

煤矿复垦排土场裂缝区土壤团聚体分布及稳定性

李叶鑫^{1,2}, 吕刚^{2*}, 王道涵², 魏忠平³

(1.沈阳工业大学 建筑与土木工程学院, 沈阳 110870; 2.辽宁工程技术大学
环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 3.辽宁省林业科学研究所, 沈阳 110032)

摘要:【目的】揭示排土场土壤团聚体分布特征。【方法】在北方草原区露天煤矿复垦排土场选取典型复垦样地, 调查土体裂缝(GF)发育特征, 采用干筛法和湿筛法测定土壤团聚体组成与分布特征, 分析团聚体稳定性及其与土体裂缝的关系。【结果】各个土体裂缝>0.25 mm 风干土团聚体量为 23.02%~42.70%, 水稳性团聚体量为 16.9%~29.52%, 表现为各裂缝之间无显著差异, GF I、GF II、GF III 裂缝 0~60 cm 土层>0.25 mm 水稳性团聚体量依次为 25.26%、26.57%、23.62%; 3 个裂缝土壤团聚体结构破坏率分别为 20.77%~36.17%、20.52%~25.00%、26.58%~40.56%, GF III 裂缝显著大于 GF I 裂缝和 GF II 裂缝; 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土壤团聚体结构破坏率依次为 28.81%、29.96%、26.19%、23.50%、24.91%、29.38%; GF I、GF II、GF III 裂缝土壤风干土团聚体分形维数为 2.847~2.919, 土壤水稳性团聚体分形维数为 2.898~2.942, 团聚体以小团聚体或细小颗粒为主; 3 个裂缝风干土团聚体的平均重量直径(MWD)分别为 1.11、1.05、1.28 mm, 几何平均直径(GWD)分别为 0.45、0.44、0.49 mm, 水稳性团聚体的 MWD 依次为 0.67、0.73、0.72 mm, GMD 依次为 0.36、0.38、0.37 mm, GF II 裂缝土壤具有较好的土壤结构和土壤稳定性, 土壤抗侵蚀能力较强; 大部分土层土壤水稳性团聚体处于不稳定水平, 这与裂缝的形成与发育有关。【结论】土体裂缝的形成与发育会降低土壤团聚体稳定性, 导致团聚体分散成为颗粒较小的团聚体及颗粒, 且裂缝宽度越大、裂缝发育越明显, 对团聚体稳定性影响越显著。

关键词: 排土场; 土壤团聚体; 土体裂缝; 团聚体稳定性; 分形

中图分类号: S157

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2021419

OSID:



李叶鑫, 吕刚, 王道涵, 等. 煤矿复垦排土场裂缝区土壤团聚体分布及稳定性[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 104-110, 134.
LI Yexin, LYU Gang, WANG Daohan, et al. Distribution and Stability of Soil Aggregates over the Fissure Zones in Reclaimed Coal Mining Waste Dumpsite[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 104-110, 134.

0 引言

【研究意义】煤炭是我国的主要能源, 也是重要的工业原料。2018 年全国煤炭消费总量 27.4 亿 t 标准煤, 占全国一次能源消费总量的 59%, 预测 2025 年中国能源消费总需求为 55 亿~56 亿 t 标准煤, 为我国全面建成小康社会、实现“两个百年”奋斗目标和中华民族伟大复兴的中国梦提供能源保障^[1]。煤炭资源的开采不仅能够带来经济的快速发展, 也会产生严重的生态环境问题, 其中以露天开采最为严重。我国大型煤矿多位于干旱半干旱地区的内蒙古高原、黄土高原及沙漠化地带^[2], 生态环境极其脆弱, 其中大规模的露天开采活动会破坏当地的生态系统, 形成不同的地貌单元, 改变矿区及其周围的土壤理化性质和水

文平衡^[3]。排土场是在露天开采过程中形成的平台-边坡相间的阶梯宝塔状巨型人工松散堆积体, 作为矿区的一种典型地貌单元, 具有坡度陡、坡长长的松散坡面和岩土压实的平台、物质组成复杂、孔隙发达、沉降不均匀等特性^[4], 其生态环境恶劣, 降水量少且分布不均匀、蒸发量大, 不利于植被的自然恢复。目前, 土地复垦与人工植被构建是生态恢复的主要措施, 也是最有效的恢复方法之一, 其可通过整治改造使丧失的生产能力重新得到利用, 有效地恢复受损的生态系统, 从而提高生态系统的稳定性、防治水土流失、增强土壤水源涵养功能, 被广泛应用于矿区生态修复^[5]。然而, 排土场土地复垦与植被恢复后仍然存在较多的生态环境问题。由于排土场塌陷(塌陷盆地、塌陷坑)、冒落、沉陷、土体裂缝(Ground fissure, GF)等地质灾害的发生, 不仅改变排土场下垫面地形地貌, 而且还能诱发潜蚀、管涌、崩塌、滑坡等水土流失次生灾害^[6]。因此, 露天煤矿排土场的治理对于该区域的生态安全以及绿色矿山建设具有重要意义。

【研究进展】土壤团聚体是土壤结构的基本单元, 是土壤中各种活动过程形成的基本结构单位^[7], 在评

收稿日期: 2021-09-01 修回日期: 2023-03-02 网络出版日期: 2023-05-05
基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC1503105); 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC2007046); 辽宁工程技术大学双一流学科创新团队建设资助项目(LNTU20TD-24)
作者简介: 李叶鑫(1989-), 男, 辽宁阜新。讲师, 博士, 主要从事矿山生态修复。E-mail: liyexin2008@126.com
通信作者: 吕刚(1979-), 男, 吉林九台人。副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀与土壤水文学的教学和科研工作。E-mail: lvgang2637@126.com
©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

