

不同治理措施下高速公路堆积体土壤团聚体变化特征

吴旭¹, 牛耀彬¹, 高照良^{2,3}, 毕如田¹, 吕春娟¹

(1.山西农业大学 资源环境学院, 山西 太谷 030801; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:为定量评价坡面治理措施(植被恢复模式、恢复年限、削坡分级)对高速公路堆积体土壤团聚体的调控作用,以陕西省不同区域高速公路堆积体为对象,用干筛法和湿筛法测定其土壤团聚体组成。同时选取 >0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)和破坏率(PAD)等指标进行土壤团聚体稳定性分析。结果表明:与冰草相比,坡面自然植被恢复为小冠花和白三叶时对应的 $R_{0.25}$, MWD 和 GMD 均显著增加,增幅分别介于 $12\% \sim 15\%$, $38\% \sim 40\%$, $38\% \sim 41\%$,表明堆积体坡面恢复为豆科草本植物有利于提高土壤团聚体的稳定性;与未复垦相比,坡面人为复垦种植玉米和黄豆时对应的 MWD 和 GMD 均显著降低,降幅分别为 13% 和 12% ,表明堆积体坡面(36°)不宜复垦种植农作物;与恢复 1 a 相比,恢复 2 a 和 5 a 堆积体所对应的 $R_{0.25}$ 和 GMD 均显著增加,增幅分别为 13% 和 18% , 29% 和 24% ,但恢复 5 a 所对应的 MWD, GMD 和 D 与 2 a 均无显著差异,表明侧柏人工林短期恢复土壤团聚体稳定性持续提高;短坡长(<60 m)堆积体坡面土壤团聚体稳定性空间分布相对均匀;相比未治理全坡面,削坡分级治理后平台和坡面所对应的 $R_{0.25}$ 显著增加,增幅分别介于 $57\% \sim 95\%$ 和 $38\% \sim 44\%$,表明工程措施可提高土壤团聚体稳定性,且平台稳定性高于坡面; D 与根重密度存在极显著负相关。研究结果不仅可为工程堆积体土壤团聚体稳定性评价提供参考,也可为其治理措施配置提供指导。

关键词:土壤团聚体;措施调控;植被恢复;工程堆积体;分形维数

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)03-0071-07

Variation Characteristics of Soil Aggregates Under the Treatment Measures on the Expressway Engineering Accumulation Slope

WU Xu¹, NIU Yaobin¹, GAO Zhaoliang^{2,3}, BI Rutian¹, LYU Chunjuan¹

(1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the regulating effect of the slope treatment measures, including vegetation restoration patterns, years of recovery, and the slope cutting and grading control on the soil aggregates of expressway engineering accumulation, the composition of soil aggregates of expressway engineering accumulations in different regions of Shaanxi Province was determined by dry and wet sieving methods. Meanwhile, >0.25 mm water-stable aggregate content ($R_{0.25}$), soil aggregate mean weight diameter (MWD), geometric mean diameter (GMD), fractal dimension (D), and percentage of aggregate destruction (PAD) were selected to analyze the stability of soil aggregates. The results showed that compared with *Agropyron cristatum*, the natural restoration species of *Coronilla varia* and *Trifolium repens* significantly increased $R_{0.25}$, MWD, and GMD, the increasing ranges were $12\% \sim 15\%$, $38\% \sim 40\%$, and $38\% \sim 41\%$, respectively, indicating that the restoration of legume herbaceous plants was beneficial to improve the soil aggregate stability. Compared with no-reclamation, the artificial reclamation species of soybean and maize significantly decreased MWD and GMD, the decrement were 13% and 12% , respectively. It showed that the slope (36°) was not suitable for reclamation to plant crops. Compared with recovery for 1 year, recovery for

收稿日期:2021-05-06

修回日期:2021-06-07

资助项目:山西省高等学校科技创新项目(2020L0141, 2020L0146);山西农业大学科技创新基金(博士科研启动)项目(2020BQ38, 2020BQ44);山西省优秀博士来晋工作奖励(SXYBKY2019029, SXYBKY2020007)

