

不同结皮类型对植被混凝土基材 团聚体及有机碳的影响

闫书星^{1,2}, 夏栋^{1,2}, 艾尚进^{1,2}, 马佳鑫^{1,3}, 刘芳^{1,2}, 刘黎明^{1,4}, 林茂锋²

(1.三峡大学 水泥基生态修复技术湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 2.三峡大学 水利与环境学院, 湖北 宜昌 443002; 3.三峡大学 生药与制药学院, 湖北 宜昌 443002; 4.三峡大学 土木与建筑学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要: [目的] 分析土壤团聚体分布和有机碳含量特征, 揭示生物结皮对边坡稳定和养分固持的影响, 为生物结皮在修复工程中的运用提供参考和指导意义。[方法] 以植被混凝土基材修复边坡为例, 运用土壤干筛法、土壤湿筛法分别对结皮覆盖和无结皮覆盖坡面土壤的结皮层(0—2 cm)和结皮下层(2—7 cm)团聚体和有机碳特征进行研究。[结果] ①生物结皮的存在明显影响了土壤团聚体分布、机械稳定性及 $R_{0.25}$ 含量。结皮覆盖层较CK(无结皮覆盖坡面)稳定性指标分别增加27.42%~33.51%(MWD), 21.66%~28.88%(GMD), 大团聚体含量($R_{0.25}$)增加10.68%, 且苔藓类结皮影响最为显著。②湿筛法测定的不同结皮类型土壤团聚体均以 >0.25 mm粒径为主, 其中结皮覆盖边坡的团聚体水稳性参数MWD, GMD, $R_{0.25}$ 分别介于1.93~5.33 mm, 0.85~3.16 mm, 70.97%~87.50%, 以苔藓覆盖边坡最大, D_d 值介于2.48~2.74间, 以苔藓类值最小。团聚体水稳性表现为苔藓覆盖边坡最好, 裸坡最差。③结皮的存在促进了土壤有机碳累积, 有机碳含量是CK组的两倍以上。其中对表层土壤有机碳水平提升作用明显, 对下层土壤作用较低。④土壤有机碳含量与土壤水稳性参数MWD, GMD, $R_{0.25}$ 呈显著正相关性($p < 0.05$), 有机碳水平和团聚体稳定性联系密切, 相互影响, 有机碳水平的提高对增加团聚体稳定性具有重要作用。[结论] 生物结皮的存在对修复边坡团聚体稳定和有机碳累积具有促进作用, 结皮对生态修复边坡稳定和养分固持有一定的作用, 且不同结皮类型作用强度不一, 其中苔藓类和混生结皮固土和固碳效果最优。

关键词: 生态修复; 植被混凝土; 土壤团聚体; 生物结皮; 土壤有机碳

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)03-0414-07

中图分类号: S152

文献参数: 闫书星, 夏栋, 艾尚进, 等. 不同结皮类型对植被混凝土基材团聚体及有机碳的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(3): 414-420. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20230216.001; Yan Shuxing, Xia Dong, Ai Shangjin, et al. Effects of different crust types on soil aggregates and organic carbon of vegetated concrete substrates [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(3): 414-420.

Effects of Different Crust Types on Soil Aggregates and Organic Carbon of Vegetated Concrete Substrates

Yan Shuxing^{1,2}, Xia Dong^{1,2}, Ai Shangjin^{1,2}, Ma Jiaxin^{1,3}, Liu Fang^{1,2}, Liu Liming^{1,4}, Lin Maofeng²

(1. Hubei Engineering Research Center of Cement-based Ecological Restoration

Technology, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 2. School of Water Conservancy and Environment, China Three Gorges University, Yichang, Hubei, 443002 China;

3. School of Medicine and Pharmacy, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

4. School of Civil Engineering and Architecture, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] The distribution of soil aggregates and the characteristics of organic carbon content were analyzed to determine the influence of biological crust on slope stability and nutrient retention in order to provide a reference and guidance for the application of biological crusts in slope restoration engineering. [Methods] Taking a restoration slope with vegetation concrete substrates as an example, the soil dry screening

收稿日期: 2022-09-09

修回日期: 2022-11-02

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“干旱—碱性环境下丛枝菌根对植被混凝土生态修复植物抗逆性的影响”(51979147); 内蒙古自治区科技重大专项课题“改性湖相底泥协同寒旱地区堆填场生态修复技术研究”(2021ZD0007-03)

