

引用格式:

马佳鑫, 夏栋, 艾尚进, 舒倩, 马悦阳, 刘芳, 闫书星. 植被混凝土边坡土壤团聚体的稳定性与可蚀性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(6): 702-707.

MA J X, XIA D, AI S J, SHU Q, MA Y Y, LIU F, YAN S X. Soil aggregate stability and erodibility of vegetation concrete slope[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(6): 702-707.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



植被混凝土边坡土壤团聚体的稳定性与可蚀性

马佳鑫^{1,2}, 夏栋^{2,3*}, 艾尚进², 舒倩^{1,2}, 马悦阳², 刘芳^{2,3}, 闫书星^{2,3}

(1.三峡大学生物与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 2.水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:以湖北省宜昌市内恢复年限为 1、3、5、18 a 的植被混凝土生态修复边坡土壤为研究对象, 采用 Le Bissonnais 法分析快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和机械扰动(WS)等 3 种处理条件下土壤团聚体的稳定性和可蚀性。结果表明: SW 处理下土壤团聚体以 ≥ 5.00 mm 粒径为主, WS 处理下土壤以 ≥ 5.00 mm 粒径团聚体的占比最高, 但其值低于 SW 处理的, FW 处理下 < 0.25 mm 的土壤团聚体粒径占比最高, 说明土壤团聚体经 FW 处理后破碎程度大, SW 处理后破碎程度小; 土壤团聚体平均质量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)值均表现为 SW 处理中的最高, FW 处理中的最低, 而土壤可蚀性值(K)则与其相反, 同一恢复年限的边坡土壤的相对消散指数均大于其相对机械破碎指数, 说明快速湿润引起的消散作用是土壤团聚体破碎的主要机制; SW 和 WS 处理下已恢复 18 a 的边坡土壤的粒径 ≥ 2.00 mm 的团聚体占比最高, < 0.25 mm 的占比最低, MWD 和 GMD 值最大, K 值最小。可见, 大暴雨冲刷可能会导致植被混凝土边坡土壤结构不稳定并发生侵蚀, 且随着恢复年限的增加植被混凝土边坡土壤结构逐渐趋于稳定。

关键词: 植被混凝土边坡; 土壤团聚体; Le Bissonnais 法; 稳定性; 可蚀性

中图分类号: S152.4; TU528 文献标志码: A 文章编号: 1007-1032(2023)06-0702-06

Soil aggregate stability and erodibility of vegetation concrete slope

MA Jiixin^{1,2}, XIA Dong^{2,3*}, AI Shangjin², SHU Qian^{1,2}, MA Yueyang², LIU Fang^{2,3}, YAN Shuxing^{2,3}

(1.College of Biology and Pharmacy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2.Engineering Research Center of Cement Based Ecological Restoration Technology, Yichang, Hubei 443002, China; 3.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: The stability and erodibility of soil aggregates under three treatment conditions, including fast wetting(FW), slow wetting(SW) and mechanical disturbance(WS), were analyzed using the Le Bissonnais method in this study. The experimental materials were the soil of vegetated concrete ecological restoration slopes with restoration years of 1, 3, 5 and 18 a in the city of Yichang, Hubei Province. The results showed that soil aggregates under SW treatment were dominated by ≥ 5.00 mm particle size, soil under WS treatment had the highest percentage of aggregates with ≥ 5.00 mm particle size, but its ratio was lower than that of SW treatment, and soil aggregates with < 0.25 mm particle size had the highest percentage under FW treatment, indicating that soil aggregates were highly fragmented after FW treatment, and less fragmented after SW treatment. The mean mass diameter(MWD) and geometric mean diameter(GMD) values of soil aggregates were the highest in the SW treatment and the lowest in the FW treatment, while the soil erodibility value(K) was the opposite. The relative dissipation index(RSI) of soils were greater than their relative mechanical fragmentation index(RMI) at the same restoration years, indicating that dissipation induced by rapid wetting was the main mechanism of soil aggregate fragmentation. Under the SW and WS treatments, soils from the slopes with restoration

收稿日期: 2022-10-26

修回日期: 2023-11-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(51979147); 内蒙古自治区科技重大专项(2021ZD0007-03)

作者简介: 马佳鑫(1999—), 女, 陕西汉中, 硕士研究生, 主要从事土壤生态学研究, 1227757628@qq.com; *通信作者, 夏栋, 博士, 副教授, 主要从事生态修复与水土保持研究, xiadongsanxia@163.com

years of 18 a had the highest percentage of ≥ 2.00 mm grain size aggregates, the lowest percentage of < 0.25 mm, the largest MWD and GMD values, and the smallest K values. It could be seen that heavy rainstorm scouring might lead to soil structure instability and erosion of vegetated concrete slopes, and the soil structure of vegetated concrete slopes gradually tended to be stabilized with the increase of restoration years.