价土壤肥力和影响土壤侵蚀等方面具有重要意义^[8-9]。通常利用土壤大团聚体量、土壤平均质量直径、几何平均直径以及分形维数等指标来评价土壤团聚体稳定性^[10]。复垦排土场是一种典型的重构土体,经开挖、排弃、碾压、复垦等工艺使得土壤团聚体遭到破坏,容易诱发严重的水土流失^[11]。目前,已有一些学者开展了排土场土壤团聚体的相关研究。刘美英等^[12]采用土壤团聚体稳定率、土壤团聚体结构破坏率、不稳定团粒指数评价采煤沉陷复垦区土壤水稳性团聚体的稳定性。王凯等^[13]研究恢复年限、坡位、坡向对排土场土壤团聚体稳定性及分形维数的影响。刘鸿涛等^[14]研究了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,指出风化煤和砒砂岩的添加可以改善排土场土壤团聚体及其土壤质地。【切入点】尽管目前对排土场土壤团聚体的研究取得一定的成果,但对于复垦排土场土壤团聚体内部状况及其稳定性等方面的研究不够深入,对于排土场土壤团聚体稳定性与土体裂缝的关系研究鲜见报道。排土场土体裂缝的出现会破坏土体连续性和完整性,改变土壤结构,尤其是土体裂缝区域及其附近复垦土壤,影响排土场水分入渗、地表径流及产流产沙等多个水土流失过程。因此,研究排土场土体裂缝区土壤团聚体分布特征、稳定性及其与土体裂缝的关系对排土场植被恢复与重建具有重要意义。【拟解决的关键问题】基于此,本文以北方草原区露天煤矿排土场为研究对象,分析土体裂缝区土壤团聚体量、分布特征及分形特征,揭示土壤团聚体稳定性随土层深度的变化规律,以期排土场水土流失防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古锡林郭勒盟锡林浩特市大唐国际胜利东二号露天煤矿南排土场,东经 116°06′—116°14′,北纬 44°02′—44°07′,根据《土地复垦质量控制标准》(TD/T1036—2013)^[15],研究区属于北方草

原区。该排土场位于矿区的东南部,总面积 13.66 km²,属中温带干旱半干旱气候,年均气温 1.7℃,年均降水量 284.74 mm,主要集中在 6—8 月,占全年降水量的 71%以上,暴雨多发生在此 3 个月内,7 月中旬到 8 月中旬则更是暴雨集中频发时段,多年平均 24 h 最大降水量为 46.8 mm。年平均蒸发量 1 794.6 mm,年均风速 3.4 m/s,冻结期为 10 月初—12 月上旬,解冻期为 3 月末—4 月中旬,最大冻土深度 2.89 m,土壤为典型栗钙土。露天矿剥离采用单斗-卡车工艺,排土场采用履带推土机排土。排土场位于采区南侧,使用年限为 20 a,排土场总排弃高度、台阶高度、平台宽度依次为 100、25、20 m,排土场容量为 592×10⁶ m³,最终松散系数为 1.15。为尽快恢复排土场的植被,平台和边坡复垦采取覆土措施(土壤质地为砂质壤土),平台覆土厚度约为 1 m,边坡覆土厚度约为 0.5 m,复垦植被有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙柳(*Salix psammophila*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、沙打旺(*Astragalus adsurgens*)、草木樨(*Melilotus officinalis*)等灌木或草本。

1.2 研究方法

本试验于 2017 年 8 月全面调查排土场 1105 平盘(复垦年限为 5 a)土体裂缝分布特征,测定每条土体裂缝的长度、宽度和深度,利用数理统计原理从中选取 3 条典型土体裂缝(GF I、GF II、GF III)作为研究对象,3 条土体裂缝位于排土场平台前缘且相互之间无影响(图 1),土体裂缝长度、宽度、深度以及距排土场坡肩的距离详见表 1。

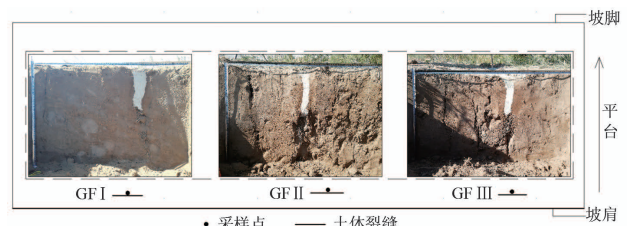


图 1 采样点位置示意

Fig.1 Location of sampling points

表 1 排土场土壤物理性质

Table 1 Soil physical properties in the dump

裂缝	裂缝长度/m	裂缝宽度/cm	裂缝深度/cm	与坡肩的距离/m	0~60 cm 土层土壤物理性质变化范围				
					砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤含水率/%	土壤体积质量/(g cm ⁻³)
GF I	3.21	9.85±3.48a	29.00	1.25	70.24~76.58	10.25~16.54	8.78~14.63	4.14~6.36	1.30~1.41
GF II	3.54	2.86±0.84c	30.67	1.74	70.39~78.62	12.05~17.64	6.72~13.53	4.29~7.16	1.22~1.45
GF III	2.98	5.77±2.76b	28.67	1.53	69.58~74.35	13.58~16.13	10.31~14.85	4.89~7.42	1.26~1.43

注 表中数据为平均值±标准差。不同小写字母表示不同土体裂缝之间差异显著($P<0.05$)。

在每条土体裂缝上布设 1 个土壤剖面,该剖面位于沿土体裂缝法线方向、距离裂缝 10 cm 处,按照 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土层深度处分别采集土壤样品,以测定土壤物理性质(表 1)和不同径级土壤团聚体量。土壤团聚体采用

H.H.萨维诺夫法测定,即采用干筛法和湿筛法分别测定土壤团聚体特征,土壤筛孔径为 10、7、5、3、2、1、0.5、0.25 mm(干筛法)和 5、3、2、1、0.5、0.25 mm(湿筛法),称质量并计算各级团聚体占土样总量的百分率,计算>0.25 mm 团聚体量($R_{>0.25}$)^[16]、

