

覆土厚度对复垦土壤团聚体稳定及有机碳贡献率的影响

蒋志洋¹, 龙林丽¹, 程海燕^{2,3,4}, 周育智¹, 徐燕飞^{2,3,4}, 陈孝杨^{1,2*}

(1. 安徽理工大学地球与环境学院, 安徽淮南 232001; 2. 安徽省煤矿绿色低碳发展工程研究中心, 安徽淮南 232000; 3. 平安煤炭开采工程技术研究院有限责任公司, 安徽淮南 232033; 4. 淮南矿业(集团)有限责任公司, 安徽淮南 232001)

摘要 为了探究覆土厚度对复垦土壤团聚体稳定及有机碳贡献率的影响, 采用干筛法、湿筛法测定不同覆土厚度下土壤机械稳定性、水稳定性团聚体、团聚体有机碳分布, 计算稳定性参数及有机碳贡献率, 分析覆土厚度对其的影响。结果表明, 在同一粒级下, 随着覆土厚度的增加, 团聚体有机碳含量呈先增加后减少的趋势。覆土 0~20 cm 的 >0.25 mm 水稳定性团聚体含量最大、土壤团聚体团粒指数最小, 覆土为 60~80 cm 的土壤机械稳定性和水稳定性团聚体平均重量直径、几何平均直径、团聚体稳定率最大, 团聚体破坏率最低, 是研究区最适合微生物活动及土壤根系生长的覆土厚度, 研究结果对煤矸石充填复垦土壤的合理利用及可持续发展具有重要意义。

关键词 采煤沉陷区; 土地复垦; 覆土厚度; 土壤团聚体稳定性; 有机碳贡献率

中图分类号 S151.9 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)07-0068-05

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2023.07.017

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cover Thickness on Stability of Aggregates and Organic Carbon in Reclaimed Soil

JIANG Zhi-yang¹, LONG Lin-li¹, CHENG Hai-yan^{2,3,4} et al (1. School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001; 2. Anhui Coal Mine Green and Low-Carbon Development Engineering Research Center, Huainan, Anhui 232000; 3. Ping'an Coal Mining Engineering Technology Research Institute Co., Ltd., Huainan, Anhui 232033; 4. Huainan Mining (Group) Co., Ltd., Huainan, Anhui 232001)

Abstract In order to explore the effects of cover thickness on the stability of soil aggregates and the contribution rate of organic carbon, the mechanical stability of soil, the water stability aggregate and the organic carbon distribution of aggregates under different cover thicknesses were determined by dry sieve method and wet screen method, the stability parameters and organic carbon contribution rate were calculated, and the influence of cover thickness was analyzed. The results showed that under the same particle level, with the increase of the thickness of the cover, the average content of aggregate organic carbon showed a trend of increasing first and then decreasing. The > 0.25 mm water stability aggregate content of 0-20 cm of the covered soil was the largest, the soil agglomerate particle index was the smallest, the average weight diameter, geometric average diameter and agglomerate stability of the soil mechanical stability and water stability aggregates with a soil cover of 60-80 cm are the largest, the agglomeration failure rate was the lowest, and it was the most suitable soil thickness for microbial activities and soil root growth in the study area, and the research results were of great significance for the rational utilization and sustainable development of the reclaimed soil filled with gangue.

Key words Coal mining subsidence area; Land reclamation; Cover thickness; Soil agglomeration stability; Organic carbon contribution rate

据政府间气候变化专门委员会(IPCC)统计,全球农业减排的自然总潜力有93%来自土壤固碳,现土壤固碳潜力、土壤固碳机制、影响因素等已成为土壤碳库的研究重点^[1]。利用煤矸石充填复垦是改善复垦区域土壤结构、实现矿区土地复垦与生态重建的重要手段。矿区复垦后会优先用于农业生产^[2],了解其土壤养分情况尤为重要,其中土壤有机碳含量是衡量土壤肥力的重要指标,可以灵敏地反映复垦措施对土壤肥力的影响^[3]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,在稳定和保持土壤有机碳方面有重要作用^[4]。因此,复垦土壤团聚体稳定性及有机碳含量已成为衡量复垦区域土壤质量的重要指标^[5]。

目前土壤团聚体稳定性研究以水稳定性团聚体为主,评价指标包括团聚体稳定率(WSAR)^[6]、平均重量直径(MWD)^[7]、几何平均直径(GMD)^[8]、>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)^[9]、团聚体破坏率(PAD)^[10]和不稳定团粒指数(E_{lt})^[5]等。国内外学者针对矿区复垦土壤团聚体影响因素