Keywords: vegetated concrete slopes; soil aggregates; Le Bissonnais method; stability; erodibility

土壤团聚体是由单个土粒间的胶结物质经凝聚而形成的多孔结构体^[1]。土壤团聚体粒径分布和稳定性不仅直接影响着土壤渗透性、持水能力、有机质含量以及微生物群落结构,同时还与降水入渗和地表径流造成的土壤侵蚀密切相关,是评价土壤质量和抗侵蚀能力的核心指标^[2-3]。研究土壤团聚体的粒径组成和稳定性对提高土壤肥力、维持土壤结构稳定以及土壤可持续利用具有重要意义。测定土壤团聚体水稳性的方法主要有传统湿筛法^[4]和 Le Bissonnais 湿筛法(LB 法)^[5]2 种。与传统湿筛法相比, LB 法模拟了 3 种湿润处理方式下的土壤结构破碎机制,分别为快速湿润(FW)处理模拟大暴雨或者浇灌导致土壤“气爆”的破坏机制,慢速湿润(SW)处理模拟小雨引起的黏粒非均匀膨胀对土壤团聚体的破坏作用,机械扰动(WS)处理则模拟雨滴打击和径流剪切力对团聚体的破坏作用^[6-7]。已有学者利用 LB 法开展了对自然土壤团聚体稳定性的研究^[8-9],而采用 LB 法对人造土壤即生态修复基材团聚体稳定性的研究却鲜有报道。

植被混凝土生态修复技术(CBS)已广泛用于解决由矿山过度开采、水利水电工程修建、高速公路治理以及市政设施完善等造成的一系列生态环境问题^[10],其生态修复基材是根据恢复区域的地质条件、气候条件、土壤理化性质和生物特性等,将水泥、土、有机物料、生态改良剂、植物种子等按一定比例均匀混合而成^[11]。植被混凝土修复技术依靠植被恢复营造良好的生境条件来改善边坡的生态环境,然而植被恢复必须以优良的基材质量为依托^[12]。程虎等^[12]对恢复 0、3、6、9、12、15 a 的植被混凝土基材氧化稳定性特征进行研究,发现随着年限增长基材养分循环受阻,基材质量下降且不利于植被生长。瞿云红等^[13]对 4 个季节的植被混凝土基材易氧化有机碳组分特征进行探究,发现气候会显著影响基材有机碳及其组分特征,秋冬季节基材有机碳氧化稳定性较

高,而夏天稳定性最低。但对于植被混凝土基材结构稳定性的研究却少有报道,采用 LB 法研究植被混凝土基材结构破碎机制的更少;此外边坡恢复初期生态修复基材具有较高的养分和肥力且结构稳定,可随着修复年限的延长,基材结构的稳定情况也有待进一步研究。笔者选择湖北省宜昌市的植被混凝土边坡土壤为研究对象,针对不同恢复年限的生态修复基材,采用 LB 法研究不同恢复年限植被混凝土边坡土壤团聚体的稳定性特征,探究造成土壤结构破坏的主要机制及恢复年限对边坡土壤团聚体稳定性的影响,以期揭示随时间变化生态修复基材质量的变化情况,并为修复后的边坡管养提供依据。

1 研究区概况

研究区位于湖北省宜昌市,属于亚热带季风性湿润气候,年平均气温 13.1~18.0 °C,无霜期 250~300 d,年平均降水量 992.1~1404.1 mm,雨水丰沛,较长的降水过程都发生在每年的 6—7 月,雨热同期,年平均日照时数 1538~1883 h,日照率 40%。所喷基材的土壤、水泥、有机质、添加剂质量比为 100.0 : 7.8 : 5.0 : 4.6;喷播方式采用干喷法;坡面基材厚度为 10 cm,基材原始 pH 为 8.49、总有机碳含量为 27.85 g/kg。