土壤团聚体结构破坏率 (PAD)^[17]、分形维数 (D)^[18]、平均重量直径 (MWD)^[19]和几何平均直径 (GWD)^[19], 各个指标计算式为:

$$R_{>0.25} = \frac{>0.25 \text{ mm 土壤团聚体质量}}{\text{未筛前土壤总质量}} \times 100\%, \quad (1)$$

$$PAG = \frac{R_{>0.25 \text{ mm 干筛}} - R_{>0.25 \text{ mm 湿筛}}}{R_{>0.25 \text{ mm 干筛}}} \times 100\%, \quad (2)$$

$$D = 3 - \frac{\lg(M_i/M_0)}{\lg(d_i/d_{\max})}, \quad (3)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n (w_i x_i), \quad (4)$$

$$GWD = \exp\left(\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln x_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}\right), \quad (5)$$

式中: M_i 为土粒直径 $< d$ 累计的质量 (g); M_0 为全部粒径土粒质量 (g); d_i 为第 i 粒级团聚体直径 (mm); $d_{\max}$ 为最大粒径土粒的平均直径 (mm); w_i 为第 i 粒级团聚体质量百分数 (%); x_i 为相邻两级团聚体的平均粒径 (mm); W_i 为土壤不同粒级团聚体的质量 (g)。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体量

土壤团聚体是土壤重要的组成部分, 其分布特征会影响土壤孔隙结构、土壤有机质等土壤理化性质及土壤侵蚀过程, 是评价土壤抗蚀性的重要指标^[19]。由表 2 可知, 各个土体裂缝 >0.25 mm 风干土团聚体量较低, 主要集中在 23.02%~42.70%, 平均为 34.64%; 对于 >0.25 mm 风干土团聚体, 各个裂缝团聚体分布较均匀, GFIII 裂缝的 0~10 cm 土层量最高, GFIII 裂缝的 30~40 cm 土层量最低; 不同裂缝 >0.25 mm 风干土团聚体分布特征不同, GF I 裂缝 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土层 >0.25 mm 团聚体量依次为 30.47%、39.11%、37.22%、35.14%、33.91%、31.33%, GF II 裂缝依次为 30.36%、34.76%、34.29%、36.75%、32.71%、38.24%, GFIII 裂缝依次为 42.7%、41.66%、35.12%、23.02%、32.71%、33.95%; 3 个土体裂缝之间 >0.25 mm 风干土团聚体无显著差异 ($P>0.05$), GF I、GF II、GFIII 裂缝 0~60 cm 土层 >0.25 mm 风干土团聚体量依次为 34.53%、34.52%、34.86%。通过湿筛法得土壤水稳性团聚体量可直接反映降水、径流作用下的团聚体水稳定性特征, 各个裂缝 >0.25 mm 水稳性团聚体量明显低于风干土团聚体量, 主要集中在 16.9%~29.52%, 平均为 25.15%, 这是由于土壤大团聚体在降水及地表径流等水分作用下被分散为粒径较小的团聚体, 更容易被侵蚀冲刷。不同裂缝 >0.25 mm 水稳性团聚体分布特征不同, GF I 裂缝 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60

cm 土层 >0.25 mm 水稳性团聚体量依次为 22.20%、24.96%、26.70%、27.84%、25.60%、24.26%, GF II 裂缝依次为 23.66%、26.22%、26.62%、28.24%、26.00%、28.68%, GFIII 裂缝依次为 26.80%、29.52%、25.30%、16.90%、23.00%、20.18%; 3 个土体裂缝之间 >0.25 mm 水稳性团聚体无显著差异 ($P>0.05$), 但显著小于 >0.25 mm 风干土团聚体量, GF I、GF II、GFIII 裂缝 0~60 cm 土层 >0.25 mm 水稳性团聚体量依次为 25.26%、26.57%、23.62%。

2.2 土壤团聚体结构破坏率

土壤团聚体结构破坏率反映了团聚体遇水后的破坏程度, 其数值越大, 破坏越严重, 土壤结构越不稳定^[20]。由图 2 可知, 0~60 cm 土层范围 GF I 裂缝土壤团聚体结构破坏率为 20.77%~36.17%, GF II 裂缝为 20.52%~25.00%, GFIII 裂缝为 26.58%~40.56%, GFIII 裂缝显著大于 GF I 裂缝和 GF II 裂缝 ($P<0.05$) (20 cm 除外), 说明裂缝形态特征和发育程度会显著影响土壤团聚体稳定性, 土体裂缝在发育、扩张的过程会降低土壤结构, 破坏土壤团聚体, 是稳定的大团聚体在外力作用下分解为细小颗粒或微团聚体, 这与刘美英等^[12]研究结果类似。GFIII 裂缝土壤团聚体遇水后破坏程度最大, 团聚体稳定性最差, 这与风干土和水稳性团聚体研究结果相一致, 而 GF I 裂缝和 GF II 裂缝土壤团聚体相对稳定, 在降水和冲刷条件下不容易被侵蚀。随着土层深度的增加, GF I 裂缝和 GF II 裂缝土壤团聚体结构破坏率表现为先增大后减小最后略有增加的变化趋势, 即 0~30 cm 土层土壤团聚体结构破坏率高于 30~60 cm 土层, 说明裂缝的形成与发育会降低土壤团聚体稳定性, 在雨水作用下容易分散为颗粒较小的团聚体及颗粒, 容易形成水土流失; 同时, 裂缝的出现会造成部分地表径流汇集、积累、储存, 土壤团聚体在水分的浸泡作用下被剥离、流失, 进一步加剧土体裂缝的崩塌、扩张, 为径流贮存提供更大的空间, 2 个过程相互促进, 加剧水土流失。GFIII 裂缝则表现为先减小后增大的变化趋势, 其过程可以用抛物线方程很好的描述, 20~30 cm 和 30~40 cm 土层土壤团聚体结构破坏率为 27.96%和 26.58%; 0~30 cm 土层范围内土壤团聚体结构破坏率呈减小的变化趋势, 但其数值也大于 GF I 裂缝和 GF II 裂缝, 说明该土层土壤团聚体十分不稳定。在 30 cm 土层以下, 3 个裂缝土壤团聚体结构破坏率均呈增加的变化趋势, 这可能是由于地表径流进入深层土壤, 降低土壤团聚体稳定性。对于 3 个裂缝不同土层深度处的团聚体结构破坏率无显著差异 ($P>0.05$), 0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土壤团聚体结构破坏率依次为 28.81%、29.96%、26.19%、23.50%、24.91%、29.38%。