的研究,主要考虑复垦方式、施肥方式等措施对土壤结构的影响。例如,金永昌等^[11]研究表明合理的复垦方式有利于团聚体有机碳的形成;高健永等^[12]研究复垦土壤团聚体稳定性对施肥的响应发现,施肥处理可显著提高复垦土壤团聚体有机胶结物质含量,施肥处理影响胡敏素含量进而影响土壤机械稳定性团聚体的形成;Liu等^[13]研究表明保护性耕作能增加土壤蓄水量,形成大量发育良好的土壤团聚体,提高土壤结构稳定性。但鲜有研究覆土厚度对煤矸石充填复垦土壤团聚体分布及有机碳含量的影响,对于复垦土壤不同粒级团聚体的有机碳在不同覆土厚度的分布特征还不明确。为了探究复垦区域覆土厚度对土壤团聚体稳定及有机碳贡献率的影响,笔者采用干筛法、湿筛法测定团聚体含量,计算机械稳定性团聚体平均重量直径(DMWD)、机械稳定性团聚体几何平均直径(DGMD)、水稳定性团聚体平均重量直径(WMWD)、水稳定性团聚体几何平均直径(WGMD)、>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$)、团聚体破坏率(PAD)、团聚体稳定率(WSAR)、土壤不稳定团粒指数(E_{lt})等土壤稳定性指标,研究不同覆土厚度下有机碳分布及贡献率特征,剖析覆土厚度对土壤团聚体稳定性参数及各粒级团聚体有机碳贡献率的影响,以期对煤矸石充填复垦土壤的合理利用及可持续发展提供科学依据。

基金项目 国家自然科学基金项目(41572333);平安煤炭开采工程技术研究院有限责任公司项目(HNKY-PG-WT-2021-260);安徽省高等学校自然科学研究项目(KJ2021a0423)。

作者简介 蒋志洋(1996—),男,安徽淮南人,硕士研究生,研究方向:复垦土壤肥力提升。*通信作者,教授,博士,博士生导师,从事矿山生态安全与土壤质量提升研究。

收稿日期 2022-05-27

1 材料与方法

1.1 研究区概况 研究区位于安徽省淮南市潘集矿区,地处淮河中游,淮南市北部,属暖温带季风气候。受季风气候的影响,冬夏长,春秋短,四季分明。年平均气温 14.3~16.1℃,极端最高气温 41.6℃,极端最低气温-22.2℃。年日照时数 2 298 h,年降水量 905.6 mm,年无霜期 215.5 d。研

究区塌陷总面积 3 544 hm²,常年积水面积合计 1 200 hm²,2005 年利用煤矸石为沉陷区充填基质,经机械反复碾压后上覆剥离表土,共治理沉陷区面积约 37.96 hm²。该复垦区域以草地为主,地形较为平缓,经现场调查后按覆土厚度为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 选择样地,修复区域土壤物理、化学性质如表 1 所示。

表 1 复垦区域土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil in reclamation area

| 样地 Sample plot | 容重 Volume-weight g/cm ³ | 总孔隙度 Total porosity % | pH | 含水量 Water content % | 速效氮 Available nitrogen mg/kg | 有效磷 Available phosphorus mg/kg | 速效钾 Available potassium mg/kg | 有机碳 Organic carbon g/kg |
|-------------------|--|--------------------------------|------|------------------------------|---------------------------------------|---|--|----------------------------------|
| 研究区 Study area | 1.51 | 53.84 | 7.79 | 17.47 | 70.92 | 30.39 | 24.70 | 7.13 |
| 对照区 Control area | 1.57 | 52.72 | 7.16 | 18.75 | 82.35 | 26.41 | 21.45 | 8.75 |

1.2 样品采集 采样前用取土钻探测生态修复区域覆土厚度,按覆土厚度为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 选择立地条件相似的 5 个典型样地。同时,在复垦区附近未塌陷区域的农田设采样区作为对照(CK)。在每个样地按“S”型布设 5 个采样点,采样前剔除石块、植物残体、树叶等杂物,每个采样点采集 3 个子样点的表层土壤(0~20 cm)混合均匀组成一个样品,约 1 kg,同时现场拍照并记录采样点的基本信息于装有土样的自封袋上,带回实验室自然风干后,将大土块按自然纹理剥离成直径约 1 cm 的小土块作为待测样品。