第一作者: 闫书星(1998—), 男(汉族), 安徽省六安市人, 硕士研究生, 研究方向为边坡生态修护。Email: 2286748446@qq.com。

通信作者: 夏栋(1985—), 男(汉族), 湖北省黄冈市人, 博士, 副教授, 主要从事生态修复与水土保持相关研究。Email: xiadongsanxia@163.com。

method and the soil wet screening method were used to study aggregates in the crust (0—2 cm) and subsurface layer (2—7 cm) and organic carbon characteristics of crust-covered and non-crust-covered slope soil. [Results] ① The presence of biological crusts significantly affected the distribution of soil aggregates, mechanical stability, and $R_{0.25}$ content. Compared with the check treatment (CK, no crust-covered slope), the stability index of the crust covering layer increased by 27.42%—33.51% (MWD) and 21.66%—28.88% (GMD), and the content of large aggregates ($R_{0.25}$) increased by 10.68%. Moss crust had the most significant impact. ② Soil aggregate particle size of different crust types measured by the wet sieving method were mainly >0.25 mm. The water stability parameters MWD, GMD, and $R_{0.25}$ of the crust-covered slopes were between 1.93 and 5.33 mm, 0.85 and 3.16 mm, and 70.97% and 87.50%, with moss-covered slopes having the largest values. The D_d values were between 2.48 and 2.74, with the smallest values observed for moss-covered slopes. The water stability of aggregates was best for moss-covered slopes and worst for bare slopes. ③ The presence of crust promoted the accumulation of organic carbon in the soil, and the organic carbon content was more than twice that of the CK treatment. The effect on the organic carbon level for the surface soil was obvious, and the effect for the subsurface soil layer was low. ④ There was a significant positive correlation between soil organic carbon content and soil water stability parameters MWD, GMD, and $R_{0.25}$ ($p < 0.05$). The level of organic carbon and the stability of aggregates were closely related and affected each other. Increasing organic carbon level played an important role in increasing aggregate stability. [Conclusion] The existence of a biological crust increases aggregate stability and organic carbon accumulation of repaired slopes. The crust has a certain effect on the stability of the ecologically repaired slope and on nutrient fixation. The strength of different crust types varies, with moss and mixed crusts having the best soil fixation and carbon sequestration effects.

Keywords: ecological restoration; vegetation concrete; soil aggregates; biological crust; soil organic carbon

生物结皮是由细菌、蓝藻、真核藻类、真菌、地衣、苔藓植物与土壤表层颗粒胶结形成的有机复合体^[1],在发育过程改变了土壤的物理、化学和生物学特性,从而对地表径流入渗、侵蚀、水分蒸发、地球化学循环和生物多样性等具有独特的生态功能^[2-3]。不同类型的生物结皮对土壤碳氮固存速率和周转过程不同^[4],对土壤稳定性^[5]、土壤水侵蚀^[6]影响各有差异。然而,目前针对生物结皮对人工生态修复边坡土壤理化性质的影响研究极少。以植被混凝土修复技术为例,植被混凝土是由种植土、添加剂、水泥等合成的人造复合生态基材,可有效解决石质边坡、硬化边坡、岩质边坡、高陡岩质边坡等生态修复问题,广泛用于水电、交通、市政等工程领域^[7-8]。此项技术使得基材既有一定强度和抗冲刷能力,又能满足植物长期生长需求^[9],使得修复后的边坡上发育着大量草本和灌木,同时各植被间隔地表广泛分布着藻类、地衣、苔类和藓类等结皮,它们在边坡土壤稳固、边坡土壤侵蚀中扮演着重要角色。

土壤团聚体是形成土壤基础单元,也是评价土壤结构和质量的重要指标^[10]。影响着土壤养分、抗侵蚀及土壤有机碳的固持^[11]。土壤总有机碳含量与团聚体分布关系密切,土壤有机碳可通过胶结作用促进团聚体的形成,而团聚体可为土壤有机碳提供存储空间,

其大小、数量和分布决定着有机碳的存储与分解^[12]。因此,研究边坡土壤团聚体和有机碳特征对揭示植被混凝土修复边坡稳定性和养分持续具有重要意义。

综上所述,本文选取有代表性的结皮覆盖的植被混凝土基材修复边坡为研究对象,分析土壤团聚体分布和有机碳含量特征,揭示生物结皮对边坡稳定和养分固持的影响,为生物结皮在修复工程中的运用提供参考和指导意见。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区概况

研究地点位于湖北省宜昌市区三峡大学内(东经 $110^{\circ}18'$ — $111^{\circ}19'$,北纬 $30^{\circ}43'$ — $31^{\circ}44'$),属亚热带季风性湿润气候,有四季分明、雨热和寒旱同季的气候特征,年平均降雨量在 1 215.6 mm,年平均气温为 16.9°C ,雨水丰沛,多在夏季 6—7 月,全年积温较高, $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 的积温约 3 916.5~5 723 $^{\circ}\text{C}$,无霜期较长(250~300 d)。基材配比为种植土:水泥:有机质:添加剂=100:7.8:5:4.6,喷播方式采用干喷法,坡面基材厚度为 10 cm,基材原始的 pH 值和总有机碳分别为 8.49,27.85 g/kg。

所选试验边坡为植被混凝土基材修复的生态边坡,工程于 2004 年 3 月完工,边坡高 23 m,宽 167 m,总面积约为 4 000 m^2 ,坡度大约为 64° 。边坡原为工