表 2 土壤团聚体量
Table 2 Soil aggregate content

裂缝	土层深度/cm	处理方式	各粒径团聚体量/%						
			>5 mm	5~3 mm	3~2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	>0.25 mm
GF I	0~10	干筛	3.53	2.57	1.35	3.85	9.44	9.73	30.47
		湿筛	1.54	2.04	0.38	2.78	8.80	6.66	22.20
	10~20	干筛	6.05	4.36	2.53	4.96	9.93	11.28	39.11
		湿筛	3.10	2.28	0.94	3.34	9.26	6.04	24.96
	20~30	干筛	6.34	4.10	2.52	4.60	9.49	10.16	37.22
		湿筛	3.86	2.12	1.02	3.32	9.28	7.10	26.70
	30~40	干筛	6.53	3.83	1.87	4.52	8.91	9.47	35.14
		湿筛	5.58	1.96	1.16	3.86	9.66	5.62	27.84
	40~50	干筛	6.69	3.62	1.93	4.49	8.78	8.41	33.91
		湿筛	4.82	2.02	0.74	3.68	9.14	5.20	25.60
	50~60	干筛	6.62	3.52	2.07	4.38	8.65	7.95	31.33
		湿筛	2.68	2.04	0.90	3.50	9.24	5.90	24.26
GF II	0~10	干筛	3.00	2.54	1.38	4.33	9.25	9.87	30.36
		湿筛	1.46	1.64	0.80	3.14	10.62	6.00	23.66
	10~20	干筛	5.64	3.74	1.94	4.91	9.37	9.16	34.76
		湿筛	3.38	2.72	0.98	3.62	9.74	5.78	26.22
	20~30	干筛	5.21	3.58	1.83	4.79	9.38	9.51	34.29
		湿筛	3.60	2.46	1.16	4.14	10.08	5.18	26.62
	30~40	干筛	8.25	3.81	1.83	4.53	9.69	8.66	36.75
		湿筛	7.10	1.62	1.02	3.32	9.40	5.78	28.24
	40~50	干筛	4.46	3.26	1.73	4.29	9.96	9.01	32.71
		湿筛	4.40	1.90	0.68	3.30	9.50	6.22	26.00
	50~60	干筛	7.60	3.31	1.88	10.63	10.02	4.81	38.24
		湿筛	6.06	2.16	1.22	6.34	9.08	3.82	28.68
GFIII	0~10	干筛	9.84	6.74	3.22	6.21	9.38	7.31	42.70
		湿筛	6.32	2.18	1.12	3.38	8.30	5.50	26.80
	10~20	干筛	10.33	5.13	2.74	5.95	9.54	7.98	41.66
		湿筛	7.78	2.18	1.18	3.76	8.86	5.76	29.52
	20~30	干筛	5.30	4.31	2.18	5.36	9.38	8.58	35.12
		湿筛	3.66	1.88	1.42	3.46	8.46	6.42	25.30
	30~40	干筛	2.82	2.53	1.60	4.13	6.67	5.27	23.02
		湿筛	2.08	1.52	0.92	3.24	5.70	3.44	16.90
	40~50	干筛	7.58	4.23	2.34	4.49	7.73	6.35	32.71
		湿筛	4.16	3.10	1.22	2.84	7.60	4.08	23.00
	50~60	干筛	6.89	4.63	2.39	5.41	8.07	6.55	33.95
		湿筛	3.08	1.48	0.68	3.46	6.98	4.50	20.18

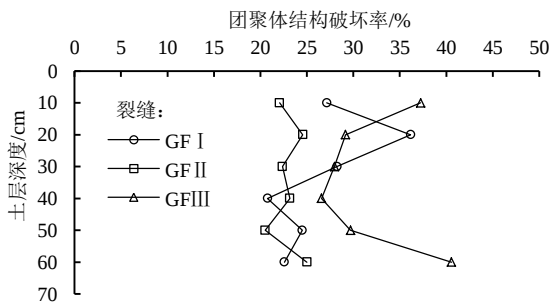


图 2 土壤团聚体结构破坏率

Fig.2 Percentage of aggregate destruction

2.3 土壤团聚体分形维数

土壤分形维数是反映土壤结构几何形状的参数,土壤黏粒量越高,土壤分形维数越大。土壤团聚体的分形维数反映了土壤水稳性团聚体及水稳性大团聚体量对土壤结构与稳定性的影响趋势,即团粒结构粒径分布的分形维数越小,则土壤越具有良好的结构与稳定性^[21]。由图 3 可知,3 个裂缝土壤风干土团聚体分形维数为 2.847~2.919,不同裂缝之间有所不同。GF I 裂缝风干土团聚体分形维数为 2.859~2.892,平均为 2.879,GF II 裂缝风干土团聚体分形维数为 2.85~2.891,平均为 2.876,GF III 裂缝风干土团聚体

分形维数为 2.847~2.919,平均为 2.878,总体表现为 GF I 裂缝>GF III 裂缝>GF II 裂缝,但 3 个裂缝之间的风干土团聚体稳定性无显著差异;由土体裂缝宽度可知,GF I、GF II、GF III 裂缝表层土体裂缝宽度依次为 9.85、2.86、5.77 cm,其变化规律与风干土团聚体稳定性相一致,说明裂缝宽度越大、裂缝发育越明显,土壤团聚体稳定性越差,对团聚体稳定性影响越显著。3 个裂缝土壤水稳性团聚体分形维数为 2.898~2.942,与风干土团聚体分形维数相比有所增大,这主要是由于团聚体遇水后分解为小团聚体或更为细小的土壤颗粒,土壤团聚体稳定性也有所降低。GF I 裂缝水稳性团聚体分形维数为 2.905~2.921,平均为 2.912,GF II 裂缝水稳性团聚体分形维数为 2.898~2.912,平均为 2.907,GF III 裂缝水稳性团聚体分形维数为 2.907~2.942,平均为 2.922,总体表现为 GF III 裂缝>GF I 裂缝>GF II 裂缝,这一变化规律与风干土团聚体分形维数有所不同,这是由于 GF III 裂缝>0.25 mm 风干土团聚体量偏高,遇水后形成较多的细小颗粒,增大土壤分形维数。GF II 裂缝水稳性团聚体分形维数最小,说明在同等降雨或地表径流冲刷条件下,