1.3 土壤团聚体稳定性和有机碳贡献率计算方法 机械稳定性团聚体采用干筛法^[14]测定,称取一定质量的待测土样,放入孔径分别为 3.20、2.00、1.00、0.50、0.25 mm 的套筛中,底层安放无孔底盒,顶部有筛盖。装好土壤后,用人工手筛的方法分离土样,从上部依次取筛,将各级网筛的土样分别称量计重,得到粒径>3.20、>2.00~3.20、>1.00~2.00、>0.50~1.00、>0.25~0.50 和≤0.25 mm 的机械稳定性团聚体质量。

水稳定性团聚体采用湿筛法^[15]测定,根据干筛后的各级团聚体分布比例配成一份 100 g 的混合土样,将 100 g 混合土样放入孔径为 2.000 mm 的筛子中,用蒸馏水浸泡 10 min,以振幅为 3 cm,20~30 次/min 的频率振荡,振荡时土样淹没在水面之下。过筛后取筛上土样称重,即为>2.000 mm 团聚体;再将过筛后的土样采用同样方法过 2.000、1.000、0.500、0.250、0.100、0.053 mm 的筛,分离称重筛上土样,即可得到>2.000、>1.000~2.000、>0.500~1.000、>0.250~0.500、>0.100~0.250、>0.053~0.100、≤0.053 mm 的水稳定性团聚体质量,分离出的土壤团聚体土壤有机碳采用重铬酸钾外热法^[16]测定。

利用干筛法和湿筛法所得的各粒级团聚体数据,计算团聚体平均重量直径(MWD,mm)、几何平均直径(GMD,mm)、>0.25 mm 团聚体含量($R_{0.25}$,%)、团聚体破坏率(PAD,%)、团聚体稳定率(W SAR,%)、土壤不稳定团粒指数(E_{IT} ,%),计算公式如下^[5-10]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \left(X_i \times \frac{M_i}{M_t} \right) \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (M_i \times \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n M_i} \right] \quad (2)$$

$$R_{0.25} = \frac{M_{>0.25}}{M_t} \times 100\% \quad (3)$$

$$PAD = \frac{(DR_{0.25} - WR_{0.25})}{DR_{0.25}} \times 100\% \quad (4)$$

$$E_{IT} = \frac{M_t - M_{>0.25}}{M_t} \times 100\% \quad (5)$$

式中, X_i 为第*i*粒级团聚体的平均直径(mm); M_i 为第*i*粒级团聚体重量(g); M_t 为团聚体总重量(g); $M_{>0.25}$ 为>0.25 mm 团聚体质量(g); $DR_{0.25}$ 为>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%); $WR_{0.25}$ 为>0.25 mm 水稳定性团聚体含量(%)。

各粒级团聚体有机碳对土壤有机碳的贡献率(CR,%)计算公式如下^[17]:

$$CR = (a_i \times b_i) / c \times 100\% \quad (6)$$

式中, a_i 为各粒级团聚体有机碳含量(g/kg); b_i 为不同粒级土壤团聚体含量(%); c 为土壤总有机碳含量(g/kg)。

1.4 数据分析 采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 对试验数据进行统计整理分析,Duncan 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同覆土厚度土壤稳定性团聚体分布特征 从不同覆土厚度下土壤机械稳定性团聚体组成特征(图 1a)可以看出,煤矸石充填复垦会提高>2.00~3.20、>1.00~2.00、>0.50~1.00、>0.25~0.50、≤0.25 mm 土壤机械稳定性团聚体含量,不同覆土厚度下各粒级机械稳定性团聚体组成特征和分布趋势基本一致,随着覆土厚度的增加呈“W”型分布,以>0.25 mm 粒级的机械稳定性团聚体为主,占测试土重的 94.02%~98.34%。不同覆土厚度区土壤中>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量从大到小依次为 60~80 cm > 80~100 cm > 20~40 cm > 0~20 cm > 40~60 cm。复垦土壤的>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量均低于 CK,覆土厚度 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 分别比 CK 减少了 3.24 百分点、3.20 百分点、4.39 百分点、1.23 百分点、1.65 百分点。对照区>3.2 mm 机械稳定性团聚体含量为 83.72%,显著高于复垦区域土壤。覆土厚度为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的土壤>2.00~3.20 mm 土壤机械稳定性团聚体含量均高于 CK,分别比 CK 增加了 5.11 百分点、2.82 百分点、5.37 百分点、

0.17 百分点、1.66 百分点; >1.00~2.00 mm 土壤机械稳定性团聚体含量分别为 9.95%、9.53%、13.17%、5.69%、8.73%; >0.50~1.00 mm 土壤机械稳定性团聚体含量分别是 CK 的 2.196、2.412、3.904、1.456、2.436 倍; >0.25~0.50、≤0.25 mm 土壤机械稳定性团聚体含量也明显高于 CK。