程开挖形成的岩石裸露硬质坡面,后在裸露的岩石坡面喷填植被混凝土基材,形成的具备植物生长及演替条件的生态边坡。同时调查发现边坡不同高度位置上的土壤表面均分布大量的藻类、混生和苔藓生物结皮,结皮总盖度为 88%,其中藻类、混生和苔藓结皮的盖度分别为 29%,21%和 38%。

1.2 试验设计与样品采集

试验选择在 10 a 以上的植被混凝土修复边坡进行,以自然演替形成的优势藻类结皮(藻类覆盖度大于 80%)、混生结皮(包含藓类、藻类和苔类,运用网格法测定各类型结皮盖度,确定结皮盖度约为 4:2:3)和苔藓结皮(苔藓类盖度大于 80%)所覆盖下的土壤(以生物结皮为主要植被,无其余植被覆盖坡面)为研

究对象。试验设置 3 种结皮类型和空白(CK)对照(无植被生长裸露坡面)4 个组,于 2021 年 10 月,按照随机采样和多点混合的原则采集上、中、下坡位结皮覆盖地段的土样。

研究^[13]表明,结皮对土壤的改善作用主要集中在 0—5 cm 以上土层,因此试验采集 0—2 cm 结皮层和 2—7 cm 的结皮下层土样,每组采样点不少于 8 个,将同组和同土层的土壤样品混合。采样前调查边坡植被群落结构组成及结皮覆盖度(表 1),取样时,首先用铁铲去表层结皮,清除表层土壤的枯枝落叶,自上而下分层采集土壤取约 300 g 原状土样,带回实验室自然风干。将风干土分为两份,一份用于测定土壤团聚体分布,另一份用于有机碳的测定。

表 1 研究坡面基本情况

Table 1 Basic conditions of studied slope

修复技术	地理位置	坡度	主要植物	结皮特征
植被混凝土生态防护技术	30°43'36"N, 111°18'37"E	64°	构树(<i>Broussonetia papyrifera</i>)、多花木蓝(<i>Indigofera amblyantha</i>)、女贞(<i>Ligustrum lucidum</i>)、鬼针草(<i>Bidens pilosa</i>)、狗牙根(<i>Cynodon dactylon</i>)、臭牡丹(<i>Clerodendrum bungei</i>)、地钱(<i>Marchantia polymorpha</i>)、葫芦藓(<i>Funaria hygrometrica</i>)、大灰藓(<i>Hypnum plumaeforme</i>)、具鞘微鞘藻(<i>Microcoleus vaginatus</i>)、尖叶甸灯藓(<i>Plagiomnium acutum</i>)、爪哇伪枝藻(<i>Scytonema javanicum</i>)	生物结皮总盖度 88%,藻结皮相对盖度 29%,藓结皮相对盖度 42%,苔类结皮相对盖度 21%

1.3 生物结皮土壤团聚体及有机碳测定

机械稳定性团聚体含量采用干筛法^[14],按四分法分 3 次取风干后的土样 50 g,过 5,2,1,0.5,0.25 mm 孔径的筛子(上下振幅 10 cm,频率 20 次/min,持续时间 1 min),依据各孔径筛子上的团聚体质量,计算各孔径团聚体质量百分比。水稳定性团聚体含量采用湿筛法^[15]:将干筛后的土样按上述各粒径在原状土所占百分比配备混合土样 50 g 置于 TR-TTY 土壤团聚体结构分析仪套筛中,在水中浸泡 5 min,按照上下振幅 3 cm,频率 20 次/min,筛分 3 min,将各套筛上的土壤洗入烧杯,60 °C 烘箱内烘干至恒重,称重,计算各粒径的团聚体的百分比。土壤有机碳含量采用重铬酸钾外加热法^[16]测定。

1.4 数据处理与分析

利用干筛和湿筛所测团聚体粒径分布数据,分别计算土壤团聚体特征参数指标 $R_{0.25}$ 、平均重量直径(MWD)、几何平均重量直径(GMD)、分形维数(D_d)等,以指示土壤稳定性。

$$\text{MWD} = \sum_i^n \overline{x}_i W_i \quad (1)$$

$$\text{GMD} = \exp \left(\frac{\sum_i^n W_i \lg \overline{x}_i}{\sum_i^n W_i} \right) \quad (2)$$

$$R_{0.25} = M_{i>0.25} \quad (3)$$

$$D_d = 3 - \frac{\lg(W_i/W_0)}{\lg(\overline{d}_i/\overline{d}_{\max})d_{i+1}} \quad (4)$$

式中: W_i 为第 i 粒级土壤团聚体所占百分比; \overline{x}_i 为第 i 粒级土壤团聚体平均直径(mm); W_i 为直径小于 d_i 的累积质量(g); W_0 为土壤各粒径的总质量(g); d_i 为相邻粒级 d_i 与 d_{i+1} 间土粒平均直径(mm); d_{\max} 为最大粒级土粒平均直径(mm); $M_{i>0.25}$ 为 >0.25 mm 的团聚体质量。