第一作者:吴旭(1989—),女,陕西渭南人,博士,讲师,主要从事工矿区植被恢复与重建原理研究。E-mail:13572569663@163.com

通信作者:高照良(1969—),男,河南灵宝人,研究员,博士,博士生导师,研究方向:农业水土工程和荒漠化防治。E-mail:gzi@ms.iswc.ac.cn

2 and 5 years significantly increased $R_{0.25}$ and GMD, the increment were 13% and 18%, 29% and 24%, respectively. However, there were no significant differences between recovery 2 and 5 years for the indictors of MWD, GMD, and D , indicating that the short-term restoration of *Platycladus orientalis* plantation was helpful to improve the soil aggregates stability. The stability of soil aggregates on the slope of short slope length (<60 m) engineering accumulation was relatively uniform in spatial distribution. Compared with un-governed slope, the $R_{0.25}$ corresponding to the platform and the slope surface increased significantly after the slope cutting and grading control, and the increasing ranges were 57%~95% and 38%~44%, respectively, which indicated that the stability of soil aggregates could be improved by engineering measures, and stability of soil aggregates on the platform was higher than that of the slope. There was a negatively correlated relationship between D and root weight density. These research results can not only provide reference for the evaluation of the soil aggregate stability of engineering accumulations, but also provide guidance for its treatment measure configuration.

Keywords: soil aggregate; measure regulation; vegetation restoration; engineering accumulation; fractal dimension

工程堆积体是生产建设项目形成的人为堆积地貌,也是生产建设活动新增水土流失的重要来源之一^[1]。堆积体坡面侵蚀过程及措施调控受到广泛关注^[2-3],其中,工程措施已成为控制水土流失的重要举措^[4],植被措施对坡面泥沙的拦蓄效果明显^[5]。然而,关于不同治理措施调控下工程堆积体坡面土壤团聚体组成及稳定性影响的研究相对较少。土壤团聚体是评价土壤质量的重要指标^[6],也是影响土壤侵蚀的重要因子^[7],团聚体的数量和大小对于稳定土壤结构至关重要^[8],土壤团聚体稳定性可用平均质量直径、平均几何直径、分形维数等重要参数表征^[9]。

土壤团聚体的研究多集中在坡耕地和自然坡面,很少涉及高速公路工程堆积体坡面。国内学者在黄土高原、亚热带红壤区和三峡水库消落带等区域,研究了土地利用方式、植被类型、库区水位高程等对土壤团聚体特征的影响等^[10-12]。然而,人为扰动及其措施调控是工程堆积体土壤结构动态变化的主要驱动因素,在措施调控下,量化堆积体坡面土壤团聚体的动态变化过程,对于揭示措施调控坡面抗蚀性能具有重要意义。现有工程堆积体坡面侵蚀过程研究缺乏对不同治理措施调控下土壤团聚体动态变化的量化研究,不能为定量评价治理措施对坡面侵蚀的贡献提供相关参数。

鉴于此,本文通过在堆积体坡面原位采集土壤样品,测定水稳性团聚体含量,并计算>0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、土壤团聚体平均质量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D)和破坏率(PAD),评价植被恢复模式、恢复年限、削坡分级治理对工程堆积体坡面土壤团聚体稳定性的调控作用,以期为高速公路工程堆积体坡面侵蚀防治提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省境内含有北部黄土高原、中部关中平原和南部秦巴山区等典型地貌区域^[13]。本研究分别选取 3 个区域内宝汉高速公路、西宝高速公路和黄延高速公路建设形成的工程堆积体为研究对象。3 个区域基本情况见已有研究成果^[14],研究区及采样点示意图 1。