从不同覆土厚度下土壤水稳定性团聚体组成特征(图 1b)可以看出,测定的各粒级土壤水稳定性团聚体中>2.000 和 ≤0.053 mm 粒级含量比例较大,其次是>0.250~2.000 mm 的小团聚体。水稳定性团聚体与机械稳定性团聚体相比,>0.250 mm 粒径的团聚体含量明显减少,变化幅度为 27.99%~41.93%。对比图 1a 和图 1b 发现,>2.000 mm 粒级的大团聚体在水稳定性团聚体比在机械稳定性团聚体中所

占比例低,在覆土厚度 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的含量分别为 53.16%、53.33%、40.62%、60.16%、28.48%。充填复垦区不同覆土厚度下的土壤水稳定性团聚体含量与对照区相比,除>2.000 和 ≤0.053 mm 团聚体外,其余粒级团聚体含量均高于 CK。>2.000 mm 粒级的土壤水稳定性团聚体含量从大到小依次为 40~60 cm > 60~80 cm > 0~20 cm > 20~40 cm > 80~100 cm; >0.250~2.000 mm 的小团聚体含量最高的是 0~20 cm,为 42.66%,比 20~40 cm 高出 13.44 百分点;微团聚体(>0.053~0.250 mm)在覆土厚度 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的含量分别为 12.66%、17.72%、12.24%、8.89%、10.99%、5.54%;在复垦区域各覆土厚度下,60~80 cm 的粉-黏团聚体(≤0.053 mm)含量最高。

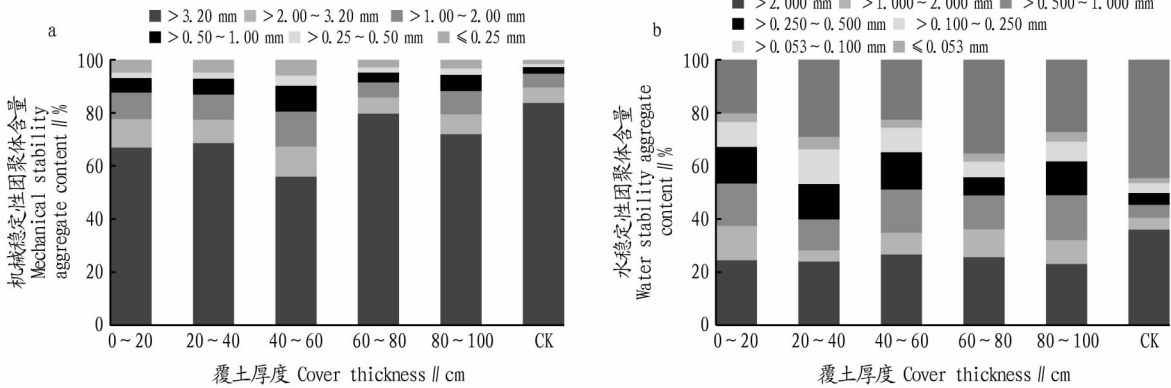


图 1 不同覆土厚度土壤机械稳定性团聚体(a)和水稳定性团聚体(b)组成特征

Fig. 1 Composition characteristics of soil mechanical stability aggregates(a) and water stability aggregates(b) with different soil cover thickness

2.2 不同覆土厚度土壤团聚体稳定性参数分布 由图 2 可知,在 0~100 cm 的覆土厚度下 DMWD、DGMD、WMWD、WGMD 分布特征大致趋势相同,即 DMWD > DGMD > WMWD > WGMD,且复垦区域的 DMWD、DGMD、WMWD、WGMD 中仅在 60~80 cm 的覆土厚度下 WMWD 和 WGMD 大于对照组,在 80~100 cm 的覆土厚度下 WGMD 大于对照组,其余均小于对照组。在 0~100 cm 的覆土厚度下土壤机械稳定性和水稳定性团聚体平均重量直径、几何平均直径随着覆土厚度的增加呈先减少后增加再减少的趋势。覆土厚度为 60~80 cm 的复垦土壤机械稳定性和水稳定性团聚体平均重量直径、几何平均直径均大于其他覆土厚度,其次是 80~100 cm,与未

塌陷区域相似。而覆土厚度为 40~60 cm 除水稳定性团聚体几何平均直径(DGMD)比 20~40 cm 覆土厚度高,机械稳定性团聚体平均重量直径(DMWD)、机械稳定性几何平均直径(DGMD)、水稳定性团聚体平均重量直径(WMWD)都为复垦区域最小。PAD 在 22.01%~43.04%,覆土厚度 60~80 cm 的样地最低,为 22.01%。直径>0.25 mm 水稳定性团聚体含量($R_{0.25}$)从高低依次为 0~20 cm > 40~60 cm > 80~100 cm > 60~80 cm > 20~40 cm。土壤不稳定团粒指数(E_{LT})最小为 0~20 cm,分别比 20~40、40~60、60~80、80~100 cm 降低了 13.94 百分点、2.02 百分点、11.45 百分点、5.46 百分点。覆土厚度在 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的 WSAR