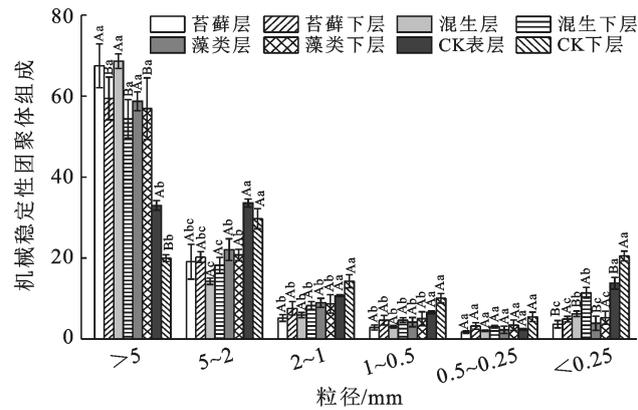
使用 Microsoft Excel 2019 软件对测定的原始数据初步整理和统计,并用 SPSS 26.0 进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Pearson 相关性分析,最后使用 Origin 2021 绘制成图表。

2 结果与分析

2.1 不同结皮类型的基材团聚体分布和有机碳特征

由图 1 可知,干筛后各结皮类型及土层团聚体含量均随着粒径的减小,呈先减后增的“V”字型变化趋势。干筛后结皮覆盖坡面 >5 mm 粒径团聚体分布均大于 CK,苔藓类、混生类和藻类分别是 CK 的 2.05、2.08、1.78 倍(表层土壤)及 2.97、2.72、2.85 倍(下层土壤), <0.25 mm 粒径团聚体分布结皮覆盖坡面略小

于CK,苔藓类、混生类和藻类分别是CK的0.26, 0.45, 0.28倍(表层土壤)及0.24, 0.56, 0.26倍(下层土壤)。而其余5个粒径团聚体分布,均表现为CK大于结皮覆盖坡面,土壤下层大于土壤表层。不同结皮类型间在 $>5, 5\sim 2, <0.25$ mm, 3个粒径团聚体分布差异性显著($p < 0.05$), >5 mm粒径团聚体分布以混生结皮表层较多为68.63%, $5\sim 2$ mm粒径团聚体分布以混生结皮层及下层最少分别为14.27%和18.21%, <0.25 mm粒径团聚体分布藻类结皮层及下层最少分别为3.89%和5.24%。各土层在 >5 mm和 <0.25 mm粒径团聚体分布间差异性显著($p < 0.05$)。其余粒径 $5\sim 2, 2\sim 1, 1\sim 0.5$ mm以及 $0.5\sim 0.25$ mm粒径团聚体中结皮层和下层差异性不显著。



注:不同小写字母表示同一土壤层在不同结皮类型间差异显著 $p < 0.05$;不同大写字母表示同一结皮类型在不同土层间差异显著 $p < 0.05$,下同。

图1 不同结皮类型及下层土壤机械稳定性团聚体粒径分布
Fig.1 Particle size distribution of aggregates with different crust types and mechanical stability of subsoil

水稳性团聚体是土壤结构保持稳定的主要因素,也是评估土壤抗侵蚀能力的重要指标^[17]。由图2可知,湿筛后的土壤团聚体总体变化趋势与干筛相似,但两者团聚体粒径分布差异较大,湿筛后 >5 mm粒径团聚体分布明显减少,而 $5\sim 2, 2\sim 1, 1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25, <0.25$ mm, 5个粒径团聚体分布均有所增加。湿筛后结皮覆盖坡面团聚依然以 >5 mm粒径为主且大于CK,苔藓类、混生类和藻类分别是CK的4.51, 2.99, 2.52倍(表层土壤)及25.50, 21.56, 8.54倍(下层土壤), <0.25 mm粒径团聚体分布结皮覆盖坡面略小于CK,苔藓类、混生类和藻类分别是CK的0.61, 1.11, 0.85倍(表层土壤)及0.75, 0.58, 0.68倍(下层土壤)。不同结皮类型在 $>5, 1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25, <0.25$ mm, 4个粒径团聚体分布差异性显著($p < 0.05$), >5 mm粒径团聚体分布苔藓结皮下层较多为64.10%, $0.5\sim 0.25$ mm和 $1\sim 0.5$ mm粒径团聚体分布以苔藓结皮

表层及下层最少分别为3.63%, 3.43%和5.14%, 4.16%, <0.25 mm粒径团聚体苔藓结皮表层及下层分布最少分别为15.91%和12.40%。不同结皮类型及土层间 $2\sim 1, 1\sim 0.5, 0.5\sim 0.25$ mm团聚体无显著性差异外,其余均表现出显著性差异($p < 0.05$)。