其土壤团聚体稳定性相对较好, 不易发生水土流失, 这与该裂缝宽度较小关系密切。与风干土团聚体相比, 水稳性团聚体分形维数有所增加, 但其增加幅度较小, GF I、GF II 裂缝和 GFIII 裂缝土壤分形维数的增加量分别为 0.023~0.053、0.02~0.048、0.022~0.068, 增加幅度为 0.8%~1.85%、0.69%~1.68%、0.75%~2.39%, 其中 GFIII 裂缝土壤分形维数的增加幅度最大, 为 1.52%, GF II 裂缝增加幅度最小, 仅为 1.08%, 但总

体上 3 个裂缝土壤分形维数的增大幅度均较小。无论是风干土团聚体还是水稳性团聚体, 3 个裂缝土壤分形维数均较大, 接近 3, 说明土壤团聚体以小团聚体或细小颗粒为主, 这与风干土团聚体和水稳性团聚体的研究结果一致; 水稳性大团聚体量对土壤结构及其稳定性的影响较小, 裂缝区土壤团聚体稳定性较差, 不具有良好的土壤结构与稳定性, 遇水后容易形成细小颗粒。

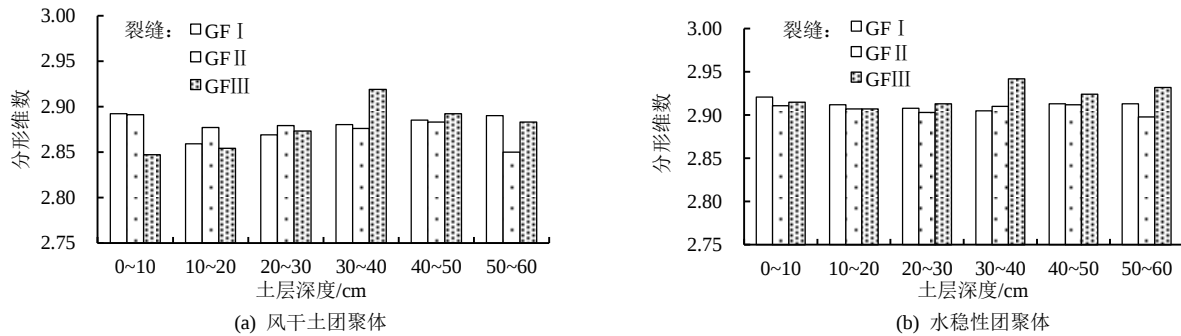


图 3 土壤团聚体分形维数特征

Fig.3 Fractal dimension characteristics of soil aggregates

2.4 土壤团聚体稳定性

土壤团聚体平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GMD) 是评价土壤团聚体稳定性的 2 个重要指标, 受到外界破坏和崩解作用下, 土壤团聚体 MWD 和 GMD 越大, 土壤团聚体稳定性越大, 土壤抗侵蚀能力越强^[22]。由图 4 可知, 土壤团聚体的 MWD 和 GMD 具有相同的变化规律, 0~60 cm 土层范围内 3 个裂缝风干土团聚体的 MWD 和 GMD 均表现为 GFIII 裂缝>GF I 裂缝>GF II 裂缝, 其中 GF I、GF II、GFIII 裂缝风干土团聚体的 MWD 依次为 1.11、1.05、1.28 mm, 风干土团聚体的 GMD 依次为 0.45、0.44、0.49 mm;

3 个裂缝水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 均表现为 GF II 裂缝>GFIII 裂缝>GF I 裂缝, 其中 GF I、GF II、GFIII 裂缝水稳性团聚体的 MWD 依次为 0.67、0.73、0.72 mm, 水稳性团聚体的 GMD 依次为 0.36、0.38、0.37 mm, 均表现为 GF II 裂缝大于 GF I 裂缝和 GF II 裂缝, 说明 GF II 裂缝土壤具有较好的土壤结构和土壤稳定性, 土壤抗侵蚀能力较强, 这与前面的分析结果相一致。表层 0~10 cm 土层的风干土团聚体和水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 均相对较小, 说明表层土壤抗侵蚀性能较差。风干土团聚体的 MWD 和 GMD 均小于水稳性团聚体, 这与前文研究结果一致。