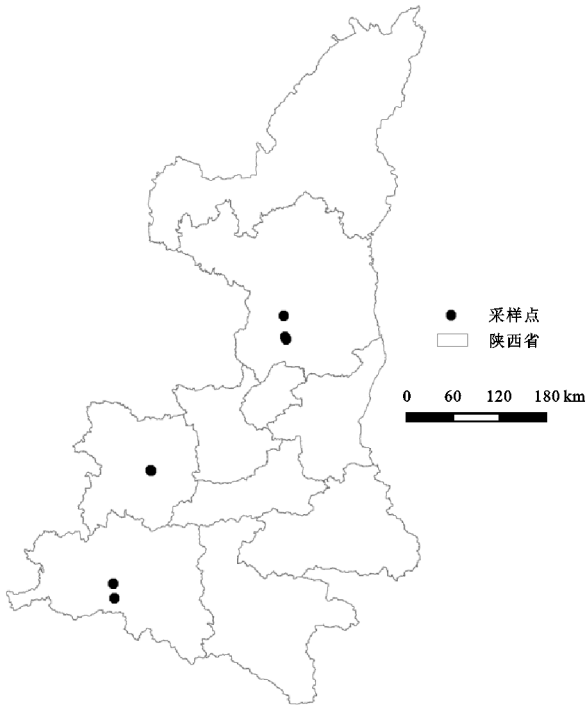


图 1 研究区示意图

1.2 工程堆积体选择

2017 年 7—8 月对近 5 a 陕西省境内典型区域高速公路工程堆积体进行调查。以地貌、植被、堆积体构成为分类依据。调查结果,秦巴山区宝汉高速公路堆

积体边坡植被恢复模式主要包括自然恢复和人为复垦,其中,自然恢复以白三叶(*Trifolium repens*)、小冠花(*Coronilla varia*)和冰草(*Agropyron cristatum*)为主,人工复垦以玉米(*Zea mays*)和大豆(*Glycine max*)为主。关中平原西宝高速公路堆积体边坡植被恢复模式主要为侧柏(*Platycladus orientalis*)人工林,林下植被为蒿草(*Artemisia argyi*),但由于工期的差异,形成不同年限的堆积体,主要有 5 a,2 a 和 1 a 堆积体。陕北黄土高原黄延高速公路堆积体边坡植被恢复模式主要为刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林,林下植被为蒿草,由于后期分级削坡整治,形成了具有“平台—坡面”结构的治理堆积体,其周围存在未治理全坡面。综合考虑不同区域高速公路堆积体数量、野外采样交通便利等情况,本研究选取的高速公路堆积体共 7 个,分别是秦巴山区 2 个,关中平原 3 个(西沟弃渣场

是坡位和年限研究共用堆积体),黄土高原 2 个。

1.3 试验设计

为了评价植被恢复模式、恢复年限、削坡分级治理措施等对堆积体土壤团聚体的调控作用,基于前期野外调查,试验设计 5 种不同处理,总共涉及 7 个弃渣场,具体设计如下:(1) 自然恢复 3 种处理,小冠花、白三叶、以冰草为对照,采样点对应 1 号堆积体;(2) 人为复垦 3 种处理,玉米、黄豆,以未复垦为对照,采样点对应 2 号堆积体;(3) 恢复年限 3 种处理,恢复 1 a,2 a,5 a,以 1 a 为对照,采样点分别对应 3—5 号堆积体;(4) 不同坡位 3 种处理,坡上、坡中、坡下,采样点对应 5 号堆积体;(5) 削坡分级治理 3 种处理,治理后平台和坡面,以未治理全坡面为对照,采样点对应 6—7 号堆积体,选择 6—7 号堆积体是为了重复验证。试验区域及堆积体名称等基本见表 1。

表 1 不同工程堆积体基本情况

区域	处理	堆积体名称	土壤	年限	植被	盖度/%	纬度 N	经度 E	海拔/m	坡度/(°)	坡长/m
秦巴山区	自然恢复	(1)宝汉高速南郑县星光村弃渣场	水稻土	5	小冠花、白三叶、冰草	80	33°02′38.84″	106°54′38.26″	521	37	8
	人为复垦	(2)宝汉高速红庙镇上二里山弃渣场	石渣土	5	黄豆、玉米、杂草	70	32°52′35.08″	106°55′48.68″	695	36	80
关中平原	不同年限	(3)西宝高速唐家人南沟弃渣场	黑垆土	1	侧柏、蒿草	10	34°19′52.37″	107°22′41.63″	595	35	30
		(4)西宝高速娘娘沟大桥弃渣场	黑垆土	2	侧柏、蒿草	50	34°19′46.74″	107°22′76.95″	597	36	30
		(5)西宝高速西沟弃渣场	黑垆土	5	侧柏、蒿草	60	34°19′59.57″	107°22′51.60″	596	38	60
	不同坡位	(5)西宝高速西沟弃渣场									
黄土高原	削坡分级	(6)黄延高速董家沟弃渣场	黄绵土	4	刺槐、蒿草	50	35°50′01.74″	109°13′09.95″	1020	40	40
		(7)黄延高速葫芦河大桥弃渣场	黄绵土	4	刺槐、黑麦草	40	35°51′30.20″	109°12′03.11″	1120	36	40

1.4 样品测定与指标计算

每种处理下选取高速公路堆积体相对平整的 7 m×6 m 区域,运用多点取样混合的办法,在堆积体坡面原位采集 0—20 cm 土壤样品,取 2 kg 左右的土样带回室内,通过干筛法和湿筛法测定土壤团聚体组成及水稳定团聚体含量;并用环刀取样测定土壤含水量、容重、植被根系,重复 3 次;在堆积体原位采用荷兰的微型粘结力仪对采样点处的粘结力进行测定,重复 10 次;颗粒组成采用 MS 2000 马尔文激光粒度仪测定,重复 3 次;采样点土壤基本理化性质见表 2。

根据湿筛法测定的水稳性团聚体组成结果,计算>0.25 mm 水稳性团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体分形维数(D)和团聚体的破坏率(PAD)等土壤团聚体稳定性指标,其中 $R_{0.25}$,MWD 和 GMD 越大, D 和 PAD 越小,表示土壤团聚度越高,团聚体稳定性越好。各指标计算公式如下:

