

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2025.06.003

CSTR:32310.14.stbcb.2025.06.003

董悦,夏栋,闫书星,等.生物结皮对植被混凝土边坡土壤团聚体分布及稳定性的影响[J].水土保持学报,2025,39(6):75-84.

DONG Yue, XIA Dong, YAN Shuxing, et al. Effects of biological soil crusts on soil aggregate distribution and stability in vegetation concrete slopes [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(6):75-84.

生物结皮对植被混凝土边坡土壤 团聚体分布及稳定性的影响

董悦^{1,2}, 夏栋^{1,2}, 闫书星^{1,2}, 张昕雅^{1,2}, 蒋佳媛^{2,3},

刘黎明², 吴彬^{1,2}, 许阳^{1,2}, 徐博宇^{1,2}

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

摘要: [目的] 为探究在边坡生态修复技术中生物结皮对土壤团聚体分布及稳定性特征的影响机制。[方法] 以植被混凝土边坡不同生物结皮覆盖(藻结皮、混生结皮、藓结皮)土壤为研究对象,以无结皮覆盖土壤(CK)为对照,采用Le Bissonnais法分别对其不同土层(0~2、2~5 cm)土壤团聚体分布、团聚体稳定性及土壤理化属性特征进行研究。[结果] 1)与CK相比,藻结皮、混生结皮和藓结皮覆盖土壤 >0.25 mm团聚体含量($R_{0.25}$)分别增加12.53%、21.97%、30.20%(0~2 cm)和20.11%、32.00%、44.34%(2~5 cm),说明生物结皮对土壤团聚体稳定性及 $R_{0.25}$ 有显著影响,且藓结皮对提高团聚体稳定性的效果最佳。2)在LB法3种湿润处理(快速湿润FW、慢速湿润SW、预湿润振荡WS)中,各土层不同类型生物结皮覆盖下土壤团聚体稳定性均表现为 $MWD_{FW} < MWD_{WS} < MWD_{SW}$ 、 $GMD_{FW} < GMD_{WS} < GMD_{SW}$,且随着土层深度增加,平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均呈降低趋势。说明慢速湿润处理对土壤团聚体的破坏作用最小,快速湿润处理的作用最大。3)生物结皮对表层土壤有机碳(SOC)、钙结合态有机碳(Ca-SOC)及黏粒、粉粒提升作用更明显。相关性分析表明,团聚体稳定性指标(MWD、GMD、 $R_{0.25}$)与SOC、黏粒、Ca-SOC均呈极显著正相关($p < 0.01$),与RSI、RMI、砂粒呈极显著负相关($p < 0.01$),与粉粒呈正相关但不显著。说明生物结皮是通过影响土壤颗粒组成、土壤有机碳及钙结合态有机碳进而影响土壤团聚体稳定性。[结论] 生物结皮的存在能够有效增强土壤抗侵蚀能力,促进小团聚体向大团聚体形成,进而提高团聚体稳定性,改善土壤结构状况,在生态修复边坡土壤侵蚀阻控与生态系统稳定方面发挥着关键作用,可为植被混凝土边坡的建造和生物选择提供一定的科学建议。

关键词: 生物结皮; 土壤团聚体; 土壤有机碳; Le Bissonnais法; 植被混凝土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)06-0075-10

Effects of Biological Soil Crusts on Soil Aggregate Distribution and Stability in Vegetation Concrete Slopes

DONG Yue^{1,2}, XIA Dong^{1,2}, YAN Shuxing^{1,2}, ZHANG Xinya^{1,2}, JIANG Jiayuan^{2,3},

LIU Liming², WU Bin^{1,2}, XU Yang^{1,2}, XU Boyu^{1,2}

(1.College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China;

2.Hubei Provincial Engineering Research Center for Cement-based Ecological Restoration Technology,

China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China; 3.College of Biological & Pharmaceutical Sciences,

China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China)

Abstract: [Objective] To explore the influencing mechanisms of biological soil crusts on the distribution and

收稿日期: 2025-03-10

修回日期: 2025-05-05

录用日期: 2025-05-22

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-07-25

资助项目: 三峡库区地质灾害教育部重点实验室开放基金项目(2024KDZ05); 三峡大学自科重点横向项目(SDHZ2022039); 内蒙古自治区科技重大专项课题项目(2021ZD0007-03); 国家自然科学基金项目(42207544)

第一作者: 董悦(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事边坡生态修复研究。E-mail: 2127018863@qq.com

通信作者: 夏栋(1985—), 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要从事生态修复与水土保持研究。E-mail: xiadongsanxia@163.com

http://stbcb.alljournal.com.cn

stability characteristics of soil aggregates in slope ecological restoration. [Methods] Soils from vegetation concrete slopes mulched with different types of biological soil crusts (algal crusts, mixed crusts, and moss crusts) were used as research objects, with soils without crust mulching as the control group (CK). The Le Bissonnais (LB) method was applied to investigate the distribution and stability of soil aggregates and the physicochemical properties of different soil layers (0–2 cm and 2–5 cm). [Results] 1) Compared with CK, the content of >0.25 mm aggregates ($R_{0.25}$) increased by 12.53%, 21.97%, and 30.20% in the 0–2 cm layer and by 20.11%, 32.00%, and 44.34% in the 2–5 cm layer under algal crust, mixed crust, and moss crust mulching, respectively. This indicated that biological soil crusts had a significant effect on soil aggregate stability and $R_{0.25}$, with moss crusts showing the best effect in improving aggregate stability. 2) In the three wetting treatments of LB method (fast wetting-FW, slow wetting-SW, and wetting stirring-WS), the soil aggregate stability in different soil layers and under different types of biological soil crust mulching showed the trend of $MWD_{FW} < MWD_{WS} < MWD_{SW}$ and $GMD_{FW} < GMD_{WS} < GMD_{SW}$, and the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) decreased with increasing soil depth. This indicated that SW caused the least destruction to soil aggregates, while FW had the greatest effect. 3) Biological soil crusts had more pronounced effects on increasing surface soil organic carbon (SOC), calcium-bound organic carbon (Ca-SOC), clay, and silt content. Correlation analysis showed that soil aggregate stability indicators (MWD, GMD, $R_{0.25}$) were extremely significantly positively correlated with SOC, clay content, and Ca-SOC ($p < 0.01$), and extremely significantly negatively correlated with relative slaking index (RSI), relative mechanical breakdown index (RMI), and sand content ($p < 0.01$). The correlation with silt content was positive but not significant. These results suggested that biological soil crusts influenced aggregate stability by affecting soil particle composition, SOC, and Ca-SOC. [Conclusion] Biological soil crusts can effectively enhance soil erosion resistance, and promote the formation of large aggregates from smaller ones, thereby improving aggregate stability and soil structure. Thus, the biological soil crusts play a crucial role in soil erosion control during slope ecological restoration and ecosystem stabilization and can provide scientific support for the construction and species selection for vegetation concrete slopes.