2 材料与方法

2.1 样品采集

选择研究区内 4 个具有代表性的植被混凝土恢复边坡样地,恢复年限分别对应为 1、3、5、18 a,样地信息列于表 1。于 2021 年 8 月中旬在每个样地随机设置 9 个样方,裸地和草地的样方大小为 1 m×1 m,灌木为 5 m×5 m,采集表层土壤(约厚层基材 4~8 cm 处)样品,将同样地的土样混合,去除枯枝落叶和石子,带回实验室自然风干后用于土壤团聚体的测定。

表1 不同恢复年限植被混凝土边坡样地信息

Table 1 Information on vegetated concrete slope sample sites with different restoration years

样地	恢复时间	恢复年限/a	地理位置	坡度/(°)	主要植物
CBS1	2020	1	111°22'24"E, 30°41'40"N	75	苜蓿(<i>Medicago sativa</i>), 芒(<i>Miscanthus sinensis</i>), 鸭跖草(<i>Commelina communis</i>), 一年蓬(<i>Erigeron annuus</i>), 小蓬草(<i>Erigeron canadensis</i>)
CBS3	2018	3	111°20'3"E, 30°44'49"N	78	盐麸木(<i>Rhus chinensis</i>), 紫穗槐(<i>Amorpha fruticosa</i>), 多花木蓝(<i>Indigofera amblyantha</i>), 爵床(<i>Justicia procumbens</i>), 野菊(<i>Chrysanthemum indicum</i>)
CBS5	2016	5	111°15'26"E, 30°42'1"N	80	山槐(<i>Albizia kalkora</i>), 鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>), 菎草(<i>Humulus scandens</i>), 雾水葛(<i>Pouzolzia zeylanica</i>), 狗尾草(<i>Setaria viridis</i>), 剑叶凤尾蕨(<i>Pteris ensiformis</i>), 芒(<i>Miscanthus sinensis</i>)
CBS18	2003	18	111°18'37"E, 30°43'36"N	67	构树(<i>Broussonetia papyrifera</i>), 贯众(<i>Cyrtomium fortunei</i>), 凤尾蕨(<i>Pteris cretica</i>), 野菊(<i>Chrysanthemum indicum</i>), 爵床(<i>Justicia procumbens</i>), 乌莓莓(<i>Causonis japonica</i>), 何首乌(<i>Pleuropterus multiflorus</i>)

2.2 样品分析与评价指标

采用 LB 法^[6]测定土壤团聚体分布特征。采用平均质量直径(MWD)^[4]、几何平均直径(GMD)^[15]、相对消散指数(RSI)、相对机械破碎指数(RMI)^[16]和土壤可蚀性(K)^[17]等作为土壤团聚体稳定性的评价指标。

2.3 数据统计分析

运用 SPSS 25.0 和 Excel 2016 对试验数据进行统计分析和图表制作。

3 结果与分析

3.1 不同湿润处理下 CBS 边坡土壤团聚体粒径分布特征

由表 2 可知: 3 种湿润处理方式下植被混凝土

边坡土壤团聚体不同粒径占比差异明显, 快速湿润(FW)处理下各边坡土壤团聚体粒径集中在<0.25 mm, 其占比为 29.86%~34.63%, <2.00~1.00 mm 团聚体含量较低, 其占比为 7.08%~14.28%; 慢速湿润(SW)处理下各边坡土壤团聚体粒径以 ≥2.00 mm 为主, 占团聚体总量的一半以上, 其中以 ≥5.00 mm 团聚体的占比最高, 为 37.30%~48.48%, 平均占比是 FW 处理的 3.5 倍, <0.50~0.25 mm 团聚体的含量较低, 其占比为 1.89%~13.89%; 机械扰动(WS)处理下土壤 ≥5.00 mm 团聚体占比最高, 为 21.75%~38.99%, <5.00~2.00 mm 团聚体的占比较高, 但除 CBS18 外均低于 SW 处理的, <1.00~0.50 mm 团聚体含量较低, 占比为 6.35%~11.50%。表明快速湿润对团聚体的破碎作用最大, 慢速湿润对土壤结构的破坏作用最小。

表2 不同湿润处理和恢复年限的 CBS 边坡土壤不同粒径团聚体的占比

Table 2 Percentage of soil aggregates of different grain sizes on CBS slopes with different wetting treatments and restoration years

