%		
			粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
0-10	平台	草地	10.38±0.94a	54.55±6.82a	35.07±7.72b
		灌木	10.16±1.00a	51.76±5.11a	38.08±6.01b

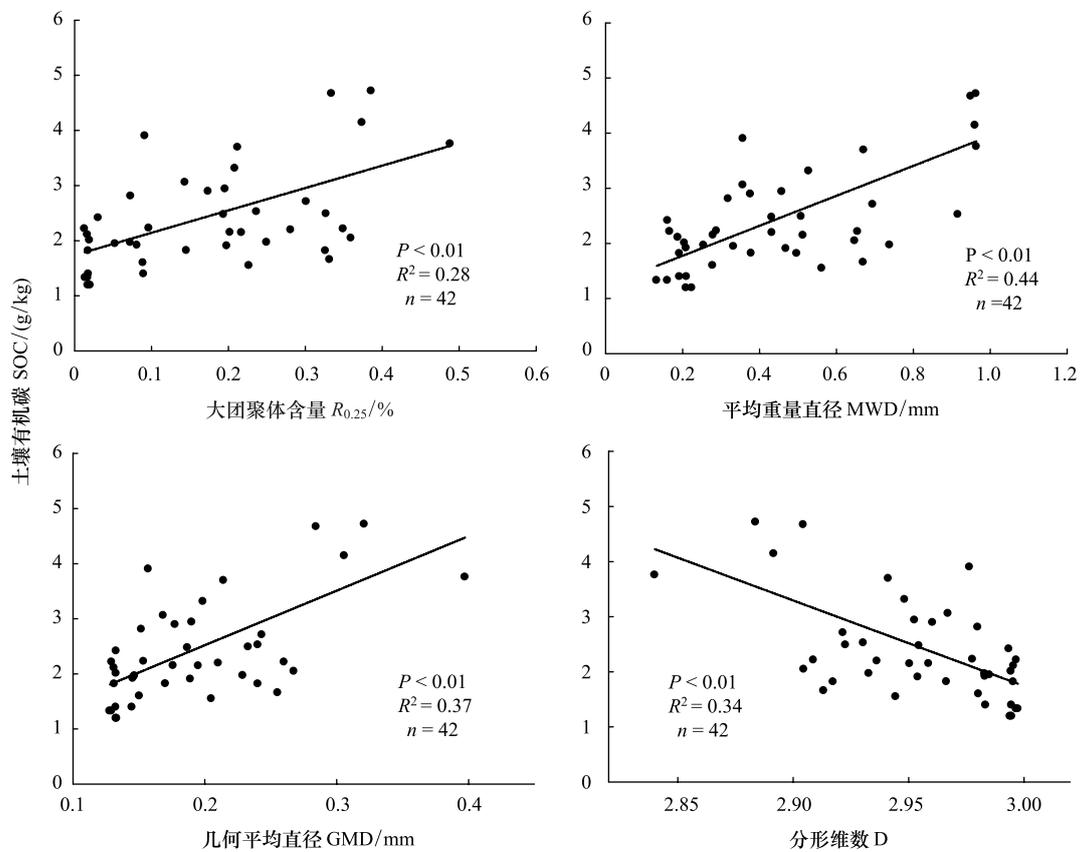


图4 土壤有机碳含量与团聚体指标的关系

Fig.4 Relationship between SOC content and soil aggregate indexes

续表

土层 Soil layer/cm	地形 Landform	植被类型 Vegetation types	土壤颗粒分布 Soil particle size distribution/%		
			粘粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
10—20	边坡	裸地	5.99±0.29b	31.53±3.19b	62.47±3.47a
		草地	7.33±1.73b	43.32±9.04b	49.34±10.61b
		灌木	9.86±0.99a	50.31±3.68a	39.83±3.60c
	平台	裸地	5.50±1.69c	31.47±2.54c	63.03±4.22a
		草地	10.42±1.17a	56.24±6.54a	33.33±7.66b
		灌木	11.11±0.87a	53.44±3.11a	35.44±3.96b
		裸地	7.28±1.21b	36.28±3.28b	56.43±3.85a
	边坡	草地	7.23±2.02b	44.18±11.23b	48.59±13.20b
		灌木	10.30±0.55a	52.21±6.98a	37.48±7.19c
		裸地	5.85±1.25c	35.43±5.09c	58.71±6.27a