(1) 团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)^[15]。计算公式分别为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \overline{X}_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \tag{1}$$

$$GMD = \exp \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \overline{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \tag{2}$$

式中: \overline{X}_i 为土壤粒级的平均直径(mm); W_i 为不同土壤粒级团聚体占总团聚体的比例。

(2) 团聚体破坏率(PAD)^[15]。计算公式为,

$$PAD = \frac{W_d - W_w}{W_d} \times 100\% \tag{3}$$

式中: W_d 为>0.25 mm 干筛团聚体百分含量(%); W_w 为>0.25 mm 湿筛团聚体百分含量(%)。

(3) 团聚体分形维数(D)^[16]。计算公式为,

$$\frac{W(r < R_i)}{W_T} = \left[\frac{\overline{R}_i}{R_{\max}} \right]^3 - D \tag{4}$$

两边取以 10 为底的对数:

$$\frac{\lg W(r < R_i)}{W_T} = (3 - D) \lg \frac{\overline{R}_i}{R_{\max}} \tag{5}$$

式中: D 为土壤水稳性团聚体各粒径分布的分形维数; W 为直径小于 R_i 累积质量(g); W_T 为总质量(g); $\overline{R_i}$ 为两相邻粒径 R_i 与 R_{i+1} 间土粒平均直径(mm); R_{\max} 为最大粒径土粒平均直径(mm)。

试验不同处理间采用 SPSS 19.0 软件中的单因素方差分析(ANOVA)和多重比较(LSD)进行分析。

表 2 不同工程堆积体土壤基本理化性质

治理措施	处理	含水量/%	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏结力/ kPa	根重密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%
自然恢复	小冠花	15.92±0.94	1.36±0.09	19.67±6.18	3.29±0.32	30.07	52.06	17.87
	白三叶	12.49±0.80	1.40±0.14	19.83±3.62	2.26±0.25	26.27	54.86	18.87
	冰草	7.84±0.95	1.24±0.06	19.55±5.32	2.02±0.24	29.35	53.42	17.23
	黄豆	5.28±0.82	1.46±0.08	14.28±2.24	0.20±0.04	16.70	56.95	26.34
人为复垦	玉米	7.54±2.11	1.42±0.10	13.78±3.33	0.83±0.11	13.88	49.73	36.39
	未复垦	4.87±1.60	1.43±0.10	13.25±2.95	0.21±0.03	15.87	52.85	31.28
	1a	21.75±1.50	1.32±0.05	25.44±4.31	1.04±0.11	18.41	44.44	37.15
不同年限	2a	24.55±2.15	1.18±0.10	28.18±3.89	1.47±0.24	24.04	36.14	39.82
	5a	24.85±1.27	1.17±0.07	31.22±4.60	1.67±0.22	31.07	53.44	15.49
	坡上	24.85±1.27	1.17±0.07	31.22±4.60	1.24±0.18	22.03	38.45	39.52
不同坡位	坡中	23.52±1.29	1.22±0.05	29.41±3.07	1.75±0.22	24.04	36.11	39.85
	坡下	24.48±1.14	1.23±0.07	30.13±2.20	2.03±0.16	27.01	39.65	33.34
	平台 1	17.45±0.74	1.41±0.01	23.80±5.04	1.65±0.20	18.41	59.21	22.38
削坡分级 1	坡面 1	19.25±1.60	1.41±0.07	24.61±1.20	1.32±0.19	13.57	58.11	28.32
	全坡面 1	16.41±1.95	1.25±0.05	13.80±1.72	0.87±0.11	16.70	56.37	26.93
	平台 2	16.45±0.37	1.43±0.05	29.40±4.18	1.97±0.16	14.36	54.36	31.28
削坡分级 2	坡面 2	17.21±1.03	1.25±0.02	23.60±6.83	1.65±0.21	13.55	57.49	28.96
	全坡面 2	11.31±1.07	1.04±0.03	14.05±1.10	0.35±0.06	13.01	56.30	30.69

2 结果与分析

2.1 不同工程堆积体土壤团聚体指标

将研究区域所有不同处理条件下高速公路堆积体坡面土壤团聚体进行测定,并运用公式(1—5)计算得到土壤团聚体稳定性指标,并进行方差分析,具体见表 3。

2.1.1 自然恢复 秦巴山区星光村弃渣场坡面以自然恢复为主,形成多种植物斑块,以小冠花和白三叶为主,冰草零星分布。由表 3 可得,与冰草相比,坡面植被恢复为小冠花和白三叶时对应的 $R_{0.25}$,MWD 和 GMD 均显著($p<0.05$)增加,增幅分别介于 12%~15%,38%~40%,38%~41%。坡面植被恢复为小冠花和白三叶时 PAD 显著($p<0.05$)小于冰草。而小冠花和白三叶之间 $R_{0.25}$,MWD 和 GMD 均无显著($p>0.05$)差异。在所有自然恢复处理条件下,分形维数 D 均无显著($p>0.05$)差异,相比冰草,小冠花和白三叶对应分形维数 D 值呈现减小趋势。这表明,相比冰草,堆积体坡面自然恢复为小冠花和白三叶可以提高土壤团聚体的稳定性。究其原因,在堆积体坡面植被恢复为小冠花和白三叶时,土壤中植被根系增多,丰富的植被根系能增加土壤中水稳性团粒结构的数量。