Keywords: biological soil crusts; soil aggregates; soil organic carbon; Le Bissonnais method; vegetation concrete

Received: 2025-03-10

Revised: 2025-05-05

Accepted: 2025-05-22

Online(www.cnki.net): 2025-07-25

生物土壤结皮(简称生物结皮, biological soil crusts)作为连接土壤和植被的界面层,有着地表“皮肤”之称,是由细菌、蓝藻、真核藻类、地衣和藓类等隐花植物通过菌丝体、假根及多糖与土壤表层颗粒结合形成的复杂有机复合体^[1-2]。生物结皮占全球干旱、半干旱区地表覆盖的40%~70%,是旱地生态系统中的重要组成部分^[3]。已有研究^[4-5]表明,生物结皮在定殖过程中可通过自身代谢活动显著改变土壤微环境,在改善土壤表层理化性质、抑制水土流失、增强土壤稳定性及促进养分累积等方面发挥重要的生态功能。鞠孟辰等^[6]研究指出,生物结皮在发育阶段可有效促进土壤团粒结构的形成,增强表层土壤机械稳定性,从而提高土壤抗蚀性;LIU等^[7]研究发现,生物结皮借助地表覆盖、物理结合和化学吸附等机制,进而改善土壤性质并减少土壤侵蚀。当前研究主要集中于生物结皮对天然土壤团聚体分布及稳定性的影响,但在人工生态修复领域中关于生物结

皮对土壤团聚体分布、理化性质的影响研究仍相对较少。

植被混凝土技术是兼具护坡和绿化双重功能的生态修复技术,适用于各种高陡边坡,并在矿山修复领域有着广泛的应用^[8]。该技术是将水泥、土、有机质、长效肥、绿化添加剂和植物种子等按比例配合而成,可使喷播基材具有一定的强度和抗冲刷能力^[9],从而为当地植被的生长繁衍提供良好的生境条件。但目前,植被混凝土生态修复领域中的研究侧重于生境基材开发与改良^[10]、基材养分变化特征^[11]及微生物群落特征^[12]等方面。因此,开展生态修复边坡生物结皮覆盖下土壤团聚体和理化性质特征研究,对于促进植被混凝土修复边坡的结构稳定性和生态可持续性具有重要意义。

土壤团聚体在促进土壤碳固存、调节土壤水分动态及维持农作物生产力等方面发挥着重要作用^[13],也是评价土壤质量和衡量土壤可蚀性的重要指标^[14],稳

定的土壤团聚体可有效降低土壤侵蚀和剥落能力。同时,土壤有机碳作为团聚体中主要胶结物质,与团聚体稳定性密切相关,二者通过复杂的相互作用彼此影响和制约。当前土壤团聚体稳定性的测定方法主要依赖于Yoder湿筛法^[15]和Le Bissonnais(LB)法^[16]。已有学者利用LB法对不同植被类型^[17]、不同土壤类型^[18]、林地^[19]、草地^[20]等天然土壤团聚体稳定性展开了研究。针对人工生态修复基材(改良土壤),马佳鑫等^[21]以不同恢复年限植被混凝土生态修复边坡土壤为研究对象,评估快速湿润(FW)、慢速湿润(SW)和机械扰动(WS)处理下土壤团聚体的稳定性和可蚀性,但有关生物结皮条件下的人工生态修复基材团聚体稳定性研究报道较少。针对生物结皮在边坡生态修复系统中应用前景认知的局限性,本研究选取植被混凝土生态修复边坡生物结皮覆盖土壤为研究对象,采用LB法对不同类型结皮覆盖土壤团聚体分布、团聚体稳定性和土壤理化属性特征进行研究,探讨在不同生物结皮和不同破坏机制下的土壤团聚体稳定性差异,明确生物结皮在边坡生态修复领域中所扮演的重要角色,以为边坡生态修复技术的提升提供科学管理和理论支持。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于湖北省宜昌市(29°56′~31°34′N, 110°15′~112°04′E),该区域属典型亚热带湿润性季风气候,多年平均降水量1 215.6 mm,具有明显的四

季分明特点,且雨量丰沛,主要集中在夏季6—7月,气候宜人。无霜期一般在250~300 d,年平均日照时间1 538~1 883 h。土壤以黄棕壤土为主,边坡主要植被有构树(*Broussonetia papyrifera*)、野迎春(*Jasminum mesnyi*)、八角金盘(*Fatsia japonica*)、剑叶凤尾蕨(*Pteris ensiformis*),植被盖度约85%。在植物间隙中分布着大量生物结皮,类型主要包括藻结皮和藓结皮,混生结皮相对较少,其中藻结皮优势种为具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*),藓结皮主要优势物种包括大灰藓(*Hypnum plumaeforme*)、尖叶匍灯藓(*Plagiomnium acutum*)、金发藓(*Polytrichum commune*)。

1.2 样品采集

本研究选取1个具有代表性的植被混凝土生态修复边坡,以边坡上发育良好的藻结皮(覆盖度不小于60%)、混生结皮(藓结皮和藻结皮总覆盖度不低于60%)和藓结皮(覆盖度不小于60%)覆盖土壤为研究对象,无结皮覆盖土壤(CK)为对照。通过调查发现边坡植被群落以灌木为主,故在坡面设置3个5 m×5 m标准样地,每个样地内布设3个1 m×1 m典型样方,于2024年5月中旬分别采集各样方生物结皮和裸土下的0~2、2~5 cm土层土壤,将相同结皮类型和土层深度下的土样混合装入铝盒后带回实验室,用手轻轻掰成直径为10 mm左右的小块,并用镊子小心去除植物根系、石头等杂质,自然风干后用于土壤理化性质和团聚体的测定。土壤覆盖类型见图1。