粘粒是土壤团聚结构形成的重要因素,相关分析也表明(图5),3种土壤颗粒中土壤粘粒含量与 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD具有极显著($P < 0.01$)地正相关关系,与团聚体分形维数具有极显著负相关,表明植被恢复下土壤粘粒含量越高、质地越重则土壤团聚性越好。土壤粘粒含量与 $R_{0.25}$ 相关性最好, R^2 达到了0.67,与MWD相关性最差,其 R^2 为0.39。

3 讨论

在黄土地区已经完成的大量研究表明植被恢复能够促进土壤水稳性团聚体的形成^[16-18]。本次研究中植

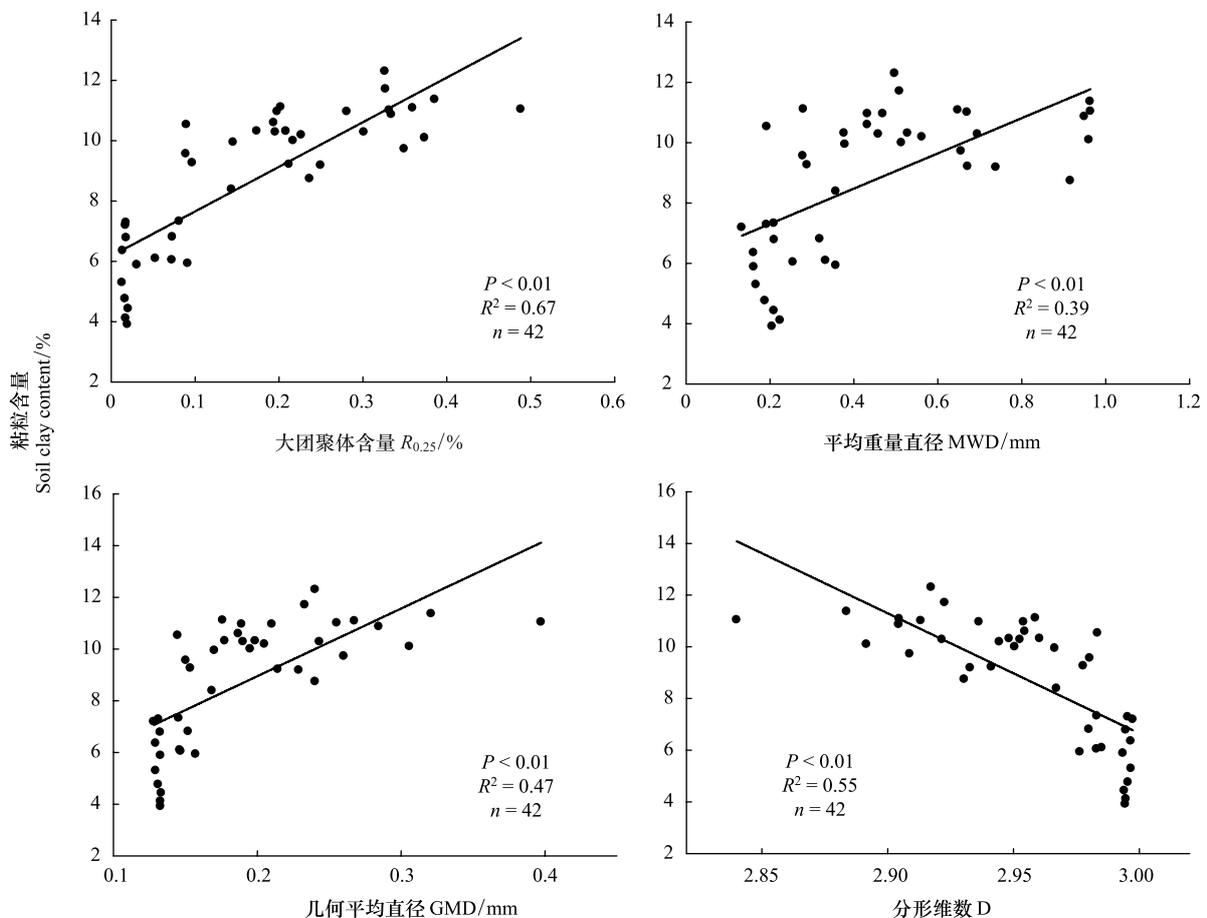


图 5 土壤粘粒含量与团聚体指标的关系

Fig.5 Relationship between soil clay content and soil aggregate indexes

被恢复下排土场平台和边坡土壤团聚结果均好于裸地,土壤 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD 均显著提高,D 显著降低,表明植被恢复同样能促进该地区排土场重构土壤水稳性团聚体的形成。但由于排土场土壤结构破坏严重,植被生长的土壤气候环境较差,植被恢复对土壤的改良是一个缓慢过程,与黄土区自然土壤植被恢复研究结果^[7,17-18]相比其土壤团聚状况仍然较差,土壤团聚较为缓慢,土壤结构和质量需要进一步提升。