2.1.2 人为复垦 秦巴山区上二里山弃渣场坡面进行

了人为复垦种植,在同一坡面种植农作物有玉米和黄豆,部分未复垦。由表 3 可知,与未复垦相比,坡面人为复垦种植农作物玉米和黄豆时对应的 MWD 和 GMD 均显著($p<0.05$)降低,降幅分别为 13%,12%。坡面人为复垦种植玉米和黄豆时对应的 $R_{0.25}$ 和 PAD 与未复垦相比无显著($p>0.05$)差异。坡面人为复垦种植黄豆时分形维数 D 显著($p<0.05$)高于未复垦坡面。这表明,相比未复垦,堆积体坡面人为复垦种植黄豆和玉米降低土壤团聚体稳定性。究其原因,可能是人为复垦种植耕作和田间管理在一定程度上对堆积体土壤稳定性起到扰动作用。此外,与堆积体下垫面为石渣土可能相关,破碎的砾石和土壤混合,结构性差。

2.1.3 不同年限 关中平原不同恢复年限工程堆积体选择南沟弃渣场、娘娘沟大桥和西沟弃渣场,恢复植被为侧柏人工林,其恢复年限分别为 1 a,2 a 和 5 a,以南沟弃渣场(1 a)为对照。由表 3 可知,与恢复 1 a 相比,恢复 5 a 堆积体所对应的 $R_{0.25}$,MWD 和 GMD 均显著($p<0.05$)增加,增幅分别为 29%,15% 和 24%。恢复 5 a 堆积体所对应的分形维数 D 和 PAD 显著($p<0.05$)小于恢复 1 a。这表明,与恢复 1 a 相比,工程堆积体坡面恢复 5 a 可以显著提高土壤团聚体稳定性。究其原因,可能是随着恢复年限的延长,堆积体坡面土壤容重减小,粘结力增大,植被根系增多,导

致土壤团聚体结构变好,稳定性增强。与恢复 1 a 相比,恢复 2 a 堆积体所对应的 $R_{0.25}$ 和 GMD 均显著($p<0.05$)增加,增幅分别为 13%和 18%。恢复 2 a 堆积体所对应的分形维数 D 和 PAD 显著($p<0.05$)小

于恢复 1 a。与恢复 1 a 相比,工程堆积体坡面恢复 2 a 同样可以显著提高土壤团聚体稳定性。此外,恢复 5 a 堆积体所对应的 MWD,GMD 和 D 均与恢复 2 a 相比无显著($p>0.05$)差异。

表 3 不同工程堆积体土壤团聚体指标

区域	治理措施	处理	$R_{0.25}/\%$	MWD/mm	GMD/mm	D	PAD/%
秦巴山区	自然恢复	小冠花	74.57±0.91a	2.86±0.01a	2.11±0.02a	1.92±0.03a	19.09±0.99c
		白三叶	72.67±1.05a	2.91±0.15a	2.15±0.12a	1.97±0.05a	25.65±1.08b
		冰草	64.86±2.44b	2.08±0.03b	1.53±0.02b	2.05±0.01a	33.98±2.48a
		黄豆	62.92±2.23a	1.68±0.06b	1.16±0.03b	2.24±0.03a	34.72±2.32a
	人为复垦	玉米	57.14±1.54a	1.67±0.04b	1.15±0.02b	2.22±0.02ab	34.77±1.22a
		未复垦	60.8±1.13a	1.92±0.07a	1.32±0.03a	2.16±0.01b	39.52±1.63a
关中平原	不同年限	1 a	40.22±0.76c	1.49±0.07b	1.01±0.05b	2.13±0.01a	60.8±1.37a
		2 a	45.62±0.82b	1.64±0.03ab	1.19±0.02a	2.05±0.01b	52.63±0.83b
		5 a	51.71±1.12a	1.72±0.04a	1.25±0.03a	2.06±0.01b	46.49±1.16c
	不同坡位	坡上	54.11±0.63a	1.77±0.04a	1.29±0.02a	2.05±0.01a	43.69±0.66b
		坡中	52.27±1.31ab	1.76±0.03a	1.29±0.03a	2.05±0.01a	45.89±1.37ab
		坡下	48.75±1.40b	1.63±0.04b	1.18±0.03a	2.07±0.01a	49.90±1.46a
黄土高原	削坡分级 1	平台 1	46.49±1.38a	1.18±0.05a	0.91±0.02a	2.03±0.02b	50.17±1.03c
		坡面 1	34.33±3.11b	1.15±0.04a	0.86±0.02a	2.06±0.01ab	64.14±3.59b
		全坡面 1	23.83±2.04c	1.15±0.05a	0.81±0.04a	2.15±0.05a	70.59±2.85a
	削坡分级 2	平台 2	48.22±1.13a	1.31±0.13a	0.91±0.07a	2.02±0.02b	57.13±2.74b
		坡面 2	42.39±2.93a	1.48±0.11a	1.08±0.07a	2.09±0.05a	52.45±3.12b
		全坡面 2	30.80±2.54b	1.22±0.04b	0.90±0.02a	2.12±0.02a	63.34±1.46a