湿润方式	恢复年限/a	样地	团聚体占比/%					
			≥5.00 mm	<5.00~2.00 mm	<2.00~1.00 mm	<1.00~0.50 mm	<0.50~0.25 mm	<0.25 mm
FW	1	CBS1	(19.14±1.21)a	(15.93±2.54)a	(9.67±3.99)ab	(9.33±0.39)c	(12.93±0.88)bc	33.00±1.61
	3	CBS3	(18.24±2.26)a	(13.86±1.67)a	(9.54±1.38)ab	(13.53±1.37)bc	(10.20±2.79)c	34.63±3.19
	5	CBS5	(6.05±0.81)b	(7.84±1.79)b	(7.08±2.28)b	(16.63±4.67)b	(28.01±1.14)a	34.38±5.96
	18	CBS18	(4.78±0.62)b	(8.03±1.82)b	(14.28±1.12)a	(27.99±1.21)a	(15.06±0.69)b	29.86±3.51
SW	1	CBS1	(37.30±2.34)b	(20.99±1.48)b	(8.85±0.48)b	(10.19±0.44)a	(13.89±2.01)a	8.78±2.61
	3	CBS3	(46.45±2.63)a	(28.63±1.06)a	(10.79±1.67)a	(3.73±0.49)b	(2.05±0.48)c	8.35±0.16
	5	CBS5	(37.61±2.34)b	(26.09±0.66)a	(12.06±0.32)a	(9.20±1.03)a	(8.71±0.87)b	6.32±0.14
	18	CBS18	(48.48±3.36)a	(27.80±4.14)a	(10.73±0.57)a	(4.93±0.68)b	(1.89±0.66)c	6.18±0.48
WS	1	CBS1	(32.82±3.73)ab	(12.91±2.34)c	(8.88±0.54)b	(10.50±1.77)a	(18.43±1.50)a	(16.46±4.94)b
	3	CBS3	(21.75±6.32)c	(21.96±5.44)b	(13.20±1.31)a	(10.76±0.49)a	(5.85±0.30)c	(26.47±1.96)a
	5	CBS5	(25.06±1.07)bc	(21.99±1.70)b	(11.74±1.60)a	(11.50±0.90)a	(14.48±1.28)b	(15.24±1.36)b
	18	CBS18	(38.99±6.30)a	(32.39±5.68)a	(11.91±0.40)a	(6.35±0.32)b	(1.74±0.30)d	(8.62±0.81)c

同列不同字母示同一湿润处理下恢复年限间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

随着恢复年限的增加, FW 处理下, ≥ 5.00 mm 团聚体占比逐年下降, 由 19.14% 降至 4.78%; 而 $< 1.00 \sim 0.50$ mm 团聚体占比的变化趋势与 ≥ 5.00 mm 团聚体的相反, 逐年增加。SW 处理下, ≥ 5.00 mm 和 $< 5.00 \sim 2.00$ mm 团聚体占比均随年限的增加上下波动, 分别在 CBS18 和 CBS3 样地最高 (48.48%、28.63%)。WS 处理下, ≥ 5.00 mm 团聚体占比先降低, 在 CBS3 样地降至最低 (21.75%), 随后又逐渐增加, CBS18 样地的 (38.99%) 最高; $< 5.00 \sim 2.00$ mm 团聚体占比逐年上升, 由 12.91% 上升至 32.39%。

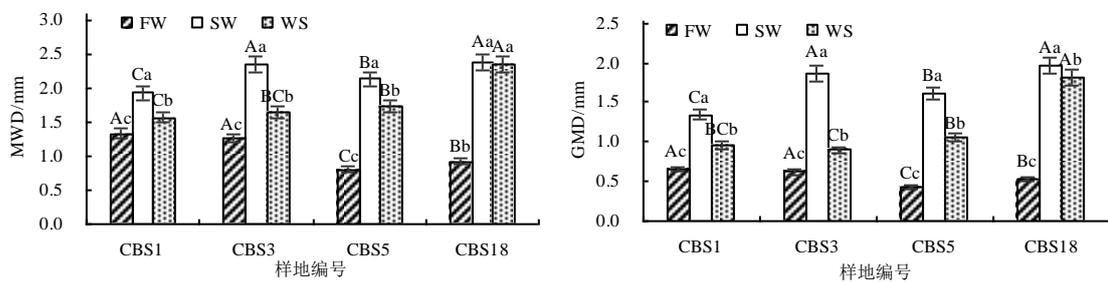


图 1 不同湿润处理和恢复年限 CBS 边坡土壤团聚体的平均质量直径和几何平均直径

Fig.1 Mean mass diameter and geometric mean diameter of soil aggregates on CBS slopes with different wetting treatments and restoration years