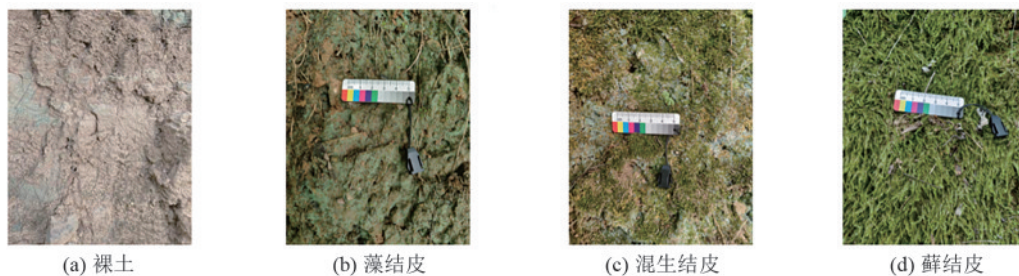


图1 土壤覆盖类型

Fig. 1 Soil mulching types

1.3 土壤指标测定方法

采用Le Bissonnais法^[16]测定土壤水稳定性团聚体,试验包括3种湿润处理方法,以模拟不同环境条件下土壤团聚体的破碎机制。采用干筛法选取3~5 mm土样,置于40℃烘箱中烘干24 h,使土壤团聚体的含水率趋于一致。随后,分别对土样进行快速湿润(FW)、预湿润振荡(WS)和慢速润湿(SW)3种处理,处理完成后,将团聚体冲洗至浸泡在乙醇中的不锈钢套筛中(套筛孔径依次为2、1、0.5、0.25、0.053 mm),以均匀的幅度将筛子上下振荡20次,振荡结束后,将留

在各筛网上的团聚体进行烘干并称重,获得各粒径团聚体质量百分数。

土壤有机碳采用重铬酸钾-外加热法^[22]测定;土壤颗粒组成采用激光粒度分析仪测定,根据国际制土壤粒径分为土壤黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和砂粒(2~0.02 mm);钙结合态有机碳采用硫酸钠溶解法分离提取,用重铬酸钾外-加热法测定提取液中的有机碳。

土壤团聚体稳定性以>0.25 mm大团聚体含量($R_{0.25}$)、平均重量直径(MWD)和几何平均直径

(GMD)表示,计算方法^[23]为:

$$R_{0.25} = \frac{M_{i>0.25}}{M_T} \times 100\% \quad (1)$$

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (2)$$

$$GMD = \exp\left(\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i\right) \quad (3)$$

式中: $M_{i>0.25}$ 为 >0.25 mm的团聚体质量之和,g; M_T 为各粒径团聚体质量之和,g; X_i 为第*i*粒径团聚体的平均直径,mm; W_i 为第*i*粒径团聚体占有所有粒径团聚体的质量分数,%。

通过LB法测定的团聚体粒径分布数据,计算出相对消散指数(RSI)和相对机械破碎指数(RMI),从而评估消散作用和机械破碎作用对团聚体破坏的敏感性^[24]。

$$RSI = \frac{(MWD_{sw} - MWD_{fw})}{MWD_{sw}} \times 100\% \quad (4)$$

$$RMI = \frac{(MWD_{sw} - MWD_{ws})}{MWD_{sw}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: MWD_{fw} 、 MWD_{ws} 、 MWD_{sw} 分别为快速湿润、预湿润振荡及慢速湿润处理条件下土壤团聚体的平均重量直径。

1.4 数据处理与分析

使用Excel 2019软件进行数据初步整理,利用

SPSS 26.0软件对不同结皮类型覆盖土壤团聚体及土壤理化属性进行单因素方差分析(ANOVA),利用Pearson相关法分析土壤团聚体稳定性指标与土壤理化属性的相关性。所有数据统计分析借助SPSS 26.0软件完成,绘图采用Origin 2021软件完成。

2 结果与分析

2.1 不同结皮类型覆盖下土壤团聚体分布特征

由表1可知,3种不同湿润处理下,植被混凝土边坡不同类型生物结皮覆盖土壤团聚体分布差异显著($p<0.05$)。FW处理下,在0~2 cm土层,土壤团聚体粒径主要集中在 >2 mm,其次为2~1 mm,分别为27.48%~97.73%和12.69%~42.64%。混生结皮中 >2 mm团聚体粒径占比高于藻结皮和藓结皮,而藓结皮覆盖的土壤中分布着最少的微团聚体;在2~5 cm土层,除藓结皮组外,各组团聚体粒径均以 <0.053 mm为主,0.25~0.053 mm粒径次之,为11.96%~39.59%和18.75%~31.25%。SW处理和WS处理条件下的团聚体粒径分布特征呈现显著相似性,表现为各结皮类型覆盖土壤水稳定性团聚体占比均随着粒径的减小呈现先降低后升高的趋势,在0~2 cm土层,团聚体粒径均以 >1 mm为主,占团聚体总量的1/2以上,其中 >2 mm团聚体占比最高,为18.81%~96.44%。

表1 不同湿润处理方式下各结皮类型覆盖土壤团聚体粒径分布特征

Table 1 Particle size distribution characteristics of soil aggregates under different wetting treatments for various biocrust types

湿润方式	土层深度/cm	结皮类型	土壤团聚体占比/%					
			>2 mm	2~1 mm	1~0.5 mm	0.5~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
FW	0~2	CK	20.67±1.94b	16.07±1.45b	8.33±5.12a	13.20±1.06a	12.53±3.41a	29.20±5.37a
		藻结皮	26.33±1.17b	19.27±3.83b	12.73±1.14a	7.33±0.64b	12.33±1.45a	22.00±1.25b
		混生结皮	40.87±4.54a	14.26±3.06b	8.13±3.06a	7.80±2.46bc	15.13±3.52a	13.80±1.78c
		藓结皮	39.00±6.24a	20.34±5.67a	11.67±1.89a	4.87±1.30c	13.40±2.25a	10.73±0.61c
	2~5	CK	10.73±4.28c	9.67±0.58c	10.53±4.94a	14.40±2.14a	21.00±1.40a	33.60±2.65a
		藻结皮	16.80±3.80b	14.50±2.66bc	13.47±1.01a	9.73±3.53b	19.00±2.31ab	26.47±3.58b
		混生结皮	20.60±0.95ab	19.00±4.41ab	11.80±1.44a	8.40±1.73b	16.00±2.78bc	24.07±3.20b
		藓结皮	25.87±2.80a	21.87±4.16a	12.13±3.63a	5.67±2.02c	13.67±3.25c	20.80±3.22b
SW	0~2	CK	35.46±2.14d	19.90±2.23ab	13.13±2.08a	3.60±1.59a	9.33±0.70a	18.53±2.40a
		藻结皮	42.13±2.86c	21.87±3.53a	11.07±2.40a	3.00±0.87a	7.40±0.92a	14.53±1.70b
		混生结皮	57.00±1.51a	16.27±1.60b	6.27±1.70b	3.93±0.95a	8.20±1.22a	8.33±2.10c
		藓结皮	50.27±2.60b	19.80±1.20ab	14.67±2.20a	3.13±0.61a	9.00±1.40a	3.13±0.50d
	2~5	CK	23.67±3.48c	17.20±2.62a	11.07±1.68a	7.40±0.72a	18.07±1.17a	22.60±0.92a
		藻结皮	29.00±4.41bc	16.80±1.06a	12.33±1.21a	4.93±0.61b	15.60±5.60b	21.20±2.40ab
		混生结皮	35.13±1.55b	19.13±4.94a	10.67±1.42a	6.40±3.27b	11.13±2.14c	17.53±3.01b
		藓结皮	41.06±3.61a	21.00±8.07a	11.40±3.65a	5.33±3.52b	11.00±4.85c	9.67±2.39c
WS	0~2	CK	24.47±1.75c	21.67±2.44a	14.67±4.60a	5.07±2.05a	10.87±2.00a	23.27±1.90a
		藻结皮	36.07±1.10b	19.00±2.40ab	9.93±2.31ab	6.00±1.97a	9.00±0.72a	20.00±0.92b
		混生结皮	48.07±3.58a	16.53±1.96b	7.27±2.34b	5.00±3.22a	12.13±2.02a	11.00±1.11c
		藓结皮	46.13±3.53a	16.53±2.47b	13.00±2.42ab	7.20±2.03a	12.67±2.72a	4.47±1.27d
	2~5	CK	15.47±1.21b	15.33±2.77b	15.80±6.05a	9.30±1.03ab	18.87±1.79a	25.20±4.20a
		藻结皮	21.87±5.50b	15.13±2.01b	10.50±2.19ab	13.40±5.84a	15.87±3.33ab	23.20±0.92a
		混生结皮	30.67±1.21a	15.53±4.20b	11.70±2.34ab	6.30±2.69ab	12.73±2.02b	23.00±2.55a
		藓结皮	33.00±4.39a	25.07±3.40a	8.73±0.42b	10.00±0.35b	14.07±1.70b	9.13±5.35b