地形和植被类型对排土场植被恢复下土壤团聚体特征有显著影响。Zhang L^[9]对黄土区露天煤矿排土场的研究表明,地形对排土场水土流失和土壤物理、化学性质均有显著影响,植被恢复下平台的土壤质量要好于边坡,而边坡的土壤侵蚀强度要显著高于平台。本研究也表明植被恢复下排土场不同地形土壤团聚性有显著差异,平台水分养分条件有利于植被恢复,同时水土流失和团聚体破坏均较轻,植被恢复下其有机碳和粘粒含量均更高,所以平台具有较好的土壤团聚结构。赵世伟^[19]和于寒清^[16]对黄土地区的研究表明灌木恢复下土壤团聚性要好于草地,但是本研究表明在排土场平台草地的恢复效果较好,这可能是由于植被恢复所处的环境不同。排土场植被生长环境较差,更适合能忍受贫瘠环境的草本作物的生长,同时草地表层枯落物和根系发达,有机质周转较快,对土壤团聚结构改良效果也好于灌木地,李俊超^[8]等研究也显示草地对排土场平台土壤的改良效果要优于灌木;而边坡土壤侵蚀严重,灌木相比草本具有较好的保持水土能力^[20],比较适应边坡这种侵蚀强烈的地形,所以灌木对边坡土壤结构改良效果要好于草地。由于排土场土壤性质的特殊性,其植被恢复过程和效果与该地区自然土壤有很大差异,并不能照搬自然地区植被恢复的技术经验,应因地制宜,并根据排土场不同位置和恢复目的选择适宜的植被恢复模式。