FW 处理下, CBS1、CBS3、CBS18、CBS5 边坡土壤团聚体 MWD 和 GMD 值依次减小, 其中 CBS1 和 CBS3 的 MWD 和 GMD 值显著 ($P < 0.05$) 高于 CBS18 和 CBS5 的; SW 处理下, CBS18、CBS3、CBS5、CBS1 边坡土壤团聚体 MWD 和 GMD 值依次减小, 且 CBS18 和 CBS3 的 MWD 和 GMD 值显著 ($P < 0.05$) 高于 CBS5 和 CBS1 的; WS 处理下, CBS18 边坡土壤的 MWD 和 GMD 值均显著 ($P < 0.05$) 高于其他恢复年限边坡的, CBS5 边坡土壤的 MWD 显著 ($P < 0.05$) 高于 CBS1 的, CBS5 边坡土壤的 GMD 显著 ($P < 0.05$) 高于 CBS3 的。

3.2.2 相对消散指数和相对机械破碎

由表 3 可知, 4 个 CBS 边坡样地 RSI 均大于 RMI, 且 CBS1、CBS3、CBS5 和 CBS18 的 RSI 分别为 RMI 的 2.54 倍、1.28 倍、2.81 倍、7.05 倍, 这表明不同恢复年限下各 CBS 边坡土壤团聚体对消散作用的敏感程度要比机械破坏作用高; RSI 呈逐年增加的变化趋势, 与 CBS1 的相比, CBS3、CBS5 和 CBS18 的 RSI 分别增加了 35.44%、

3.2 不同湿润处理下 CBS 边坡土壤团聚体的稳定性特征

3.2.1 平均质量直径和几何平均直径

由图 1 可知, 不同恢复年限 CBS 边坡土壤团聚体 MWD 和 GMD 值均表现为 SW 处理中的最高, WS 处理中的次之, FW 处理中的最低, 这表明造成不同恢复年限 CBS 边坡土壤结构破碎的主要原因是快速湿润引起的消散作用, 其次是机械扰动作用力, 而黏粒非均匀膨胀作用对团聚体的破坏力度最弱。

83.39%、92.33%, 说明 CBS18 样地土壤团聚体对消散作用最敏感, CBS5 的次之。

表 3 不同恢复年限 CBS 边坡土壤团聚体相对消散指数和相对机械破碎指数

Table 3 Relative dissipation index and relative mechanical fragmentation index of soil aggregates on CBS slopes with different restoration years

样地	恢复年限/a	RSI	RMI
CBS1	1	(39.50 ± 2.69)c	(15.54 ± 2.80)c
CBS3	3	(53.50 ± 4.40)b	(41.75 ± 5.54)a
CBS5	5	(72.44 ± 2.28)a	(25.78 ± 2.53)b
CBS18	18	(75.97 ± 2.72)a	(10.77 ± 5.58)c

同列不同字母示恢复年限间的差异有统计学意义 ($P < 0.05$)。

3.2.3 可蚀性值变化特征

由图 2 可知, 在 3 种湿润处理方式下, 不同恢复年限 CBS 边坡土壤的可蚀性值发生了较大变化: FW 处理下, CBS1、CBS3、CBS18、CBS5 的土壤可蚀性依次增大, 其中 CBS5 边坡土壤可蚀性显著 ($P < 0.05$) 高于其他 3 个样地的; SW 处理下, 土壤可蚀性表现为 CBS1、CBS5、CBS3、CBS18

的土壤可蚀性依次增大,其中 CBS1 边坡土壤可蚀性显著($P<0.05$)高于其他 3 个样地的; WS 处理下, CBS18、CBS5、CBS1、CBS3 的土壤可蚀性依次增大,其中 CBS3 边坡土壤可蚀性显著($P<0.05$)高于 CBS5 和 CBS18 的;不同恢复年限 FW、WS、SW 湿润处理的土壤可蚀性均依次减小,表明在 SW 处理下土壤团聚体稳定性最好,土壤可蚀性较低,FW 处理下土壤团聚体稳定性最差。