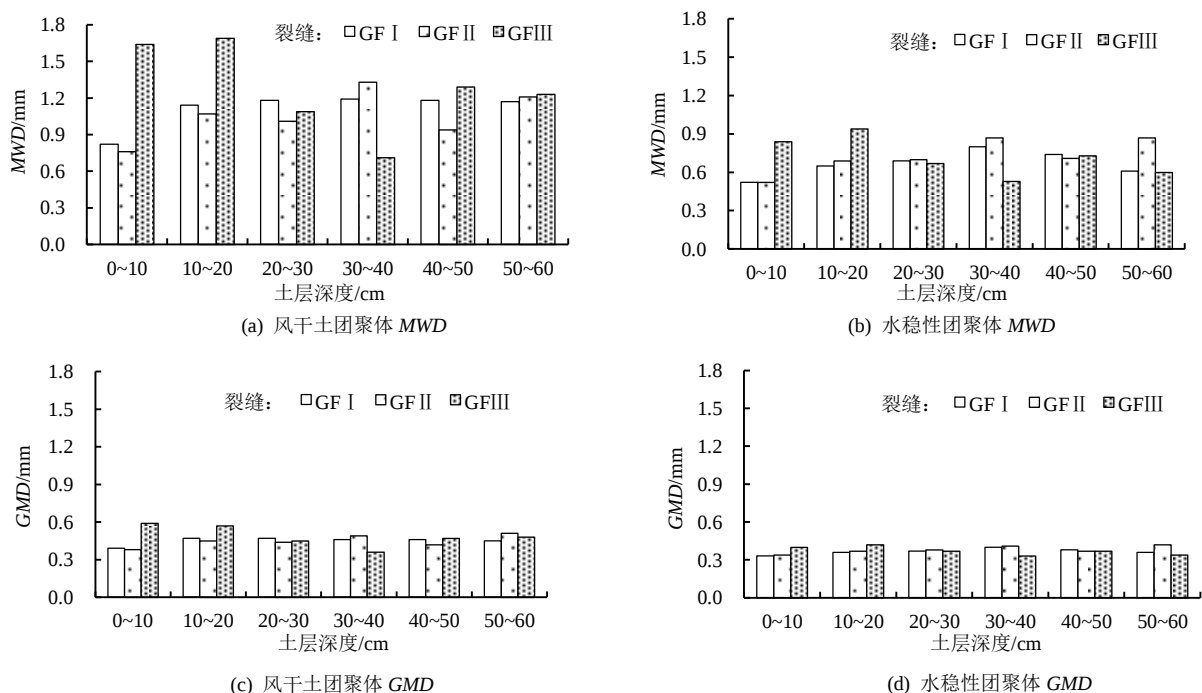


图 4 土壤团聚体稳定性特征

Fig.4 Soil aggregate stability characteristics

根据土壤水稳性团聚体 *MWD* 数值对土壤团聚体稳定性进行分级^[23-24]：极不稳定 ($MWD < 0.4$)，不稳定 ($0.4 \leq MWD < 0.8$)，稳定 ($0.8 \leq MWD < 1.3$)，较稳定 ($1.3 \leq MWD < 2.0$)，极稳定 ($MWD \geq 2.0$)。由图 4 可知，GF I 裂缝 0~10、10~20、20~30、40~50、50~60 cm 土壤水稳性团聚体处于不稳定水平，GF II 裂缝 0~10、10~20、20~30、40~50 cm 土壤水稳性团聚体处于不稳定水平，GF III 裂缝 20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土壤水稳性团聚体处于不稳定水平，GF I 裂缝 30~40 cm、GF II 裂缝 30~40 cm 和 50~60 cm、GF III 裂缝 0~10 cm 和 10~20 cm 土壤水稳性团聚体处于稳定水平，大部分土层土壤水稳性团聚体处于不稳定水平，这与裂缝的形成与发育有关。

3 讨论

排土场是一种典型的矿山工程扰动土，其复垦土壤是由人为方式通过不同重构工艺构成的复杂整体^[25]，在开挖-堆弃-压实-重构等作用下其土壤孔隙度^[26]、土壤体积质量^[27-28]、土壤团聚体^[29]、土壤水文过程^[3]均发生明显改变，土壤团聚体量及其稳定性可以直接反映排土场重构土壤的结构状况和质量，对区域水循环及土壤侵蚀过程具有重要影响。吕刚等^[9]对比分析不同复垦模式条件下团聚体的稳定性。唐骏等^[11]研究了植被恢复对排土场土壤团聚体的影响，分析土壤团聚体指标与有机碳和黏粒量的相关性，提出植被恢复类型和地形对排土场土壤团聚体影响显著。然而，以往研究多以复垦排土场不同植被类型土壤团聚体分布特征为主，并未涉及到塌陷、冒落、沉陷、土体裂缝等作用对土壤团聚体稳定性的影响。土体裂缝的形成与发育不仅改变排土场下垫面微地形，也会降低土壤团聚体稳定性，而土壤团聚体的破碎与分散又进一步加剧土体裂缝扩张，2 个过程相互促进、发展。尽管土体裂缝数量较少、分布集中，但其发生位置多位于排土场平台前缘^[30]，是排土场滑坡或泥石流危害发生的前兆^[31]，对于防治排土场土壤侵蚀具有重要意义^[6]。因此，在今后的研究中可将排土场土体裂缝区域土壤团聚体作为研究对象，监测土体裂缝发育过程与土壤团聚体稳定性的动态变化，明确二者的定量关系，以期露天煤矿排土场土地复垦与水土流失防治提供科学依据。

4 结论

1) 各个土体裂缝 > 0.25 mm 风干土团聚体量较低，其数值为 23.02%~42.70%，且各个裂缝之间无显著差异； > 0.25 mm 水稳性团聚体量明显低于风干土团聚体量。

2) 3 个土体裂缝土壤团聚体结构破坏率较大，0~30 cm 土层土壤团聚体结构破坏率高于 30~60 cm 土层，说明裂缝的形成与发育会降低土壤团聚体稳定性，容易形成严重的水土流失。

3) 土壤风干土团聚体和水稳性团聚体的分形维数均表现为 GF II 裂缝最小，土体裂缝宽度越大、裂缝发育越明显，土壤团聚体稳定性越差；与风干土团聚体相比，水稳性团聚体的分形维数有所增大，这主要是遇水后降低了土壤团聚体稳定性，形成更多的小颗粒。

4) 土壤团聚体的 *MWD* 和 *GMD* 具有相同的变化规律：大部分土层土壤水稳性团聚体处于不稳定水平，这与裂缝的形成与发育有关；GF II 裂缝土壤具有较好的土壤结构和土壤稳定性，土壤抗侵蚀能力较强。

(作者声明本文无实际或潜在的利益冲突)