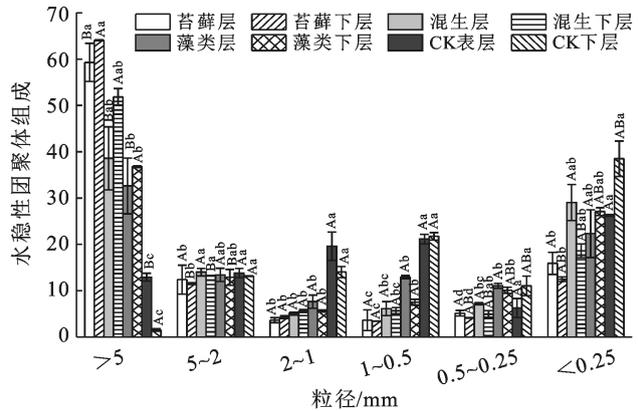


图2 不同结皮类型及下层土壤水稳定性团聚体粒径分布
Fig.2 Particle size distribution of aggregates with different crust types and lower soil water stability

由表2可知,结皮层土壤有机碳含量均略大于下层土壤,变化范围为(6.91~15.96 g/kg)。苔藓结皮层有机碳含量最高,混生结皮表层次之,藻类结皮下层有机碳含量最小,结皮表层较下层分别增加38.3%, 7.6%, 25.6%,且结皮覆盖坡面有机碳含量是CK组的1~2倍。同一结皮类型的土壤上下层间有机碳含量不具有显著性差异($p < 0.05$),不同结皮类型间土壤有机碳含量具有显著性差异($p < 0.05$)。

2.2 不同结皮类型的基材团聚体稳定性特征

平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、分形维数(D_d)以及 $R_{0.25}$ 是评价土壤团聚体稳定性^[18]。其中MWD, GMD值越大,则团聚体平均粒径团聚度越好,土体越稳定^[19];而 D_d 值则表示土壤质地及均匀程度,其值越小,团聚体稳定性越高^[20]; $R_{0.25}$ 表示大于0.25 mm土壤团聚体含量,其分布及数量特征表征土壤结构稳定性^[21]。由图3可知,4组土样的土壤机械稳定性团聚体MWD, GMD值可知,在0—2 cm和2—7 cm土层间均表现为:苔藓>混生>藻类>CK,且表层土壤的MWD和GMD值大于下层土壤。不同结皮类型及结皮层与下层MWD, GMD值差异性显著($p < 0.05$)。由图3可知,结皮覆盖坡面 $R_{0.25}$ 值大于CK,结皮层值大于下层,且苔藓结皮层值最大。同一土层中不同结皮类型的机械稳定性团聚体 $R_{0.25}$ 值差异性显著($p < 0.05$)。结皮覆盖坡面 D_d 值较CK分别降低13.15%, 6.17%, 14.05(表层土壤)及13.79%, 4.65%, 13.66%(下层土壤),表层土壤 D_d

值小于下层土壤,其中藻类结皮表层值最小,不同结皮类型覆盖土层间差异性显著($p < 0.05$)。

表 2 不同结皮类型土壤有机碳分布

Table 2 Distribution of soil organic carbon in different crust types

样地	有机碳/(g · kg ⁻¹)
苔藓层	15.96 ± 2.04 ^{Aa}
苔藓下层	12.7 ± 2.05 ^{ABa}
混生层	13.4 ± 0.32 ^{Ab}
混生下层	12.45 ± 0.31 ^{ABab}
藻类层	11.27 ± 0.48 ^{Ab}
藻类下层	8.15 ± 1.8 ^{ABb}
CK 表层	7.36 ± 0.87 ^{Ac}
CK 下层	6.91 ± 0.74 ^{ABc}

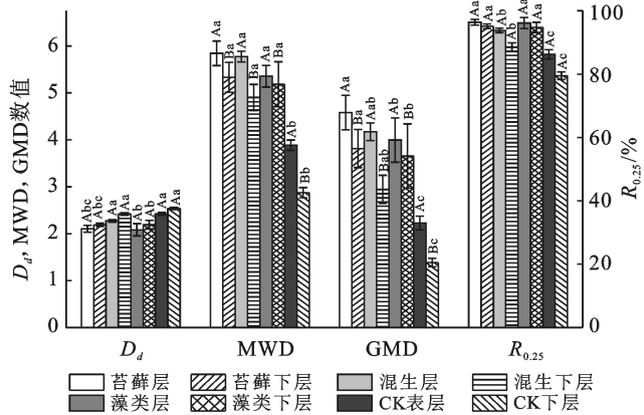


图 3 土壤机械稳定性团聚体参数 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 和 D_d

Fig.3 Aggregate parameters of soil mechanical stability MWD, GMD, $R_{0.25}$ and D_d