土壤有机质和粘粒是土壤团聚结构形成的重要因素,土壤团聚体的形成主要依赖于土壤中各种胶结物质

的数量和性质,而土壤腐殖质和粘粒是最主要的胶结物质^[21]。Yao S H^[22]的研究表明植被恢复通过增加退化土壤的有机碳含量而增强土壤团聚性,这与本研究结果一致,排土场土壤有机碳含量越高其土壤团聚性越好。Zhou H^[23]的研究结果表明长时间的植被恢复下土壤有机碳含量越高而粘粒含量越低则土壤团聚性越好,这与本研究中土壤粘粒与SOC均促进土壤团聚体形成的结果不一致。主要是由于Zhou H的研究在红壤地区,其土壤粘重,粘粒含量过高造成土壤结构不良;而本研究在黄土地区,排土场土壤以粉粒和砂粒为主,粗颗粒含量较多不利于土壤团聚体的形成,同时排土场土壤有机碳含量偏低,因此粘粒含量对于排土场土壤团聚体的形成更为重要。通过分析(表4)可以看出,与裸地相比植被恢复下土壤粘粒和粉粒含量显著增加,而砂粒显著减少,主要原因可能是不同植被恢复下土壤侵蚀强度不同。裸地土壤侵蚀强烈,强烈的侵蚀下细颗粒大量流失^[24],所以其粘粒和粉粒所占比例较低,而不易流失的砂粒相对积累,而植被恢复措施下土壤侵蚀较轻,土壤细颗粒流失较少,所以土壤粘粒和粉粒含量相对较高。

以往对于土壤团聚体形成的影响因素的研究多在自然土壤条件下^[7,23,25],而对于排土场这种重构土壤其团聚体特性及影响因素的研究还很少,本研究表明了土壤有机碳和粘粒对于重构土壤团聚体形成和分布的影响,植被恢复主要通过增加土壤有机碳含量和减少粘粒流失来促进土壤团聚,在排土场重构土壤熟化过程中可以通过增加土壤有机质和粘粒来改良土壤结构,一些研究表明土壤改良剂如粉煤灰、污泥、堆肥等的加入与植被恢复措施配合对排土场的生态恢复有更好的效果^[26]。Zhou H^[23]已经利用同步辐射对团聚体内部微结构进行了研究,表明了植被恢复对于改善团聚体内部微结构、增加其孔隙性的作用;Wei X R^[25]也对黄土地区植被恢复下土壤团聚体内部有机碳的分布特征进行了研究。本文研究了植被恢复对排土场土壤水稳性团聚体数量和粒径分布的影响,但对于团聚体内部状况以及形成过程研究还不够深入,今后还需要进行更为深入的研究,探究植被恢复下排土场重构土壤团聚体的形成过程和内部特征。

4 结论

本研究表明植被恢复能显著提高排土场重构土壤的团聚性,植被类型和地形对土壤团聚性有显著影响。排土场平台在草地恢复下土壤团聚状况较好,在恢复初期应以草地作为主要的植被恢复模式;而边坡在灌木恢复下土壤团聚状况较好,应以灌木作为主要的恢复模式。植被恢复下土壤有机碳含量越高、质地越粘重则土壤团聚性越好,植被恢复通过增加排土场的土壤有机碳含量和减少粘粒流失促进土壤团聚过程。本研究揭示了黄土区煤矿排土场不同植被恢复下土壤团聚体特征,有助于进一步认识植被恢复对于该地区排土场土壤质量提高和水土保持的作用,并为排土场不同部位植被恢复方向的确定以及适宜植被恢复类型的筛选提供了科学依据,对其他大型工程堆积体及填沟造地等重构土壤的植被恢复、土壤熟化的研究也有一定科学意义。

参考文献 (References):

- [1] Li M S. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China; A review of research and practice. *Science of the Total Environment*, 2006, 357(1/3): 38-53.
- [2] 刘瑞顺. 内蒙古永利煤矿排土场边坡土壤侵蚀调查与试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [3] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 杨睿璇, 张萌. 黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 223-232.
- [4] Lal R. Physical management of soils of the tropics; priorities for the 21st century. *Soil Science*, 2000, 165(3): 191-207.
- [5] Liu M Y, Chang Q R, Qi Y B, Liu J, Chen T. Aggregation and soil organic carbon fractions under different land uses on the tableland of the Loess Plateau of China. *CATENA*, 2014, 115: 19-28.
- [6] Gao H L, Qiu L P, Zhang Y J, Wang L H, Zhang X C, Cheng J M. Distribution of organic carbon and nitrogen in soil aggregates of aspen (*Populus simonii* Carr.) woodlands in the semi-arid Loess Plateau of China. *Soil Research*, 2013, 51(5): 406-414.
- [7] 程曼, 朱秋莲, 刘雷, 安韶山. 宁南山区植被恢复对土壤团聚体水稳性及有机碳粒径分布的影响. *生态学报*, 2013, 33(9): 2835-2844.
- [8] 李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏. 植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化. *环境科学*, 2014, 35(10): 3842-3850.
- [9] Zhang L, Wang J M, Bai Z K, Lv C J. Effects of vegetation on runoff and soil erosion on reclaimed land in an opencast coal-mine dump in a loess