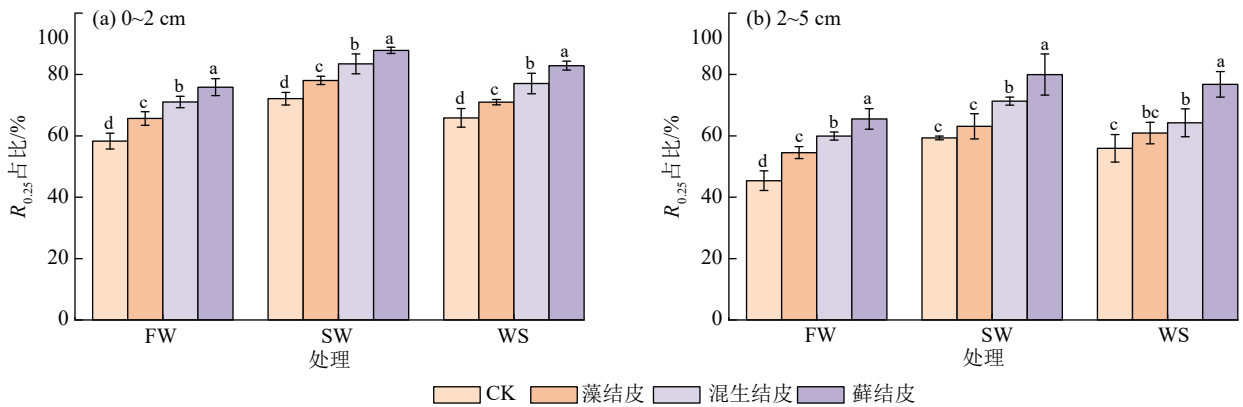
注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各土层不同类型生物结皮在同一湿润处理条件下差异显著($p<0.05$)。下同。

由图 2 可知,大团聚体含量 $R_{0.25}$ 总体表现为 $SW > WS > FW$,并随着土层深度的增加逐渐降低。表明快速湿润处理对土壤团聚体的破碎作用最大,慢速湿润处理的破坏作用最小。相较于 CK,藻结皮、混生结皮和藓结皮的 $R_{0.25}$ 占比分别增加 12.53%、21.97%、30.20% (0~2 cm) 和 20.11%、32.00%、44.34% (2~5 cm),表明藻结皮对大团聚体的形成具有促进作用,但效果不如混生结皮和藓结皮。

2.2 不同结皮类型覆盖下土壤团聚体稳定性特征

由图 3 可知,各结皮类型覆盖坡面团聚体稳定性

指标 MWD 和 GMD 值分别达到 CK 的 1.26~1.83、1.68~2.14 倍。LB 法湿润处理后的团聚体稳定性指标均表现为藓结皮 > 混生结皮 > 藻结皮 > CK。进一步分析结果显示,不同湿润处理方式对团聚体稳定性影响显著,具体表现为 $MWD_{FW} < MWD_{WS} < MWD_{SW}$ 、 $GMD_{FW} < GMD_{WS} < GMD_{SW}$,且随着土层深度增加,MWD 与 GMD 值均呈现显著递减趋势。表明在 3 种不同湿润处理中,慢速湿润处理后的土壤团聚体稳定性最强,快速湿润处理最弱,且表层土壤 (0~2 cm) 团聚体稳定性大于下层土壤 (2~5 cm)。



注:图柱上方不同小写字母表示不同类型生物结皮在同一湿润处理条件下差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 2 不同湿润处理方式下各结皮类型覆盖土壤大团聚体占比 ($R_{0.25}$)

Fig. 2 Macro-aggregate contents ($R_{0.25}$) under different wetting treatments for various biocrust types