注:不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。

2.1.4 不同坡位 由表 3 可知,与坡上相比,西沟弃渣场坡下所对应的 $R_{0.25}$ 和 MWD 均显著($p<0.05$)降低,降幅分别为 9.91%和 7.91%。坡下所对应 PAD 显著($p<0.05$)大于坡上,这表明,堆积体坡面土壤团聚体稳定性坡上高于坡下,究其原因,可能是堆积体坡面土壤含水量和粘结力坡上较大导致的。此外,西沟弃渣场坡下所对应的 GMD 和 D 均与坡上相比无显著($p>0.05$)差异。坡中所对应的所有土壤团聚体稳定性指标相比坡上无显著($p>0.05$)差异,坡下所对应的大多数指标相比坡中无显著($p>0.05$)差异。综合而言,短坡长(<60 m)工程堆积体坡面土壤团聚体稳定性空间分布相对均匀,坡位差异不明显。

2.1.5 削坡分级 黄土高原不同工程堆积体选择董家沟弃渣场和葫芦河大桥弃渣场分别进行削坡分级治理,形成以“坡面—平台”为构成要素的堆积体,在其周围选取未治理的全坡面作为对照,由表 3 可知,相比未治理全坡面,削坡分级治理后平台和坡面所对应的 $R_{0.25}$ 显著($p<0.05$)增加,增幅分别介于 57%~95%和 38%~44%,削坡分级治理后平台和坡面所对应的 GMD 相比未治理全坡面无显著($p>0.05$)差异。削坡分级治理后平台所对应的分形维数 D 相比未治理全坡面显著($p<0.05$)减小,削坡分级治理后

平台和坡面所对应的 PAD 相比未治理全坡面也显著($p<0.05$)减小。这表明,相比未治理全坡面,工程堆积体坡面削坡分级治理措施可以显著提高土壤团聚体稳定性,治理后平台土壤团聚体稳定性高于坡面。究其原因,可能是削坡分级治理后,缩短坡长,减缓坡度,有效拦截和入渗降雨,促进植被生长,土壤含水量、粘结力及其植被根系增加导致土壤团聚体稳定性增强。

2.2 不同堆积体土壤团聚体稳定性与理化性质相关分析

为了分析影响堆积体土壤团聚体稳定性的关键参数,对试验所有处理条件下所测土壤物理参数均与土壤团聚体稳定性指标进行皮尔森相关性分析,由此得表 4。从表 4 可得, $R_{0.25}$,MWD 和 GMD 均与黏粒含量存在显著($p<0.05$)正相关, D 和 PAD 均与黏粒含量存在显著($p<0.05$)负相关;MWD 和 GMD 均与根重密度存在显著($p<0.05$)正相关;分形维数 D 与粘结力存在显著($p<0.05$)负相关,分形维数 D 与根重密度存在极显著($p<0.01$)负相关关系。

根据堆积体土壤团聚体稳定性指标与土壤理化性质参数相关性分析结果,对根重密度与分形维数的关系进行曲线估计,并绘制拟合结果,得图 2。

表 4 土壤团聚体稳定性指标与土壤理化性质相关分析

指标	含水量	容重	黏结力	根重密度	黏粒	粉粒	砂粒
$R_{0.25}$	-0.34	0.39	-0.07	0.42	0.55 *	0.07	-0.36
MWD	-0.19	0.16	-0.10	0.55 *	0.65 * *	-0.12	-0.40
GMD	-0.15	0.13	-0.06	0.60 * *	0.67 *	-0.10	-0.43
D	-0.44	0.11	-0.51 *	-0.88 * *	-0.58 *	0.11	0.35
PAD	0.37	-0.34	0.18	-0.40	-0.52 *	-0.03	0.38