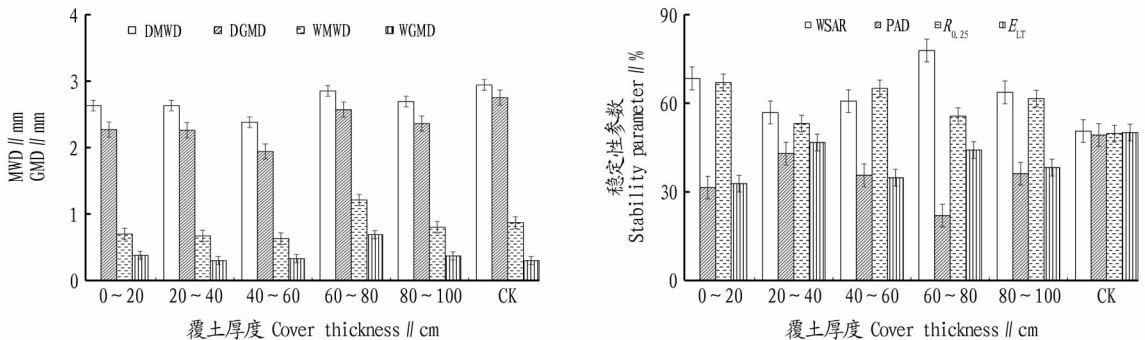


图 2 不同覆土厚度稳定性参数

Fig. 2 Stability parameters of different cover thickness

分别为 68.5%、56.99%、60.82%、77.98%、63.79%，较对照区低 17.84 百分点、6.33 百分点、10.16 百分点、27.32 百分点、13.13 百分点；与对照区相比，复垦土壤 $R_{0.25}$ 较高，PAD、 E_{LT} 较低。

2.3 不同覆土厚度土壤团聚体有机碳含量及贡献率特征 由表 2 可知，覆土厚度为 0~20 cm 的样地 >0.100~0.250 mm 粒级团聚体有机碳含量最高，>0.500~1.000 mm 粒级团聚体有机碳含量最低。而在覆土厚度为 20~40 cm 时，>0.053~0.100 mm 粒级的团聚体有机碳含量最高，比粒级 >2.000、>1.000~2.000、0.500~1.000、>0.250~0.500、>0.100~0.250 mm 的团聚体分别高出了 2.04、1.70、2.18、0.38、0.59 g/kg。覆土厚度 40~60、60~80 cm 有机碳含量最高的团聚体粒级分别为 >2.000、>1.000~2.000 mm。在 80~100 cm 覆土厚度下，>0.053~0.100、>0.250~0.500 mm 粒级团聚体有机碳含量较高，分别为 5.06、5.03 g/kg。在同一粒

级下，随着覆土厚度的增加，团聚体有机碳含量呈先增加后减少的趋势。具体表现：覆土厚度 60~80 cm 的 >2.000、>1.000~2.000 mm 粒级团聚体有机碳含量较高，分别为 7.83、7.91 g/kg，均显著高于其他覆土厚度 ($P<0.05$)。在 >0.500~1.000 mm 粒级团聚体中，有机碳含量从高到低依次为 40~60 cm>60~80 cm>80~100 cm>20~40 cm>0~20 cm。在 >0.250~0.500 mm 土壤团聚体中覆土厚度 40~60 cm 的样地有机碳含量最高，分别是 0~20、20~40、60~80、80~100 cm 的 1.55、1.12、1.04、1.24 倍。>0.100~0.250 mm 粒级团聚体有机碳含量最高值出现在覆土厚度 40~60 cm，显著高于其他覆土厚度处理 ($P<0.05$)。>0.053~0.100 mm 粒级团聚体有机碳含量最高值出现在覆土厚度 40~60 cm，显著高于覆土 0~20、60~80、80~100 cm ($P<0.05$)，但与 20~40 cm 覆土厚度下的团聚体有机碳含量差异不显著 ($P>0.05$)。