参考文献：

- [1] 谢和平, 吴立新, 郑德志. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测[J]. 煤炭学报, 2019, 44(7): 1 949-1 960.
XIE Heping, WU Lixin, ZHENG Dezhi. Prediction on the energy consumption and coal demand of China in 2025[J]. Journal of China Coal Society, 2019, 44(7): 1 949-1 960.
- [2] 谷裕, 王金满, 刘慧娟, 等. 干旱半干旱煤矿区土壤含水率研究进展[J]. 灌溉排水学报, 2016, 35(4): 81-86.
GU Yu, WANG Jinman, LIU Huijuan, et al. Advance of soil moisture in arid and semi-arid mining areas[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2016, 35(4): 81-86.
- [3] AHIRWAL J, MAITI S K. Assessment of soil properties of different land uses generated due to surface coal mining activities in tropical Sal (*Shorea robusta*) forest, India[J]. Catena, 2016, 140: 155-163.
- [4] 魏忠义, 白中科. 露天矿大型排土场水蚀控制的径流分散概念及其分散措施[J]. 煤炭学报, 2003, 28(5): 486-490.
WEI Zhongyi, BAI Zhongke. The concept and measures of runoff-dispersing on water erosion control in the large dump of opencast mine[J]. Journal of China Coal Society, 2003, 28(5): 486-490.
- [5] LE HOUEROU H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: A review[J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 2000, 14(1): 3-14.
- [6] 吕刚, 李叶鑫, 宁宝宽, 等. 暴雨作用下排土场平台-边坡系统土壤侵蚀过程模拟研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(5): 1 463-1 476.
LYU Gang, LI Yexin, NING Baokuan, et al. Soil erosion process of platform-slope system of dump under heavy rain[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1 463-1 476.
- [7] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 98-105.
CHEN Lin, WANG Jian, SONG Pengshuai, et al. Effect of rainfall on water stability aggregates of crust soil on slope surface[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 98-105.
- [8] 陆铸畴, 包忻怡, LIU Xiao, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究三峡库区消落带土壤水稳性团聚体稳定性[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(5): 115-120.
LU Zhuchou, BAO Xinyi, LIU Xiao, et al. Stability of soil aggregates in riparian zone of the Three Gorges Reservoir studied using the Le Bissonnais method[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(5): 115-120.
- [9] 吕刚, 肖鹏, 李叶鑫, 等. 海州露天煤矿排土场不同复垦模式下表层土壤团聚体的稳定性[J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(5): 77-84.

- LYU Gang, XIAO Peng, LI Yexin, et al. Stability of topsoil aggregates under different reclamation modes in the dump of Haizhou opencast coal mine[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(5): 77-84.
- [10] 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 Yingchun, WANG Yiquan, 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.
- [11] 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): 5 067-5 077.
- TANG Jun, DANG Tinghui, 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): 5 067-5 077.
- [12] 刘美英, 金永昌, 刘金善, 等. 复垦模式对采煤沉陷复垦区土壤团聚体组成及稳定性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(12): 170-174.
- LIU Meiying, JIN Yongchang, LIU Jinshan, et al. Effect of reclamation method on composition and stability of soil aggregates among reclaimed soil of coal-mining subsidence[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(12): 170-174.
- [13] 王凯, 那恩航, 张亮, 等. 阜新露天煤矿排土场边坡土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 402-410.
- WANG Kai, NA Enhang, ZHANG Liang, et al. Soil aggregates stability and fractal features on dump slopes of opencast coal mine in Fuxin, China[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 402-410.
- [14] 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 Hongtao, ZHENG Jiyong, LI Gaoliang, 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.
- [15] 中华人民共和国国土资源部. 土地复垦质量控制标准: TD/T 1036—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013.
- [16] 肖盛杨, 舒英格. 土地利用方式对喀斯特峡谷区土壤水稳性团聚体的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(4): 73-79.
- XIAO Shengyang, SHU Yingge. The effects of land usage on water-stable soil aggregates in Karst canyon region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(4): 73-79.
- [17] 汪三树, 史东梅, 蒋光毅, 等. 紫色丘陵区坡耕地生物埂的土壤结构稳定性与抗蚀性分析[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6): 31-35, 40.
- WANG Sanshu, SHI Dongmei, JIANG Guangyi, et al. Analysis of soil structure stability and corrosion resistance of slop land bio-bank in purple hilly area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(6): 31-35, 40.
- [18] 韩笑, 余冬立, 王洪德, 等. 滨海土壤团聚体分布和分形维数及其影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(5): 88-92, 113.
- HAN Xiao, SHE Dongli, WANG Hongde, et al. Fractal dimension of coastal soil aggregates and its relationship with physical and chemical soil properties[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(5): 88-92, 113.
- [19] 韩新生, 马璠, 郭永忠, 等. 土地利用方式对表层土壤水稳性团聚体的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32(2): 114-120.
- HAN Xinsheng, MA Fan, GUO Yongzhong, et al. Effects of surface-layer soil water-stable aggregates under land use patterns[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(2): 114-120.
- [20] 李娟, 韩霁昌, 陈超, 等. 黄土高原丘陵沟壑区土地利用方式对土壤团聚体特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 248-253, 259.
- LI Juan, HAN Jichang, CHEN Chao, et al. Effects of land use types on soil aggregate characteristics in hilly-gully region of loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 248-253, 259.
- [21] 史正军, 张朝, 卢瑛. 深圳不同植被类型城市土壤团聚体组成与分形特征[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(3): 124-127.
- SHI Zhengjun, ZHANG Chao, LU Ying. Aggregate composition and fractal characteristics of urban green space soils under different vegetation types in Shenzhen[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2013, 32(3): 124-127.
- [22] SU Y Z, WANG F, ZHANG Z H, et al. Soil properties and characteristics of soil aggregate in marginal farmlands of oasis in the middle of Hexi corridor region, Northwest China[J]. Agricultural Sciences in China, 2007, 6(6): 706-714.
- [23] 程欢, 宫渊波, 付雨欣, 等. 四川盆地西南缘不同林分类型土壤团聚体稳定性及有机碳组分特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 109-115.
- CHENG Huan, GONG Yuanbo, FU Yuxin, et al. Soil aggregate stability and characteristics of organic carbon components in three forests of the Southwest edge of Sichuan Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 109-115.
- [24] Soil quality - Measurement of the stability of soil aggregates subjected to the action of water: ISO 10 930: 2012[S]. International Organization for Standardization [iso], 2012.
- [25] 王金满, 张萌, 白中科, 等. 黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 230-238.
- WANG Jinman, ZHANG Meng, BAI Zhongke, et al. Multi-fractal characteristics of reconstructed soil particle in opencast coal mine dump in loess area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(4): 230-238.
- [26] 王金满, 郭凌俐, 白中科, 等. 基于 CT 分析露天煤矿复垦年限对土壤有效孔隙数量和孔隙度的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 229-236.
- WANG Jinman, GUO Lingli, BAI Zhongke, et al. Effects of land reclamation time on soil pore number and porosity based on computed tomography (CT) images in opencast coal mine dump[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(12): 229-236.
- [27] ANDERSON J D, INGRAM L J, STAHL P D. Influence of reclamation management practices on microbial biomass carbon and soil organic carbon accumulation in semiarid mined lands of Wyoming[J]. Applied Soil Ecology, 2008, 40(2): 387-397.
- [28] MALIK A, SCULLION J. Soil development on restored opencast coal sites with particular reference to organic matter and aggregate stability[J]. Soil Use and Management, 1998, 14(4): 234-239.
- [29] HERRICK J E, SCHUMAN G E, RANGO A. Monitoring ecological processes for restoration projects[J]. Journal for Nature Conservation, 2006, 14(3/4): 161-171.
- [30] 李叶鑫, 吕刚, 王道涵, 等. 北方草原区露天煤矿外排土场平台土体裂缝形态特征[J]. 煤炭学报, 2020, 45(11): 3 781-3 792.
- LI Yexin, LYU Gang, WANG Daohan, et al. Morphological characteristics of ground fissures at surface coal mine dump in Northern grassland of China[J]. Journal of China Coal Society, 2020, 45(11): 3 781-3 792.
- [31] 王永强, 谭钦文, 马光兴, 等. 矿山排土场内部裂缝的雷达探测技术[J]. 中国安全生产科学技术, 2012, 8(11): 95-100.
- WANG Yongqiang, TAN Qinwen, MA Guangxing, et al. Radar detection technology about internal cracks of mine dump[J]. Journal of Safety Science and Technology, 2012, 8(11): 95-100.