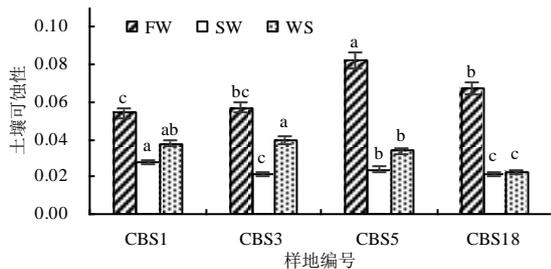


图2 不同湿润处理和恢复年限 CBS 边坡土壤的可蚀性值
图柱上不同字母示同一湿润处理下恢复年限间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

图 2 不同湿润处理和恢复年限 CBS 边坡土壤的可蚀性值
Fig.2 Erodibility values of CBS slope soils with different wetting treatments and restoration years

4 结论与讨论

本研究中,快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)、机械扰动(WS)等 3 种处理下粒径 ≥ 5.00 mm 土壤团聚体占比分别为 4.78%~19.14%、37.30%~48.48%、21.75%~38.99%;边坡土壤经过 SW、WS、FW 等 3 种湿润方式处理后 MWD 和 GMD 值均依次减小,这表明造成不同恢复年限 CBS 边坡土壤结构破碎的主要原因是快速湿润引起的消散作用,其次是机械扰动作用力,而黏粒非均匀膨胀作用对团聚体的破坏力度最小,这与韦慧等^[18]的研究结果相似。但王珊等^[19]在不同植烟年限土壤团聚体的研究中发现,WS 处理对土壤团聚体的破坏作用最大,本研究结果与其相反。由于 FW 处理方式模拟大暴雨或者浇灌对土壤团聚体的破碎作用,当土壤团聚体内部因封闭的空气进行挤压产生的压强超过土壤结构的自身承受范围,团聚体就会发生崩解,同时水分的渗入使土粒间的胶结作用减弱^[7];因此,FW 对团聚体的破坏作用最大。SW 处理模拟小雨对土壤团聚体的破坏机制,即将土壤放置在乙醇中充分饱和,消除了团聚体内压缩空气的压力,使黏粒的不均匀膨胀作用达到最大程度,但仍小于土壤毛细管张力;因此,SW 对

团聚体的破坏作用最小。WS 处理则模拟雨滴打击和径流剪切力对团聚体的破坏作用。本研究中,4 个 CBS 边坡样地 RSI 均远大于 RMI,且两者之间呈倍数关系,说明不同恢复年限下各 CBS 边坡土壤团聚体主要受消散作用破坏,并且对消散作用最为敏感,这与韦慧等^[18]的研究结果相似。此外,不同恢复年限 FW、WS、SW 处理的 CBS 边坡土壤可蚀性均依次减小,说明在 SW 处理下土壤抗侵蚀能力最强,这与杨振奇等^[20]的研究结果相同。综上可知,SW 处理下土壤最不易发生侵蚀,团聚体最具稳定性,建议植被混凝土边坡应该以滴灌技术为主,并做好大暴雨的防护措施,以此提高边坡的稳定性和抗蚀性能^[21]。

本研究中,在模拟小雨条件(SW)和机械扰动条件(WS)处理方式下,土壤团聚体 MWD 和 GMD 值在应用植被混凝土修复技术 18 a(CBS18)达到最大值,而可蚀性值则在 18 a 降至最低,说明 CBS18 样地边坡土壤稳定性最高且抗蚀性能最强,这表明边坡恢复年限的增加可提高生态恢复基材团聚体的稳定性和抗蚀性能,这与前人^[22]的研究结果相似。这可能是由于随着边坡的逐年恢复,植被开始生长发育,并发生由裸地到草本再到灌木的演替^[13],边坡的植被覆盖度提高,直接裸露在空气中的面积减少,在雨季可以有效阻止雨滴对土壤的直接击打,减弱了对土壤的侵蚀作用,团聚体稳定性得以提高。

此外,有研究^[23]表明,土壤团聚体的稳定性与土壤有机碳密切相关。有机碳作为重要的胶结物质,在团聚体的形成和稳定过程中发挥着关键作用^[24]。CBS18 样地土壤团聚体较其他边坡稳定也可能是由于随着植被演替,掉落在边坡上的大量枯枝烂叶和植物的根系残体分解促进有机物质的形成,进而提高了土壤结构的稳定性^[25]。另外,发达根系间的缠绕作用、根系分泌物以及根系对微生物活性的影响等方式都会使土壤颗粒胶结在一起促成更大粒径的团聚体,不仅能提高团聚体的稳定性,还能增加土壤的抗侵蚀能力^[26]。