表 2 不同覆土厚度各粒级土壤团聚体的有机碳含量

Table 2 Organic carbon content of soil aggregates of different particle sizes with different cover thickness

| 覆土厚度 Cover thickness/cm | 有机碳含量 Organic carbon content/g/kg | | | | | |
|----------------------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | >2.000 mm | >1.000~2.000 mm | >0.500~1.000 mm | >0.250~0.500 mm | >0.100~0.250 mm | >0.053~0.100 mm |
| 0~20 | 3.98 c | 3.69 d | 2.97 e | 4.01 e | 4.23 d | 4.19 d |
| 20~40 | 3.88 c | 4.22 c | 3.74 d | 5.54 c | 5.33 b | 5.92 a |
| 40~60 | 7.12 b | 6.03 b | 5.79 a | 6.22 a | 5.95 a | 5.97 a |
| 60~80 | 7.83 a | 7.91 a | 5.45 b | 5.97 b | 5.51 b | 5.52 b |
| 80~100 | 3.84 c | 4.23 c | 4.21 c | 5.03 d | 4.78 c | 5.06 c |

注：同列不同小写字母为不同覆土厚度间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences between different soil cover thicknesses ($P<0.05$).

各粒级土壤团聚体对土壤有机碳的贡献率如表 3 所示，随着覆土厚度的不同，表现出的规律也有所不同。具体表现：覆土厚度在 0~40 cm， ≤ 0.053 mm 粒级对土壤有机碳的贡献率最高；在 40~60、80~100 cm 覆土厚度下，>0.250~2.000 mm 粒级土壤团聚体的有机碳贡献率最高，分别为 36.12%、35.45%；在覆土厚度 60~80 cm 的样地，粒级为 >0.053 mm 土壤团聚体的有机碳贡献率随着粒径的减小而降低。在 >2.000、>0.250~2.000 mm 粒级土壤团聚体中，有机碳贡献率随着覆土厚度的增加呈现出先减少后增加再减少的趋势；>0.053~0.250 mm 粒级的土壤团聚体有机碳贡献率随覆土厚度的增加呈“N”型分布；而对于 ≤ 0.053 mm 粒级的土壤团聚体，不同覆土厚度下的有机碳贡献率呈“V”型分布，最小值出现在覆土厚度为 60~80 cm 处。

表 3 不同覆土厚度各粒级土壤团聚体的有机碳贡献率

Table 3 Organic carbon contribution rate of soil aggregates of different particle sizes with different soil cover thickness

| 覆土厚度 Cover thickness/cm | 有机碳贡献率 Organic carbon contribution rate/% | | | |
|----------------------------|---|-----------------|-----------------|-----------------|
| | >2.000 mm | >0.250~2.000 mm | >0.053~0.250 mm | ≤ 0.053 mm |
| 0~20 | 19.98 | 30.80 | 10.95 | 38.27 |
| 20~40 | 18.33 | 26.65 | 19.14 | 35.89 |
| 40~60 | 29.71 | 36.12 | 11.41 | 22.77 |
| 60~80 | 39.50 | 38.10 | 9.65 | 12.75 |
| 80~100 | 18.20 | 35.45 | 10.97 | 35.37 |

3 讨论

3.1 覆土厚度对土壤团聚体组成及稳定性的影响 以煤矸石充填方式复垦矿区，提高矿区土地生产力的同时，对土壤

的剧烈扰动，明显改变了土壤的水、气、养分平衡。在该研究中，不同覆土厚度下各粒级机械稳定性团聚体分布趋势基本一致，整体呈“W”型，以 >0.25 mm 粒级的团聚体为主，占测试土重的 94.02%~98.34%，这与王英俊等^[18]的研究结果类似。煤矸石充填复垦土壤的 >0.25 mm 粒级的机械稳定性团聚体含量均低于 CK，覆土厚度 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 分别比 CK 减少了 3.24 百分点、3.20 百分点、4.39 百分点、1.23 百分点、1.65 百分点。说明在煤炭开采过程中，采煤扰动引起的地表塌陷会降低团聚体稳定性，而客土覆盖能够明显改善土壤团聚体结构。经研究， $R_{0.25}$ 最高的是覆土厚度 0~20 cm 样地，主要原因是表层土壤中有大多植物残体成分，为微生物维持生命活动提供充足的能量，从而增强了表层土壤的微生物活性，进而有利于各粒径团聚体内部的结合^[5]。由于机械稳定性团聚体包含了水稳定性及非水稳定性团聚体^[19]，其在不同覆土厚度下的分布规律与水稳定性团聚体有所不同，在水稳定性团聚体中， $R_{0.25}$ 在覆土厚度 0~20 cm 的地块最高。不同覆土厚度下的土壤水稳定性团聚体含量与对照区相比，除 >2.000 mm 和 ≤ 0.053 mm 团聚体外，其余粒级团聚体含量均高于 CK，说明复垦区域大团聚体的减少未使粉-黏团聚体含量增加，而是增加了 >0.053~2.000 mm 粒级团聚体含量。