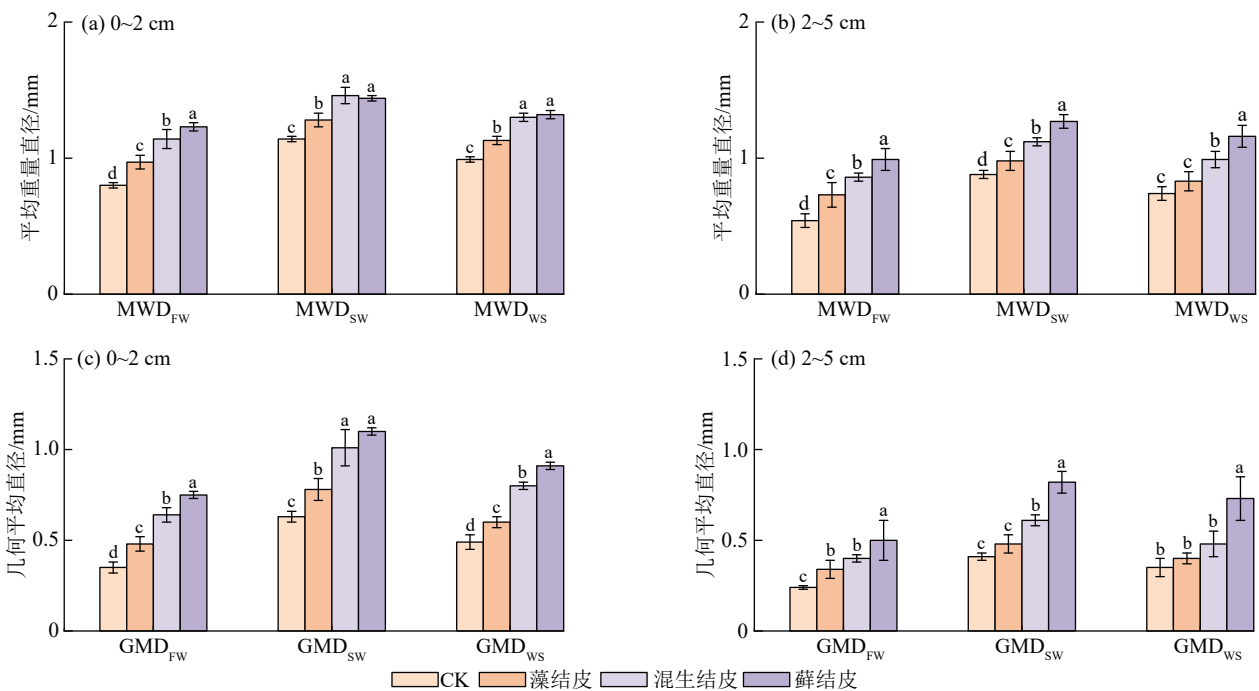


图 3 不同类型生物结皮覆盖下土壤团聚体稳定性特征

Fig. 3 Soil aggregate stability characteristics for different biocrust types

由图 4 可知,RSI 和 RMI 值的变化趋势与 MWD 和 GMD 值相反,总体随土层深度的增加而增大,且在不同土层均有显著性差异 ($p < 0.05$)。RSI 值远大于 RMI 值,表明雨滴、径流等外应力作用下对团聚体的破坏远

远小于快速湿润下土壤孔隙气体压力造成的破坏。

2.3 土壤团聚体稳定性与土壤基本理化性质的相关性

由表 2 可知,藻结皮、混生结皮、藓结皮和 CK 在

0~2 cm 土层 SOC 质量分数平均值分别为 7.57、9.56、12.61、5.56 g/kg;黏粒占比平均值分别为 49.27%、52.41%、60.05% 和 46.09%;粉粒占比平均值分别为 34.00%、33.77%、33.00% 和 31.39%;砂粒占比平均值分别为 16.73%、13.82%、6.95% 和 22.52%;Ca-SOC 质量分数平均值分别为 3.27、4.30、5.96、1.98 g/kg,表明不同类型生物结皮均能显著提高土壤各理化指标。

随着土层深度的增加,不同类型生物结皮和 CK 土壤中的 SOC、Ca-SOC、黏粒及粉粒占比整体上均呈下

降趋势,砂粒占比呈上升趋势。同时,相较于 CK,藓结皮覆盖土壤中各理化性质最高(砂粒除外),表明土壤理化指标随着生物结皮的演替均呈上升趋势。

由图 5 可知,团聚体稳定性指标 MWD、GMD、 $R_{0.25}$ 与 SOC、黏粒、Ca-SOC 均呈极显著正相关($p < 0.01$),与 RSI、RMI、砂粒呈极显著负相关($p < 0.01$),与粉粒呈正相关但不显著。总体而言,SOC、Ca-SOC、黏粒和粉粒等理化因子综合影响不同类型生物结皮覆盖土壤团聚体稳定性指标。

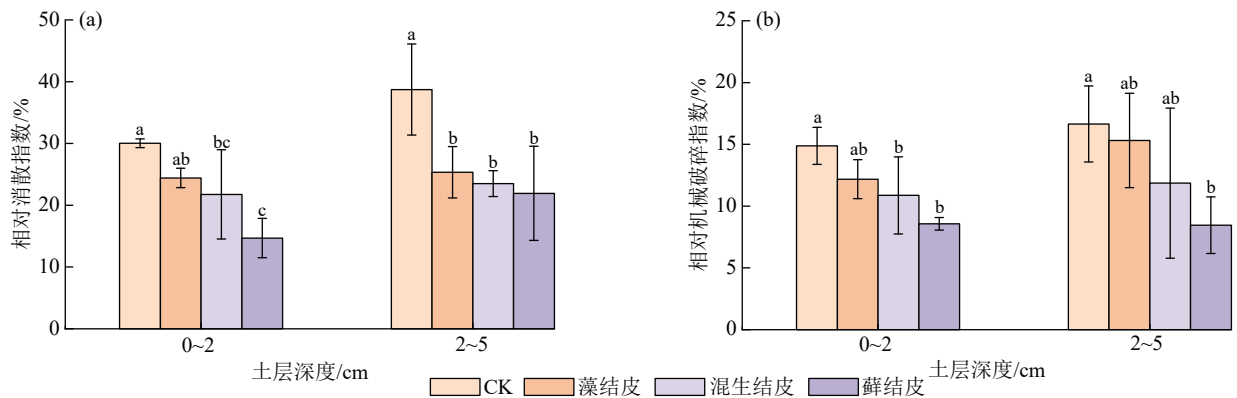


图 4 各土层不同类型生物结皮覆盖土壤相对消散指数和相对机械破碎指数

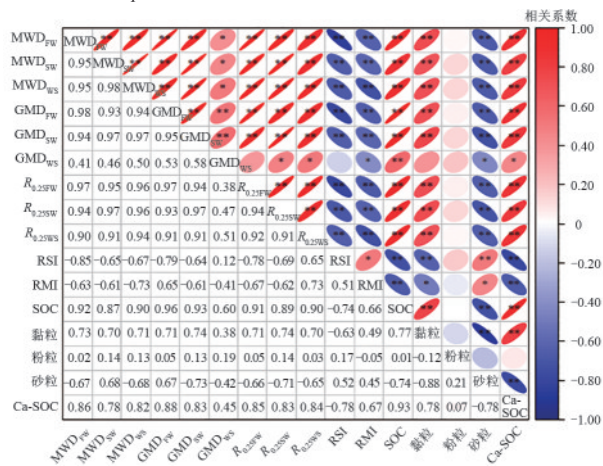
Fig. 4 Relative slaking indices (RSI) and relative mechanical breakdown indices (RMI) for various biocrust types in each soil layer

表 2 不同类型生物结皮覆盖下的土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties for different biocrust types