由图 4 可知,4 组土样的土壤水稳定性团聚体 MWD, GMD 值可知,在 0—2 cm 和 2—7 cm 土层间均表现为:苔藓 > 混生 > 藻类 > CK,且结皮覆盖的下层土壤 MWD 和 GMD 值大于表层土壤。不同结皮类型及结皮层与下层之的 MWD, GMD 值具有差异性显著($p < 0.05$)。结皮覆盖坡面 $R_{0.25}$ 值大于 CK,结皮下层值大于表层,且苔藓结皮上下层的值较大。不同结皮类型及分层间水稳定性团聚体 $R_{0.25}$ 值差异性显著($p < 0.05$)。结皮覆盖坡面 D_d 值较 CK 分别降低 4.17%, 1.28%, 2.01% (表层土壤) 及 8.77%, 6.52%, 2.18% (下层土壤),表层土壤 D_d 值大于下层土壤,其中藻类结皮表层值最小。结皮类型及分层土壤间无显著性差异。

2.3 基材有机碳和团聚体指标的相关性分析

由图 5 可知,各结皮类型表现出 > 5 mm 水稳性团聚体含量与土壤水稳性参数 MWD, GMD 间具有极显著相关性($p < 0.01$),与 $R_{0.25}$, 土壤总有机碳含量具有显著相关性($p < 0.05$),与 D_d 具有负显著相关性($p < 0.05$)。团聚体水稳性参数 MWD, GMD, $R_{0.25}$

和 D_d , 微团聚体含量(< 0.25 mm 粒径)显著负相关性($p < 0.05$)。总有机碳含量与 5~2, 2~1, < 0.25 mm 团聚体和 D_d 负相关性,与土壤水稳性参数 MWD, GMD, $R_{0.25}$ 显著正相关性($p < 0.05$),说明土壤稳定性与有机碳含量间是联系密切且相互影响,有机碳累积水平越高,胶结作用越强, MWD, GMD 值越大,土壤结构越稳定,这和已有研究结果一致。

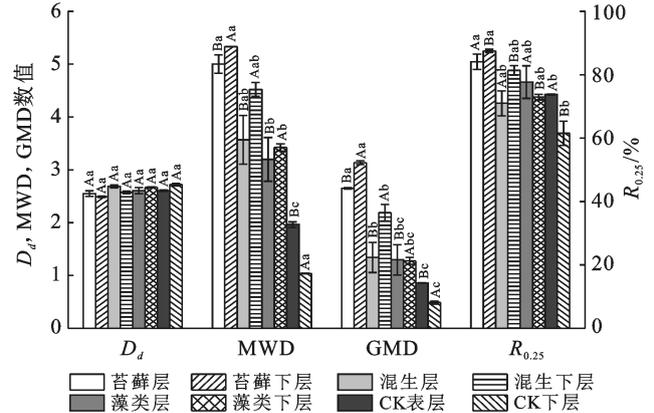
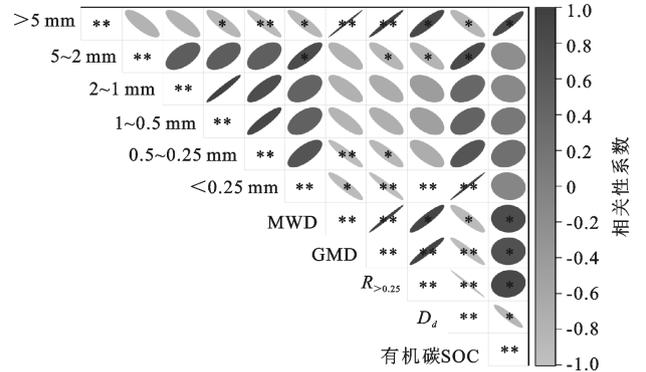


图 4 土壤水稳定性团聚体稳定性指标 D_d , MWD, GMD 和 $R_{0.25}$

Fig.4 Soil water stability aggregate stability index MWD, GMD, $R_{0.25}$ and D_d



注: * 代表显著性相关($p < 0.05$); ** 代表极显著相关($p < 0.01$)。

图 5 土壤水稳性团聚体各参数间相关性

Fig.5 Correlation among parameters of soil water stable aggregates

3 讨论

3.1 不同结皮类型对植被混凝土基材团聚体组成的影响

稳定性团聚体分布对土壤形成良好的结构及物质循环具有积极作用,而不稳定团聚体容易破碎分散成可移动土壤颗粒,加剧土壤侵蚀和养分流失^[22]。结皮覆盖坡面土体 > 5 mm 粒径团聚体分布远胜于裸坡,结皮层优于结皮下层,其中混生结皮表层分布更多。其原因可能与有机碳水平和结皮类型相关:

①有机碳是团聚体形成的主要物质基础^[23],结皮覆盖下大大提高了枯枝落叶的分解速率,累积了大量有机碳,其提供的胶结物质促进微团聚体向大团聚体转化,但随着土层的加深,胶结物质被一些物质吸附,团聚体胶结剂减少,影响着大团聚体的形成与稳定^[24];②不同结皮类型协同作用,藻类为先锋物种,在生物结皮发育初期能够向体外分泌以多糖为主的物质,促进生物结皮形成^[25],而藓类结皮会产生多糖物质与土壤颗粒结合,增加土壤稳定性^[26],协同作用增加了土壤胶结物质,增加土壤稳定性。