注：* 和 * * 分别表示在 0.05,0.01 水平上显著相关。

由图 2 可知,土壤团聚体分形维数 D 与根重密度可用一般线性函数关系表达:

$$D = -0.09x + 2.21 \quad R^2 = 0.78 \quad p < 0.01 \quad (6)$$

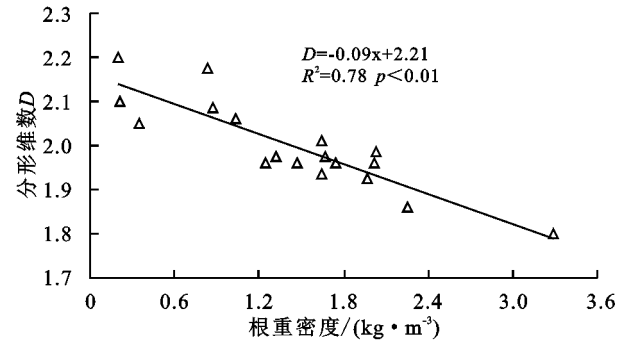


图 2 土壤团聚体分形维数与根重密度拟合关系

从拟合函数关系可以得出,土壤分形维数 D 随着根重密度的增大而减小,表明随着堆积体坡面植被恢复,土壤团聚体的稳定性提高。根系作为植被的重要组成部分,不仅是吸收与输送水分和养分的通道,还可以通过穿插、交错、网络固结、根土黏结等作用,改善土壤理化特性,促进土壤团聚体的形成,影响土壤孔隙分布,进而影响入渗和结皮过程,改变了土壤表层水文特性,堆积体坡面防护植物的选择可以考虑植被根系状况,植物根系可以改变土壤的力学以及水文特征,促进土壤团聚体的形成和稳定,从而提高其抗侵蚀能力^[17]。此外,分形维数作为评价土壤团聚的评价指标而言,研究者持有不同观点,有研究发现,用分形维数 D 作为指标表征各类土壤的团聚水平的可信性值得商榷^[18],另外研究得出分形维数对土壤结构变化的响应相当敏感,可作为植被恢复过程中土壤质量评价的指标^[19],本研究相关性分析支持分形维数对根系的响应敏感性,但对于分形维数和其他指标的响应关系有待进一步验证。

3 讨论

3.1 治理措施对土壤团聚体稳定的调控

随着近年来城市化进程和基础设施建设的不断推进,生产建设项目形成的工程堆积体剧增,堆积体综合治理和开发利用已成为生态环境修复不容忽视的课题。按照水土保持工程设计规范,工程堆积体应

进行削坡分级治理,治理后堆积体平台可以进行人为覆土种植,堆积体边坡坡度较陡(36°~40°),不适宜耕作,可以撒播草籽进行植被自然恢复,既可以起到固持土壤,又可以提高土壤抗冲刷能力。水土保持工程治理措施和生物措施相结合可以改善土壤团聚体状况^[20]。本研究得出,侧柏人工林堆积体短期恢复年限内(2~5 a)土壤团聚体稳定性持续提高,随着年限延长增幅变缓。这是因为堆积体形成初期,人为扰动活动剧烈,随着堆积体的形成并恢复稳定,人为扰动大幅度减缓,土壤团聚体开始恢复,但随着年限的延长,恢复幅度变缓。相类似的研究表明,林地开垦为耕地会降低土壤团聚体的稳定性,该结论与工程堆积体重型机械开挖、搬运、堆弃扰动类似,另外研究得出坡耕地弃耕撂荒会增强团聚体的稳定性,该结论与工程堆积体形成后续恢复相同^[21]。因此,工程堆积体削坡分级治理之后其土壤团聚体稳定性会随着年限延长提高。此外,研究表明,林草混合复垦方式对矿区排土场土壤修复有重要意义^[22],对于工程堆积体坡面防护措施的配置,可以采用工程措施加乔木、灌木、草本(特别是豆科植物)相结合的模式进行,从而提高土壤抵抗外力破坏的能力。