结皮类型	土层深度/cm	土壤有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	钙结合态有机碳/ ($g \cdot kg^{-1}$)
CK	0~2	5.56±0.29Ad	46.09±5.29Ac	31.39±1.53Ac	22.52±5.51Ba	1.98±0.16Ad
	2~5	4.55±0.12Bd	39.35±7.02Bb	30.67±2.52Bb	29.98±5.51Aa	1.58±0.11Bd
藻结皮	0~2	7.57±0.41Ac	49.27±6.11Ab	34.00±2.00Aa	16.73±10.50Bab	3.27±0.17Ac
	2~5	5.49±0.12Bc	46.00±5.00Bab	30.04±3.51Bd	23.96±4.73Ab	2.57±0.22Bc
混生结皮	0~2	9.56±0.11Ab	52.41±5.51Aab	33.77±2.52Bb	13.82±6.11Bab	4.30±0.25Ab
	2~5	6.74±0.12Bb	47.19±5.51Bab	36.28±2.65Aa	16.53±5.77Aab	3.92±0.38Bb
藓结皮	0~2	12.61±0.36Aa	60.05±2.65Aa	33.00±2.65Ab	6.95±5.00Bb	5.96±0.15Aa
	2~5	9.23±0.07Ba	55.62±4.62Ba	32.55±2.08Bc	11.83±6.66Ab	5.08±0.64Ba

注: 同列不同小写字母表示同一土层在不同类型生物结皮间差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示同一类型生物结皮在不同土层间差异显著($p < 0.05$)。



注: *表示显著性相关($p < 0.05$); **表示极显著相关($p < 0.01$)。

图 5 土壤团聚体稳定性与理化性质的相关性

Fig. 5 Correlation analysis between soil aggregate stability and physicochemical properties

3 讨论

3.1 不同结皮类型覆盖下土壤团聚体分布及稳定性的差异

土壤团聚体的组成、数量、大小及稳定性是评价土壤结构的重要因素^[25]。本研究发现,混生结皮和藓结皮覆盖边坡土壤团聚体稳定性显著优于藻结皮,其中藓结皮覆盖下土壤大团聚体含量最多, MWD和GMD值最高;随着土层深度增加,裸土和生物结皮覆盖边坡土壤稳定性指标 MWD和GMD均减小。其原因可能与土壤颗粒组成、有机碳库及生物结皮类型存在显著关联:一方面,有机碳是促进团聚体形成的关键因素,对团聚体稳定性发挥着重要作用^[26],在生物结皮的演替进程中,其分泌物、凋落物及动植物残体等成分被微生物分解,转化为腐殖

土,使得土壤表层有机质与胶结质含量得以提高,从而增强土壤颗粒间的静电引力^[27],为土壤颗粒的吸附固持创造有利条件,促进大团聚体的增加。然而,随着土层深度增加,土体中的胶结物质(如有机碳等)因受次生矿物或黏粒组分的吸附固定作用,导致团聚体中胶结剂含量下降,进而降低团聚体稳定性^[24];另一方面,藻结皮通过分泌胞外多糖来固定松散土壤颗粒,从而提高土壤团聚体稳定性^[28]。藓结皮通过利用假根延伸体及植物分泌物黏结细小的土壤颗粒,且部分假根与菌丝体能够相互交织缠绕形成网状结构,其捆绑作用增强,提高土壤颗粒间的胶结作用,使土壤结构更加稳定^[29]。

本研究发现,FW处理相比其他处理方式,大团聚体含量显著降低,微团聚体含量增加,与卢升高等^[30]研究结果相同。是由于FW处理将土样快速置于水中,土壤孔隙中空气受压,当压力超过土壤所能承受的上限时,团聚体则受压爆破,消散成小颗粒。本研究中FW处理后的土壤依然以 >0.25 mm粒径团聚体为主,与王珊等^[31]研究指出的FW处理后土壤分布以微团聚体为主的结论不同。其原因可能是:1)结皮紧贴地面匍匐生长,且叶片背面有大量的假根与表层土壤紧密连接及分泌的多聚糖,束缚和胶结作用限制土壤崩解和消散;2)植被混凝土技术中添加水泥胶结剂有效增加土壤的强度和抗冲刷能力,使土壤在FW处理模拟暴雨条件下也能保持大团聚体结构稳定,不易被崩解和分散。

3.2 不同结皮类型覆盖下土壤理化性质的变化特征

土壤有机碳不仅是土壤肥力的物质基础,也是土壤质量的重要组成部分,在改善土壤结构,改变土壤渗透性、腐蚀性和土壤养分循环等方面发挥着重要作用^[32]。本研究得出,生物结皮覆盖坡面土壤有机碳和钙结合态有机碳含量均高于CK,且藓结皮覆盖土壤含量最高,但主要集中于0~2 cm土层。可能原因是:1)生物结皮具有养分聚集效应,受假根限制,生物结皮仅作用于0~2 cm土层,对下层土壤影响有限^[33];2)生物结皮在调控土壤理化性质方面具有重要作用,藻结皮-混生结皮-藓结皮的演替变化为固碳类微生物提供适宜的生态环境,从而促进有机碳含量的积累^[34];3)相较于藻结皮和混生结皮,藓结皮具有更加完整的生理结构,与土壤间的物质交换能力更强。

研究表明,在生物结皮覆盖土壤中,黏粒和粉粒占比显著高于裸土,而砂粒占比较低,且砂粒占比随土层深度增加而逐渐升高。可能是由于藓植株相互穿插缠绕在土壤表层形成致密覆盖层,可捕获更

多富含养分的大气尘土,降低雨滴击溅和风蚀导致的细颗粒流失^[35],同时,生物结皮分泌的黏液和糖类物质将土壤细颗粒固定为稳定团聚体。而砂粒因粒径大、迁移性强,在重力分选和渗透限制作用下向深层富集,加之生物结皮对表层孔隙的堵塞进一步抑制砂粒滞留,导致表层砂粒含量较裸土降低。

3.3 不同破坏机制下土壤团聚体的差异

应用LB法测定不同结皮类型覆盖下土壤团聚体稳定性,结果表明,在3种不同湿润处理下,FW处理后的微团聚体占比最多且对土壤团聚体破坏性最大,WS次之,SW破坏性最小,与韦惠等^[36]研究结果一致,说明FW处理所产生的消散效应是土壤团聚体破坏的主要因素。是因为FW处理模拟暴雨或灌溉时土壤团聚体被快速水浸的情形,此时水分压缩团聚体孔隙中的空气,气体压强增大,一旦气压超过其承受极限,会在土体孔隙间引发“气爆”现象,同时水分的渗透作用会削弱土体颗粒之间的胶结作用^[37],最终导致团聚体发生崩解,因此对团聚体的破坏作用最大,此过程被称为“消散作用”^[38];WS处理模拟的是雨水击打对团聚体的破坏作用,强调的是机械扰动作用;SW处理模拟的是小雨或者滴灌条件下土壤团聚体破坏机制,强调差异性黏粒膨胀作用^[17],即将团聚体置于乙醇中进行缓慢而充分的饱和,与快速湿润处理相比,土壤的不均匀胀缩能力很小,从而对土壤团聚体的破坏作用相对最小。在评估团聚体对不同破坏机制的敏感程度时,采用相对消散指数(RSI)和机械破碎指数(RMI)进行分析^[36],结果表明,不同结皮覆盖土壤的RSI远高于RMI,甚至呈现出倍数上的差异,说明大雨或暴雨条件是导致土壤团聚体破碎的主要机制,且对消散作用的敏感度高于机械破坏作用。