参考文献:

- [1] SHINJO H, FUJITA H, GINTZBURGER G, et al. Soil aggregate stability under different landscapes and vegetation types in a semiarid area in northeastern

- Syria[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2000, 46(1): 229–240.
- [2] 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.
- [3] HE Y B, XU C, GU F, et al. Soil aggregate stability improves greatly in response to soil water dynamics under natural rains in long-term organic fertilization[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 184: 281–290.
- [4] YODER R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses(1)[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1936, B17(2001): 165.
- [5] LE BISSONNAIS Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I. theory and methodology [J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(1): 11–21.
- [6] RAMOS M C, NACCI S, PLA I. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces[J]. *CATENA*, 2003, 53(4): 365–376.
- [7] 冷暖, 邓羽松, 林立文, 等. 南亚热带不同母质发育土壤团聚体特征及其稳定性[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 80–86.
- [8] 程谅, 秦嘉惠, 张利超, 等. 应用 Le Bissonnais 法研究不同植被类型下红壤团聚体稳定性[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 855–866.
- [9] 刘雷, 安韶山, 黄华伟. 应用 Le Bissonnais 法研究黄土丘陵区植被类型对土壤团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6670–6680.
- [10] 刘黎明, 宋岩松, 钟斌, 等. 植被混凝土生态修复技术研究进展[J]. *环境工程技术学报*, 2022, 12(3): 916–927.
- [11] 许文年, 夏振尧, 周明涛, 等. 植被混凝土生态防护技术理论与实践[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
- [12] 程虎, 许文年, 向瀚宇, 等. 不同修复年限植被混凝土基材有机碳氧化稳定性特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(2): 232–238.
- [13] 瞿红云, 贾国梅, 向瀚宇, 等. 植被混凝土边坡修复基质易氧化有机碳组分季节动态[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 28–33.
- [14] VAN Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1950, 14: 20–23.
- [15] 方薇, 范弢. 滇东岩溶山地不同类型云南松林地土壤团聚体稳定性差异[J]. *水土保持通报*, 2020, 40(3): 95–102.
- [16] ZHANG B, HORN R. Mechanisms of aggregate stabilization in ultisols from subtropical China[J]. *Geoderma*, 2001, 99(1/2): 123–145.
- [17] SHIRAZI M A, BOERSMA L. A unifying quantitative analysis of soil texture[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1984, 48(1): 142–147.
- [18] 韦慧, 邓羽松, 林立文, 等. 喀斯特生态脆弱区典型小生境土壤团聚体稳定性比较研究[J]. *生态学报*, 2022, 42(7): 2751–2762.
- [19] 王珊, 毛玲. 应用 Le Bissonnais 法研究不同植烟年限土壤团聚体的稳定性[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(5): 1153–1157.
- [20] 杨振奇, 郭建英, 秦富仓, 等. 裸露砒砂岩区不同植被类型土壤团聚体稳定性与抗蚀性能[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 8–14.
- [21] 李天齐, 周明涛, 许文年, 等. 基于 Le Bissonnais 法的植被混凝土团聚体稳定性研究[J]. *水利科学与寒区工程*, 2018, 1(12): 32–36.
- [22] 赵晶, 刘美英, 郝孟婕, 等. 植被恢复对干旱区生态光伏电站土壤团聚体组成及有机碳的影响[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 137–143.
- [23] LI H, SHEN H H, CHEN L Y, et al. Effects of shrub encroachment on soil organic carbon in global grasslands [J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 28974.
- [24] HUANG R, LAN M L, LIU J, et al. Soil aggregate and organic carbon distribution at dry land soil and paddy soil: the role of different straws returning[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(36): 27942–27952.
- [25] DENG L, KIM D G, PENG C H, et al. Controls of soil and aggregate-associated organic carbon variations following natural vegetation restoration on the Loess Plateau in China[J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(11): 3974–3984.
- [26] 曹波, 曹志东, 王黎明, 等. 植物根系固土作用研究进展[J]. *水土保持应用技术*, 2009(1): 26–28.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正