然而经湿筛后大团聚体容易破碎消散为微团聚体,造成土壤结构的破坏,其中结皮覆盖层表现最为明显。原因在于湿筛过程中大量溶解性有机碳、颗粒有机碳发生转移,有机碳水平降低^[27],胶结作用减弱,大团聚体破碎成微团聚体。此外,结皮和植物根系也是影响团聚体分布的可能因素之一。一方面生物结皮生成的大量假根生与分泌物,使得土颗粒紧密胶结在一起形成较稳定的大团聚体,但受假根的脆弱性和长度限制,未形成较强的抗水蚀能力,使得大团聚体遇水后分散、崩解成大量微小团聚体。另一方面生物结皮的生长发育过程中,通过菌丝体、藻丝、假根等黏结和捆绑土壤颗粒,使得土壤中孔隙增大^[28],促进土壤表层聚集的有机碳、养分随水流进入到土壤深层,促使植物根系向深层穿插,捆绑土颗粒和根系分泌物胶结作用,使得结皮下层土壤湿筛后不容易崩解。

3.2 不同结皮类型对植被混凝土基材团聚体稳定性的影响

本研究中4个评价指标均表明团聚体机械稳定性随边坡土层加深略有降低,而随着结皮向更高一级演替团聚体机械稳定性有增加趋势。其原因可能是结皮良好的保温和保水性,使土壤表层存在着大量的微生物菌丝体、藻类和地衣、苔藓的假根,通过有机质、养分淋溶和分泌物多聚糖、黏液质鞘的作用,使下层土壤条件得到改善^[29]。但是,受有机碳含量和假根长度限制,随着深度的增加有机碳水平降低,假根数量锐减,其影响程度也会随着土层深度的增加而明显下降。另一方面可能是随着生物结皮的演替,地表生物量和种类增加,改变了土壤结构,影响着土壤稳定性。而水稳定性团聚体指标表现与机械稳定略有不同,4个评价指标均表明结皮下层团聚体水稳定性略胜于结皮层,其原因可能有:①土壤入水后一部分有机碳发生迁移,胶结物质随之降低,从而影响土壤团聚体稳定性;②结皮下层土壤的作用多源于草、灌植物,其大量根系既有利于结皮层养分的淋溶,死亡根系又能分解也会逐步改善下层土壤的性状^[29]。

3.3 不同结皮类型对植被混凝土基材有机碳的影响

土壤有机碳是土壤物质的基础,是土壤肥力的主要标志,改善土壤结构,保持土壤水分,改变土壤的渗透性、腐蚀性和养分循环等特性^[30]。本研究表明,3类结皮均能增加有机碳的累积量,且主要集中于表层,其中苔藓结皮累积量最大。造成土层间有机碳含量的差异,原因可能是:①结皮假根限制,仅限于2 cm以上土层,对下层土壤影响有限;②生物结皮良好的保水性,增加了表层土壤微生物活性,增加了土壤有机碳和土壤养分的积累^[31],但是高陡边坡中坡面水流绝大部分以径流形式流出,水分淋溶作用有限,减弱了对有机碳和养分的输送作用。而苔藓结皮有较高的有机碳积累,其原因可能是:①从裸坡—藻类—混生—苔藓结皮演替过程中,结皮在坡面的粗糙度和覆盖面积有增加趋势,对大气尘土富集作用逐渐增强,使土壤有机碳和养分含量增加;②有研究表明藓结皮的固碳能力高于藻结皮^[32],藓结皮明显提高7种土壤酶活性,可能对于藓结皮提升土壤肥力具有重要的积极作用。以及生物结皮的演替,群落结构及多样性的变化促进结皮改善土壤理化性质,提高土壤酶活性^[33],促进土壤酶的分解作用,提高土壤有机碳累积。因此,微生物及土壤酶对有机碳的累积作用是一个值得进一步探讨的问题。

4 结论

(1)生物结皮的存在明显影响了植被混凝土基材土壤团聚体分布、机械稳定性及 $R_{0.25}$ 含量。结皮覆盖层较CK(无结皮覆盖坡面)机械稳定性指标分别增加27.42%~33.51%(MWD),21.66%~28.88%(GMD),大团聚体含量($R_{0.25}$)增加10.68%,且苔藓类结皮影响最为显著。

(2)湿筛法测定的不同结皮类型土壤团聚体均以 >0.25 mm粒径为主,以苔藓覆盖边坡最大, D_a 值介于2.48~2.74间以苔藓类值最小。团聚体水稳定性表现为苔藓覆盖边坡最好,裸坡最差。

(3)结皮的存在对有机碳累积具有明显的促进作用,其累积量是CK组的两倍以上。其中对土壤表层有机碳含量的提升作用明显,对下层土壤有机碳累积作用较低,苔藓类结皮固碳效果最优。

(4)土壤有机碳含量与土壤水稳性参数MWD, GMD, $R_{0.25}$ 显著正相关性($p < 0.05$),土壤总有机碳水平和团聚体稳定性联系密切,相互影响。即土壤有机碳水平的提高对于增加土壤团聚体稳定性具有重要作用。