4 结论

1)生物结皮对土壤团聚体分布、稳定性及 >0.25 mm团聚体含量 $R_{0.25}$ 有着显著影响。与CK相比,有结皮覆盖的土壤团聚体稳定性指标MWD、GMD值分别增加1.26~1.83、1.68~2.14倍, $R_{0.25}$ 增加1.06~1.44倍,且藓结皮对提高团聚体稳定性的效果最佳,可提高20.39%~24.35%。

2)在不同湿润处理方式下, $R_{0.25}$ 占比总体表现为 $SW>WS>FW$,并随着土层深度的增加逐渐降低,表明快速湿润处理对土壤团聚体的破碎作用最大,慢速湿润处理的破坏作用最小。

3)生物结皮的存在促进了土壤有机碳、钙结合态有机碳、黏粒及粉粒含量的累积,且对表层(0~2 cm)土壤养分水平提升作用更明显,可提高18.24%~26.82%。

4)相关性分析结果表明,土壤颗粒组成、土壤有机碳、钙结合态有机碳是影响植被混凝土边坡团聚体稳定性的主要因素。

参考文献:

- [1] 毕银丽,郭芸,刘峰,等.西部煤矿区生物土壤结皮的生态修复作用及其碳中和贡献[J].煤炭学报,2022,47(8):2883-2895.
BI Y L, GUO Y, LIU F, et al. Ecological restoration effect and carbon neutrality contribution of biological soil crusts in western mining area[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(8): 2883-2895.
- [2] SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Towards moss biocrust effects on surface soil water holding capacity: Soil water retention curve analysis and modeling [J]. *Geoderma*, 2021, 399: e115120.
- [3] XIE T, SHI W, YANG H, et al. Variations in organic carbon mineralization of the biological soil crusts following revegetation in the Tengger Desert, North China [J]. *Catena*, 2023, 222: e106860.
- [4] 谷康民,杨凯,赵允格,等.黄土丘陵区不同盖度生物结皮对坡面产流及SCS-CN模型CN值的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):132-137.
GU K M, YANG K, ZHAO Y G, et al. Effects of biological soil crusts' coverage on slope runoff and the CN value of SCS-CN model in hilly loess plateau region [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(1): 32-137.
- [5] 麻云霞,王月林,李钢铁,等.生物地毯治沙工程-生物结皮现状的研究进展[J].草地学报,2019,27(3):531-538.
MA Y X, WANG Y L, LI G T, et al. Research progress on the status of biological crust-a kind of biological carpet sand control engineering [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, 27(3): 531-538.
- [6] 鞠孟辰,卜崇峰,王清玄,等.藻类与微生物添加对高陡边坡生物结皮人工恢复的影响[J].水土保持通报,2019,39(6):124-128.
JU M C, BU C F, WANG Q X, et al. Effects of algae and microorganism addition on restoration of biocrusts on steep slope [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(6): 124-128.
- [7] LIU F, ZHANG G H, SUN F, et al. Quantifying the surface covering, binding and bonding effects of biological soil crusts on soil detachment by overland flow [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2017, 42(15): 2640-2648.
- [8] 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.
ZHAO B Q, XIA Z Y, XU W N, et al. Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area [J]. *Water Resources and Hydropower* Technology, 2017, 48(2): 130-137.
- [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.
LIU L M, SONG Y S, ZHONG B, et al. Re-search progress on ecological restoration technology of concretes biotechnical slope [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12(3): 916-927.
- [10] 夏振尧,洪焕,高峰,等.水泥添加量及其养护时长对基材抗蚀性的影响[J].中国水土保持科学,2021,19(1):115-121.
XIA Z Y, HONG H, GAO F, et al. Influence of cement addition amount and maintenance duration on the erosion resistance for ecological restoration substrate [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021, 19(1): 115-121.
- [11] 刘大翔,刘德玉,童标,等.冻融循环作用下植被混凝土团聚结构变化对养分固持能力的影响[J].冰川冻土,2022,44(2):623-633.
LIU D X, LIU D Y, TONG B, et al. Effect of aggregate structure change in vegetation concrete on nutrient retention ability under freeze-thaw cycles [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2022, 44(2): 623-633.
- [12] XIA L, ZHAO B Q, LUO T, et al. Microbial functional diversity in rhizosphere and non-rhizosphere soil of different dominant species in a vegetation concrete slope [J]. *Biotechnology and Biotechnological Equipment*, 2022, 36(1): 379-388.
- [13] 马征,李振轮,杨裕然,等.土壤生物驱动团聚体形成及稳定的机制与相关应用研究进展[J/OL].土壤学报,2025, <https://link.cnki.net/urlid/32.1119>. P. 20250122. 1118.002.
MA Z, LI Z L, YANG Y R, et al. Research progress on the mechanism and related application of soil bio-driven aggregates formation and stability [J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, <https://link.cnki.net/urlid/32.1119>. P. 20250122. 1118.002.
- [14] XIAO B, MA S, HU K. Moss biocrusts regulate surface soil thermal properties and generate buffering effects on soil temperature dynamics in dryland ecosystem [J]. *Geoderma*, 2019, 351: 9-24.
- [15] YODER R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses 1 [J]. *Agronomy Journal*, 1936, 28(5): 337-351.
- [16] 肖海,高峰,邵艳艳,等.土壤原始颗粒对不同破碎机制下团聚体稳定性的影响[J].土壤学报,2021,58(3):649-656.
XIAO H, GAO F, SHAO Y Y, et al. Influence of native soil particles on soil aggregate stability relative to breaking-down mechanism [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 649-656.
- [17] 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.
- CHENG L, QIN J H, ZHANG L C, et al. Application of Le Bissonnais method to study soil aggregate stability in red soils under different types of vegetation [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(4):855-866.
- [18] 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.
- LENG N, DENG Y S, LIN L W, et al. Characteristics and stability of soil aggregates developed from different parent materials in the south subtropical region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(5):80-86.
- [19] 蒋春晓,王彬,王玉杰,等.基于LB法的缙云山典型林分土壤团聚体的稳定性[J].中国水土保持科学,2020,18(2):52-61.
- JIANG C X, WANG B, WANG Y J, et al. Soil aggregate stability of typical forest stands in the Jinyun Mountain based on Le Bissonnais method [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(2):52-61.
- [20] 杨倩,朱大运,陈静,等.植被恢复模式对土壤团聚体和有机碳储量的影响[J].森林与环境学报,2022,42(6):631-639.
- YANG Q, ZHU D Y, CHEN J, et al. Effects of vegetation restoration models on soil aggregate and organic carbon stock [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(6):631-639.
- [21] 马佳鑫,夏栋,艾尚进,等.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, et al. Soil aggregate stability and erodibility of vegetation concrete slope [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2023, 49(6):702-707.
- [22] 张杰,周佳,王永敏,等.不同有机肥对酸性土壤团聚体形成稳定及周转的影响[J].土壤学报,2025,62(5):1353-1367.
- ZHANG J, ZHOU J, WANG Y M, et al. Effects of different organic fertilizers on the formation, stabilization, and turnover of aggregates in acidic soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(5):1353-1367.
- [23] REN C, LIU K, DOU P, et al. The changes in soil microorganisms and soil chemical properties affect the heterogeneity and stability of soil aggregates before and after grassland conversion [J]. Agriculture, 2022, 12(2):e307.
- [24] 林立文,邓羽松,王金悦,等.南亚热带人工林种植对赤红壤团聚体分布及稳定性的影响[J].应用生态学报,2020,31(11):3647-3656.
- LIN L W, DENG Y S, WANG J Y, et al. Effects of plantation on aggregate distribution and stability of lateritic red soil in south subtropical China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(11):3647-3656.
- [25] 华瑞,徐学选,张少妮,等.不同退耕年限林草地土壤颗粒分形特征研究[J].水土保持学报,2016,30(4):206-209.
- HUA R, XU X X, ZHANG S N, et al. The research of soil particle fractal characteristics of forestland and grassland with different restoration years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4):206-209.
- [26] 陈红,马文明,王长庭,等.高寒草地灌丛化对土壤团聚体稳定性及其胶结物质的影响[J].土壤学报,2023,60(1):151-163.
- CHEN H, MA W M, WANG C T, et al. Effects of shrub-encroached grassland on the stability of soil aggregates and cementing materials in alpine grassland of Qinghai-Tibet plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(1):151-163.
- [27] LAN S B, WU L, ADESSI A, et al. Cyanobacterial persistence and influence on microbial community dynamics over 15 years in induced biocrusts [J]. Environmental Microbiology, 2021, 24(1):66-81.
- [28] BULLARD J E, OCKELFORD A, STRONG C, et al. Effects of cyanobacterial soil crusts on surface roughness and splash erosion [J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(12):3697-3712.
- [29] GAO L, BOWKER M A, SUN H, et al. Linkages between biocrust development and water erosion and implications for erosion model implementation [J]. Geoderma, 2020, 357:e113973.
- [30] 卢升高,竹蕾,郑晓萍.应用Le Bissonnais法测定富铁土中团聚体的稳定性及其意义[J].水土保持学报,2004(1):7-11.
- LU S G, ZHU L, ZHEN X P. Le Bissonnais method of measuring aggregate stability in ferrisols and its implications [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004(1):7-11.
- [31] 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.
- WANG S, MAO L. Application of Le Bissonnais method to study stability of soil aggregate in different tobacco planting years [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(5):1153-1157.
- [32] DURU M, THEROND O, MARTIN G, et al. How to implement biodiversity-based agriculture to enhance ecosystem services: A review [J]. Agronomy for sustainable development, 2015, 35:1259-1281.
- [33] 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.