and aluminate cement (AC) with silica fume as a substitute. The mechanical behavior of the composite adhesives was studied using compressive strength and impermeability tests, combined with SEM, EDS, and XRD characterization. The micro hydration mechanism was also investigated. **【Result】** With the increase in silica fume content, the impermeability of PO, SAC and AC increased gradually. Adding 6% of silica fume significantly increased the strength of PO at the early stage. The C-S-H gel and AFt crystals cemented and interlocked with each other to form a three-dimensional network structure, effectively reducing early deterioration of the strength of the matrix caused by stacking of $\text{Ca}(\text{OH})_2$. The Ca/Si of C-S-H gel decreased, and the degree of polymerization increased, ensuring the stability of the system strength. The strength of SAC pastes measured 3 and 28 days after the test increased first and then decreased with the increase in silica fume replacement rate. The nucleation effect and pozzolanic effect of silica fume promoted the increase in SAC hydration products. The coarse rod like AFt crystals played a skeleton role in hardening pastes and were covered by AH_3 gel, forming a stronger combination. With the increase in the replacement rate of silica fume, the strength of AC paste measured 3 and 28 days after the test showed a negative increase, and the strength measured 90 days after the test increased first and then decreased with the silica fume replacement rate. The addition of 4% silica fume restricted the crystallization reaction of CAH_{10} and C_2AH_8 , and reduced the porosity significantly, which improved the strength reversion phenomenon at the later stage of AC. **【Conclusion】** Adding an appropriate amount of silica fume can significantly enhance the strength of the concrete lining and optimize its microscopic morphology, thereby improving its impermeability. Further studies could explore the effect of varying amounts of silica fume on other types of cementing materials and in different environmental conditions.

Key words: silica fume; channel lining cementing material; mechanical property; C_2AH_8 ; microstructure analysis

责任编辑: 韩 洋

(上接第 110 页)

Distribution and Stability of Soil Aggregates over the Fissure Zones in Reclaimed Coal Mining Waste Dumpsite

LI Yexin^{1,2}, LYU Gang^{2*}, WANG Daohan², WEI Zhongping³

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China;

3. Liaoning Academy of Forestry Science, Shenyang 110032, China)

Abstract: **【Objective】** Restoring coal mining waste dumps is a way to alleviate their detrimental impact on environment. In this paper, we present the results of an experimental study on distribution and stability of soil aggregates in a reclaimed coal mining overburden dump. **【Method】** The experiment was carried out at a reclaimed coal mine dump site in a grassland region in northern China. We measured the development of fissures from Zone I (GF) to Zone three (GFIII) in the fissure zone. The composition and distribution soil aggregates in these zones were determined using dry-wet sieve method. Aggregate stability and its relationship with the fissures was analyzed.

【Result】 The content of the >0.25 mm air-dried aggregates over the fissure zones was 23.02%~42.70%, and content of the >0.25 mm water-stable soil aggregates was 16.9%~29.52%. There was no significant difference between air-dried aggregates and water-stable aggregates. The content of the >0.25 mm water-stable soil aggregates in the 0~60 cm soil layer in GF, GFII and GF III was 25.26%, 26.57%, 23.62%, respectively, while the percentage of aggregate destruction in the three fissure zones was 20.77%~36.17%, 20.52%~25.00%, and 26.58%~40.56%, respectively. The percentage of aggregate destruction in 0~10, 10~20, 20~30, 30~40, 40~50, and 50~60 cm soil layers was 28.81%, 29.96%, 26.19%, 23.50%, 24.91%, and 29.38%, respectively. The fractal dimension of air-dried and water-stable soil aggregates was 2.847~2.919 and 2.898~2.942, respectively. Small aggregates and fine particles are the dominant aggregates. The mean mass diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of the air-dried aggregates in three fissure zones were 1.11, 1.05, 1.28 mm, and 0.45, 0.44, 0.49 mm, respectively. The MWD and GMD of water-stable soil aggregates in the three fissure zones were 0.67, 0.73, 0.72 mm, and 0.36, 0.38, 0.37 mm, respectively. Soil in GFII had good structure and aggregate stability. Most of water-stable soil aggregates in the fissure zones were unstable due to the formation and development of fissures. **【Conclusion】** The formation and development of fissures in the reclaimed coal mining overburden dump reduced the stability of soil aggregates, thereby resulting in aggregate segmentation. The larger and wider the fissures were, the less stable the soil aggregates were.

Key words: dump; soil aggregate; ground fissure; soil aggregate stability; fractal

责任编辑: 赵宇龙