- area. *CATENA*, 2015, 128: 44-53.
- [10] Finkenbein P, Kretschmer K, Kuka K, Klotz S, Heilmeier H. Soil enzyme activities as bioindicators for substrate quality in revegetation of a subtropical coal mining dump. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 56: 87-89.
- [11] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学. 北京: 高等教育出版社, 2006: 228-229.
- [12] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [13] 陈恩凤, 关连珠, 汪景宽, 颜丽, 王铁宇, 张继宏, 周礼恺, 陈利军, 李荣华. 土壤特征微团聚体的组成比例与肥力评价. *土壤学报*, 2001, 38(1): 49-53.
- [14] 刘占锋, 傅伯杰, 刘国华, 朱永官. 土壤质量与土壤质量指标及其评价. *生态学报*, 2006, 26(3): 901-913.
- [15] Virto I, Gartzia-Bengoetxea N, Fernández-Ugalde O. Role of Organic Matter and Carbonates in Soil Aggregation Estimated Using Laser Diffractometry. *Pedosphere*, 2011, 21(5): 566-572.
- [16] 于寒青, 李勇, 金发会, 孙丽芳. 黄土高原植被恢复提高大于 0.25mm 粒级水稳性团聚体在土壤增碳中的作用. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(4): 876-883.
- [17] 安韶山, 张扬, 郑粉莉. 黄土丘陵区土壤团聚体分形特征及其对植被恢复的响应. *中国水土保持科学*, 2008, 6(2): 66-70, 82-82.
- [18] 马帅, 赵世伟, 李婷, 李晓晓, 曾宪芳. 子午岭林区植被自然恢复下土壤剖面团聚体特征研究. *水土保持学报*, 2011, 25(2): 157-161.
- [19] 赵世伟, 苏静, 杨永辉, 刘娜娜. 宁南黄土丘陵区植被恢复对土壤团聚体稳定性的影响. *水土保持研究*, 2005, 12(3): 27-28, 69-69.
- [20] 赵护兵, 刘国彬, 曹清玉. 黄土丘陵区不同植被类型对水土流失的影响. *水土保持研究*, 2004, 11(2): 153-155.
- [21] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素. *土壤通报*, 2005, 36(3): 415-421.
- [22] Yao S H, Qin J T, Peng X H, Zhang B. The effects of vegetation on restoration of physical stability of a severely degraded soil in China. *Ecological Engineering*, 2009, 35(5): 723-734.
- [23] Zhou H, Peng X, Peth S, Xiao T Q. Effects of vegetation restoration on soil aggregate microstructure quantified with synchrotron-based micro-computed tomography. *Soil & Tillage Research*, 2012, 124: 17-23.
- [24] Polyakov V, Lal R. Modeling soil organic matter dynamics as affected by soil water erosion. *Environment International*, 2004, 30(4): 547-556.
- [25] Wei X R, Li X Z, Jia X X, Shao M A. Accumulation of soil organic carbon in aggregates after afforestation on abandoned farmland. *Biology and Fertility of Soils*, 2013, 49(6): 637-646.
- [26] Juwarkar A A, Jambhulkar H P. Phytoremediation of coal mine spoil dump through integrated biotechnological approach. *Bioresource Technology*, 2008, 99(11): 4732-4741.