团聚体平均重量直径 (MWD)、几何平均直径 (GMD)、>0.25 mm 团聚体含量 ($R_{0.25}$)、团聚体稳定率 (WSAR)、团聚体破坏率 (PAD)、土壤不稳定团粒指数 (E_{LT}) 是衡量土壤团聚体稳定性的重要指标，其中 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 、WSAR 越大，

PAD、 E_{1T} 越小表示团聚体稳定性越强,土壤结构越好^[20]。充填复垦覆土厚度的不同不仅会影响土壤团聚体分布,还关系着土壤团聚体稳定性。在该研究中,覆土厚度 60~80 cm 的 WSAR 最高,PAD 最低。而覆土厚度 0~20 cm 的地块 $R_{0.25}$ 最大、 E_{1T} 最小。其原因是因为地表有植物凋落物,减少雨水对土壤的冲刷作用,这些有机残留物会增强微生物活动,产生的根系分泌物和酶可以提高土壤团聚体稳定性^[21]。通常机械稳定性团聚体的平均重量直径、几何平均直径均大于水稳定性团聚体^[22],该研究中不同覆土厚度的机械稳定性团聚体平均重量直径含量最高,水稳定性团聚体几何平均直径最低,也证明了此结论。

3.2 覆土厚度对土壤团聚体有机碳的影响 煤矸石作为充填复垦基质,本身含碳 20%~30%,对土壤有机碳含量有所影响。在该研究中,>2.000 mm 粒径有机碳含量在覆土厚度 60~80 cm 区域含量最高;>0.500~1.000、>0.250~0.500、>0.100~0.250、>0.053~0.100 mm 粒级有机碳含量均在覆土厚度 40~60 cm 区域含量最高。不同覆土厚度的土壤团聚体有机碳含量随着粒径的减小没有呈现出规律性,这可能是复垦土壤团聚体有机碳含量受覆土厚度、植被类型影响的结果^[23],不同覆土厚度土壤理化性质的不同和不同植被类型的凋落物碳含量及根系等都会对土壤团聚体有机碳含量产生影响。从不同粒径土壤团聚体来看,有机碳含量也表现出不同的变化特征,在同一粒级下,随着覆土厚度的增加,团聚体有机碳含量呈先增加后减少的趋势,原因在于样地土壤偏碱性,抑制微生物活动^[24],而在覆土厚度较薄时煤矸石层的碳含量可能也会增加表层土壤含量。

各粒级土壤团聚体对土壤有机碳的贡献率随着覆土厚度的不同表现出的规律也有所不同。该研究结果表明,在覆土厚度 0~40 cm 的区域,复垦土壤的主要来源为粉-黏团聚体(≤ 0.053 mm),这是由于覆土厚度较薄的区域经长时间的耕作扰动,含有较高有机碳含量的大团聚体减少,而有机碳含量较低的微团聚体开始增加^[25]。覆土厚度的加深使得土壤粉-黏团聚体(≤ 0.053 mm)向小团聚体转变(>0.250~2.000 mm),故在 40~60、80~100 cm 覆土厚度下,>0.250~2.000 mm 粒级土壤团聚体的有机碳贡献率最高,分别为 36.12%、35.45%。在覆土厚度 60~80 cm 的样地,虽大团聚体有机碳含量并不是最高,但大团聚体(>2.000 mm)有机碳对土壤总有机碳的贡献最大,是因为矿区土壤复垦后新增的有机物质先出现在大团聚体中,使得大团聚体中有机碳贡献率提高。

4 结论

煤矸石充填复垦会提高>2.00~3.20、>1.00~2.00、>0.50~1.00、>0.25~0.50、 ≤ 0.25 mm 土壤团聚体含量,不同覆土厚度下各粒级土壤团聚体组成特征基本相似,通过改变一定范围的覆土厚度,可以有效地改善土壤结构。在该研究中,不同覆土厚度下各粒级机械稳定性团聚体分布趋势基本一致,以>0.25 mm 粒级的团聚体为主。煤矸石充填复垦土壤的>0.25 mm 粒级的机械稳定性团聚体含量均低于 CK,水稳定性团聚体与机械稳定性团聚体相比,>0.25 mm 粒径