[参 考 文 献]

- [1] Sun Fuhai. Towards moss biocrust effects on surface soil water holding capacity: Soil water retention curve analysis and modeling [J]. *Geoderma*, 2021, 399:115120.
- [2] Rodríguez-Caballero E. Ecosystem services provided by biocrusts: From ecosystem functions to social values [J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 159:45-53.
- [3] 张丙昌, 武志芳, 李彬. 黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2021, 58(5):1123-1131.
- [4] Zhao Yang. The seasonal and successional variations of carbon release from biological soil crust-covered soil [J]. *Journal of Arid Environments*, 2016, 127:148-153.
- [5] 李新荣. 荒漠生物土壤结皮生态与水文学研究[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [6] Wang Xinping. Temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture for a transect in artificial revegetation desert area, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 507:100-109.
- [7] 赵冰琴, 夏振尧, 许文年, 等. 工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J]. *水利水电技术*, 2017, 48(2):130-137.
- [8] Liu Daxiang, Xu Wennian, Cheng Zunlan, et al. Improvement test on frost resistance of vegetation-concrete and engineering application of test fruitage [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69(1):161-170.
- [9] 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.
- [10] 刘杰, 马艳婷, 王宪玲, 等. 渭北旱塬土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2019, 40(7):3361-3368.
- [11] 蒋腊梅, 白桂芬, 吕光辉, 等. 不同管理模式对于干旱区草原土壤团聚体稳定性及其理化性质的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2018, 36(4):15-21.
- [12] 尚杰, 耿增超, 赵军, 等. 生物炭对塬土水热特性及团聚体稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(7):1969-1976.
- [13] 郭轶瑞, 赵哈林, 左小安, 等. 科尔沁沙地沙丘恢复过程中典型灌丛下结皮发育特征及表层土壤特性[J]. *环境科学*, 2008, 29(4):1027-1034.
- [14] 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.
- [15] 李鉴霖, 江长胜, 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.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000:30-34.
- [17] 唐士明. 北方农牧交错区不同土地利用方式对土壤团聚体和微生物群落的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2018.
- [18] Zhang Bin, Horn R. Mechanisms of aggregate stabilization in ultisols from subtropical China [J]. *Geoderma*, 2001, 99(1/2):123-145.
- [19] 林武星, 黄雍容, 郑郁善, 等. 闽南山地不同密度桉树人工林土壤肥力的分形研究[J]. *山地学报*, 2012, 30(6):663-668.
- [20] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter (II): A normalized stability index and the effect of mineralogy [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(3):1042-1049.
- [21] 韩贞贵, 周运超, 任娇娇, 等. 马尾松人工林土壤各粒径团聚体湿筛后的有机碳分配[J]. *生态学报*, 2021, 41(23):9388-9398.
- [22] 霍琳, 杨思存, 王成宝, 等. 耕作方式对甘肃引黄灌区灌耕灰钙土团聚体分布及稳定性的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(10):3463-3472.
- [23] 谢贤健, 张继. 巨桉人工林下土壤团聚体稳定性及分形特征[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(6):175-179.
- [24] 陈曦, 王改玲, 刘焕焕, 等. 黄土高原吕梁山不同撂荒年限土壤团聚体稳定性及有机碳分布特征[J]. *土壤*, 2021, 53(2):375-382.
- [25] 赵允格, 许明祥, Jayne Belnap. 生物结皮光合作用对光温水的响应及其对结皮空间分布格局的解译: 以黄土丘陵区为例[J]. *生态学报*, 2010, 30(17):4668-4675.
- [26] 孙华方, 李希来, 金立群, 等. 生物土壤结皮对黄河源区人工草地植被与土壤理化性质的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(2):509-520.
- [27] Berhe A A, Harte J, Harden J W, et al. The significance of the erosion-induced terrestrial carbon sink [J]. *BioScience*, 2007, 57(4):337-346.
- [28] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2007(11):4662-4670.
- [29] 王新平, 肖洪浪, 张景光, 等. 荒漠地区生物土壤结皮的水文物理特征分析[J]. *水科学进展*, 2006(5):592-598.
- [30] 刘强, 穆兴民, 高鹏, 等. 土壤水力侵蚀对土壤质量理化指标影响的研究综述[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(6):386-392.
- [31] Hu Rui, Wang Xinping, Pan Yanxia, et al. The response mechanisms of soil N mineralization under biological soil crusts to temperature and moisture in temperate desert regions [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2014, 62:66-73.
- [32] 苏延桂, 李新荣, 赵昕, 等. 不同类型生物土壤结皮固氮活性及对环境因子的响应研究[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(3):332-338.
- [33] 樊瑾, 李诗瑶, 余海龙, 等. 毛乌素沙地不同类型生物结皮与下层土壤酶活性及土壤碳氮磷化学计量特征[J]. *中国沙漠*, 2021, 41(4):109-120.