- YAN S X, XIA D, AI S J, 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.
- [34] 武杰, 张丙昌, 陈静, 等. 黄土高原水蚀风蚀交错区不同生物结皮类型对土壤有机碳及其转化的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(4): 38-44.
- WU J, ZHANG B C, CHEN J, et al. Effects of different biocrust types on soil organic carbon and its transformation in the water-wind erosion crisscross region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(4): 38-44.
- [35] 曹允淞, 张晨晖, 肖波, 等. 黑土区农田藻藓两类结皮发育对土壤团聚体稳定性和击溅侵蚀的影响[J]. *应用生态学报*, 2023, 34(4): 892-902.
- CAO Y S, ZHANG C H, XIAO B, et al. Effects of cyanobacteria and moss-biocrusts on soil aggregate stability and splash erosion in croplands of the China mollisols area[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2023, 34(4): 892-902.
- [36] 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.
- WEI H, DENG Y S, LIN L W, et al. Comparative study on the stability of soil aggregates in typical microhabitats in karst ecologically fragile areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(7): 2751-2762.
- [37] 李朝霞, 蔡崇法, 史志华, 等. 鄂南第四纪粘土红壤团聚体的稳定性及其稳定机制初探[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(4): 69-72.
- LI Z X, CAI C F, SHI Z H, et al. Aggregate stability and stable mechanism of aggregate derived from quaternary red clay in south of Hubei Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(4): 69-72.
- [38] XIAO L, YAO K, LI P, et al. Effects of freeze-thaw cycles and initial soil moisture content on soil aggregate stability in natural grassland and Chinese pine forest on the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20: 1222-1230.
- (上接第 74 页)
- [35] MAHER B A, TAYLOR R M. Formation of ultrafine-grained magnetite in soils[J]. *Nature*, 1988, 336: 368-370.
- [36] BLUNDELL A, DEARING J A, BOYLE J F, et al. Controlling factors for the spatial variability of soil magnetic susceptibility across England and Wales[J]. *Earth-Science Reviews*, 2009, 95(3/4): 158-188.
- [37] 曾凤铃, 邹玉霞, 张卫华, 等. 生物炭用量与粒径对紫色土水分入渗及再分布特征的影响[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(12): 136-144.
- ZENG F L, ZOU Y X, ZHANG W H, et al. Effects of rate and particle size of biochar on water infiltration and redistribution characteristics of purple soil[J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2022, 44(12): 136-144.
- [38] MAHER B A. Characterisation of soils by mineral magnetic measurements[J]. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 1986, 42(1/2): 76-92.
- [39] 张彩云, 庞奖励, 常美蓉, 等. 农业耕作土壤与人工经济林地土壤磁化率和质地特征对比[J]. *农业系统科学与综合研究*, 2009, 25(1): 91-94.
- ZHANG C Y, PANG J L, CHANG M R, et al. Comparative research on soil granularity and magnetic susceptibility of the cultivated soil and anthropogenic forest soil[J]. *System Sciences and Comprehensive Studies in Agriculture*, 2009, 25(1): 91-94.
- [40] RAZZAGHI F, OBOUR P B, ARTHUR E. Does biochar improve soil water retention? A systematic review and meta-analysis[J]. *Geoderma*, 2020, 361: e114055.
- [41] LI Y Y, ZHANG F B, YANG M Y, et al. Effects of adding biochar of different particle sizes on hydro-erosional processes in small scale laboratory rainfall experiments on cultivated loessial soil[J]. *Catena*, 2019, 173: 226-233.