3.2 影响土壤团聚体稳定特性因素分析

影响土壤团聚体稳定性的因素众多,首先,土壤水分是影响土壤团聚体稳定性的重要因素,研究表明,土壤水分会促进大团聚体破碎分解成微团聚体,从而改变团聚体稳定性^[23],该结论与本研究结论类似,随着人工林恢复年限的增加,堆积体土壤含水量增大,表明土壤储水孔隙逐渐增多。其次,就植被根系而言,本研究得出植被根系能增加土壤中水稳性团粒结构的数量,从而提高土壤抗蚀能与已有研究结论一致^[24]。第三,植被种类同样影响土壤团聚体稳定性,本研究结果表明,自然恢复为白三叶和小冠花均可提高水稳性团聚体含量,但相比之下,小冠花的提高幅度大于白三叶,这主要是与其根系结构有关^[25]。第四,保护性耕作有利于改善土壤团聚体结构,增加土壤团聚体含量^[26],这表明,在降雨充沛的地区,堆积体在完成削坡分级治理之后,其坡面只要拥有植物

种植或者种子,后续植被自然恢复的过程就可以提高土壤团聚体稳定性,提高堆积体坡面抗蚀性能,有效防治水土流失。

4 结论

(1) 与冰草相比,坡面植被恢复为小冠花和白三叶时对应的 $R_{0.25}$, MWD 和 GMD 均显著增加,增幅分别介于 12%~15%, 38%~40%, 38%~41%。与未复垦相比,坡面人为复垦种植农作物玉米和黄豆时对应的 MWD 和 GMD 均显著降低,降幅分别为 13% 和 12%。

(2) 与恢复 1 a 相比,恢复 2 a 和 5 a 堆积体所对应的 $R_{0.25}$ 和 GMD 均显著增加,增幅分别为 13% 和 18%, 29% 和 24%。恢复 5 a 堆积体所对应的 MWD, GMD 和 D 与恢复 2 a 均无显著差异。

(3) 短坡长(<60 m)工程堆积体坡面土壤团聚体稳定性空间分布相对均匀。相比未治理全坡面,削坡分级治理后平台和坡面所对应的 $R_{0.25}$ 显著增加,增幅分别介于 57%~95% 和 38%~44%。分形维数 D 与根重密度存在极显著负相关关系,可用一般线性函数表达。

参考文献:

- [1] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope[J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(2): 775-796.
- [2] Niu Y B, Gao Z L, Li Y H, et al. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: a field runoff plots experiment [J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 202: 104655.
- [3] 张乐涛,董俊武,袁琳,等.黄土区工程堆积体陡坡坡面径流调控工程措施的减沙效应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 101-109.
- [4] 牛耀彬,高照良,刘子壮,等.工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 105-111.
- [5] 娄永才,高照良,李永红,等.不同上方来水模式下工程堆积体坡面的植被调控[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(24): 144-153.
- [6] 侯晓静,杨劲松,王相平,等.不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 818-827.
- [7] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion: validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47(2): 133-149.
- [8] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: A mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [9] Ding W F, Zhang X C. An evaluation on using soil aggregate stability as the indicator of interrill erodibility [J]. *Journal of Mountain Science*, 2016, 13(5): 831-843.
- [10] 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.
- [11] 李燕燕,刘亮英,张志坚,等.亚热带红壤区自然恢复草地转换为人工林后对土壤团聚体有机碳周转的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(11): 80-85.
- [12] 张淑娟,贺秀斌,鲍玉,等.三峡水库消落带不同水位高程土壤团聚体变化特征[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 25-30.
- [13] 张少伟,郭勇,权红花.陕西省地理国情(省)情监测中的基本地貌类型及划分指标[J]. *测绘标准化*, 2012, 28(4): 13-16.
- [14] 牛耀彬,高照良,齐星圆,等.不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(2): 134-143.
- [15] 张加子琦,贾燕锋,王佳楠,等.东北黑土区长缓复合侵蚀坡面土壤可蚀性参数特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 590-599.
- [16] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993, 38(20): 1896-1899.
- [17] 刘均阳,周正朝,苏雪萌.植物根系对土壤团聚体形成作用机制研究回顾[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 267-273.
- [18] 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.
- [19] 赵冬,许明祥,刘国彬,等.用显微 CT 研究不同植被恢复模式的土壤团聚体微结构特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 123-129.
- [20] 王月玲,蔡进军,张源润,等.半干旱退化山区不同生态恢复与重建措施下土壤理化性质的特征分析[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(1): 11-14.
- [21] 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.
- [22] 马佳慧,张兴昌,邱莉萍.黑岱沟矿区排土场不同复垦方式下土壤性质的研究[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(1): 93-96.
- [23] 徐程,谷峰,王瑶,等.土壤团聚体和水分动态在 3 种植被覆盖下的关系[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(1): 68-74.
- [24] 刘国彬.黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1): 93-96.
- [25] 秦瑞杰,郑粉莉,卢嘉.草本植物生长发育对土壤团聚体稳定性影响的试验研究[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(3): 141-144.
- [26] 张赛,王龙昌.保护性耕作对土壤团聚体及其有机碳含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(4): 264-272.