的团聚体含量明显减少。覆土厚度为 60~80 cm 的土壤机械稳定性和水稳定性团聚体平均重量直径、几何平均直径均大于其他覆土厚度,团聚体稳定率(W SAR)最高,团聚体破坏率(PAD)最低。覆土厚度 0~20 cm 的地块>0.25 mm 水稳定性团聚体含量($R_{0.25}$)最大、土壤团聚体团粒指数(E_{1T})最小。在同一粒级下,随着覆土厚度的增加,团聚体有机碳含量呈先增加后减少的趋势。在覆土厚度 60~80 cm 的样地,虽然大团聚体有机碳含量并不是最高,但大团聚体(>2.00 mm)有机碳对土壤总有机碳的贡献最大,覆土厚度 60~80 cm 的区域土壤环境最优。

参考文献

- [1] LAL R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] 于亚军,任珊珊,郭李凯,等.两种利用类型煤矸山复垦重构土壤贮水特性研究[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(2): 44-48.
- [3] 张宇婕,于亚军.不同复垦年限煤矸山重构土壤有机碳及其组分差异[J]. *土壤*, 2019, 51(4): 732-738.
- [4] 任荣秀,杜章留,孙义亨,等.华北低丘山地不同土地利用方式下土壤团聚体及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(19): 6991-6999.
- [5] 胡尧,李懿,侯雨乐.不同土地利用方式对岷江流域土壤团聚体稳定性及有机碳的影响[J]. *水土保持研究*, 2018, 25(4): 22-29.
- [6] 张玉铭,胡春胜,陈素英,等.耕作与秸秆还田方式对碳氮在土壤团聚体中分布的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(9): 1558-1570.
- [7] 李鉴霖,长江胜,郝庆菊.土地利用方式对缙云山土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2014, 35(12): 4695-4704.
- [8] 胡旭凯,陈居田,朱利霞,等.干湿交替对土壤团聚体特征的影响[J]. *中国农业科技导报*, 2021, 23(2): 141-149.
- [9] 刘武江,赵燧柯,段青松,等.不同播种方式草本植物土壤团聚体特征及对根系固土力的影响[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 25-31, 38.
- [10] 张琦,王淑兰,王浩,等.深松与免耕频次对黄土旱塬春玉米田土壤团聚体与土壤碳库的影响[J]. *中国农业科学*, 2020, 53(14): 2840-2851.
- [11] 金永昌,刘美英,刘金善,等.复垦模式对采煤沉陷区土壤团聚体有机碳分布特征的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(11): 105-109.
- [12] 高健永,王楚涵,张慧芳,等.复垦土壤团聚体稳定性和胶结物质对不同施肥的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(4): 1042-1050.
- [13] LIU Z, CAO S L, SUN Z H, et al. Tillage effects on soil properties and crop yield after land reclamation[J]. *Scientific reports*, 2021, 11(1): 1-12.
- [14] TOPPS D, KHABIR M I U, ABDELMAJID H, et al. Impact of cover crop monocultures and mixtures on organic carbon contents of soil aggregates[J]. *Soil systems*, 2021, 5(3): 1-10.
- [15] SCHUBERT H. Wet classification and wet screening of fine particles[J]. *Particulate science and technology*, 1983, 1(4): 393-408.
- [16] 李聪,吕晶花,陆梅,等.天山自然保护区典型植被土壤碳氮储量变化特征[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3531-3542.
- [17] 邓华,高明,龙翼,等.生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2021, 42(11): 5481-5490.
- [18] 王英俊,李同川,张道勇,等.间作白三叶对苹果/白三叶复合系统土壤团聚体及团聚体碳含量的影响[J]. *草地学报*, 2013, 21(3): 485-493.
- [19] 季波,时龙,徐金鹏,等.宁夏典型天然草地土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征[J]. *生态学报*, 2021, 41(19): 7669-7678.
- [20] 乔鑫鑫,李乾云,王艳芳,等.豆-麦复种模式对豫西丘陵区土壤团聚体及碳氮含量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(3): 145-153.
- [21] 张艳,刘彦伶,李渝,等.喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1308-1315.
- [22] 李涵韬,余健,方凤满,等.复垦对土壤颗粒组成、分形维数、团聚体影响[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(8): 11-16.
- [23] FENG H B, ZHOU J W, ZHOU A G, et al. Grassland ecological restoration based on the relationship between vegetation and its below-ground habitat analysis in steppe coal mine area[J/OL]. *Science of the total environment*, 2021, 778 [2022-01-15]. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146221>.
- [24] 王志媛,谢江波,王玉刚,等.盐碱土土壤无机 CO₂ 通量与土壤盐碱属性的关系[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(10): 2552-2558.
- [25] GAO L L, BECKER E, LIANG G P, et al. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon[J]. *Geoderma*, 2017, 288: 97-104.