

丹江口库区典型小流域生物结皮驱动土壤性质变化及分离响应

平原, 澹腾辉, 李雨晨, 曾建辉, 宓桂音, 谭林芳, 郭忠录

(华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

摘要: 为探究生物结皮发育驱动下土壤水蚀特征及机理, 选取苔藓发育为优势种的退耕样地, 设计 5 个盖度等级(1%~20%, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80%, 80%~100%), 以裸地为对照, 在不同水流剪切力(6.12~19.64 Pa)下进行冲刷试验。结果表明: 结皮发育显著影响土壤养分含量, 且高盖度结皮覆盖下养分表聚效应更加明显。生物结皮发育显著影响土壤分离能力, 裸地土壤分离能力[1.465 6 kg/(m²·s)]为生物结皮[0.004 2~0.468 2 kg/(m²·s)]的 3.58~348.95 倍, 裸地细沟可蚀性(0.293 5 s/m)为生物结皮(0.001 0~0.082 2 s/m)的 3.57~293.50 倍。相对土壤分离能力及细沟可蚀性均随结皮盖度增加呈指数函数衰减, 结皮冲破时间随结皮盖度增加呈指数函数增长; 非线性回归分析表明, 土壤分离能力可用水流剪切力、生物结皮盖度和土壤黏结力进行模拟(NSE=0.749)。综上, 生物结皮发育显著提升土壤抗侵蚀性能, 研究结果可为半湿润区水土流失防治及生物结皮管理利用提供理论参考。

关键词: 生物结皮; 苔藓; 土壤分离能力; 细沟可蚀性; 丹江口库区; 紫色土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)03-0087-08

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.012

Soil Properties Change and Soil Detachment Response Driven by Biocrusts in Typical Small Watershed of DanJiangkou Reservoir Area

PING Yuan, TAN Tenghui, LI Yuchen, ZENG Jianhui, MI Guiyin, TAN Linfang, GUO Zhonglu

(Research Center of Soil and Water Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

Abstract: In order to explore the characteristics and mechanism of soil water erosion driven by biological crust development, five coverage grades (1%~20%, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80%, 80%~100%) were designed for the abandoned farmland plots with moss development as the dominant species in Wulongchi small watershed in Danjiangkou Reservoir area, and the bare soil was used as the control to collect samples. Soil detachment text was studied under different flow shear forces (6.12~19.64 Pa). The results showed that: The development of biocrusts significantly affected soil nutrient content, and nutrient surface aggregation was more obvious under the high coverage of crust; The development of biocrusts significantly affected the soil detachment capacity. The soil detachment capacity of bare soil [1.465 6 kg/(m²·s)] was 3.58~348.95 times that of biological crust [0.004 2~0.468 2 kg/(m²·s)]. The rill erodibility of bare soil (0.293 5 s/m) was 3.57~293.50 times that of biological crust (0.001 0~0.082 2 s/m). The relative soil detachment ability and rill erodibility decreased exponentially with the increase of crust coverage, and the crust breaking time increased exponentially with the increase of crust coverage. Nonlinear regression analysis showed that the soil detachment ability could be simulated by water flow shear force, biological crust coverage and soil bonding force (NSE = 0.749). In conclusion, the development of biocrusts significantly improved soil erosion resistance. The results can provide scientific basis and theoretical reference for soil and water loss control and biocrusts management and utilization in subhumid area.

Keywords: biocrusts; moss; soil detachment capacity; rill erodibility; danjiangkou reservoir area; purple soil

土壤侵蚀是侵蚀动力(降雨、径流)和下垫面(土壤侵蚀阻力)的相互作用过程^[1], 而近地表特性直接

影响侵蚀动力与下垫面特征, 进而作用于侵蚀过程。作为一种常见地被物, 生物结皮(biocrusts)是由地

收稿日期: 2022-11-14

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077066)

第一作者: 平原(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀机理研究。E-mail: pingyuan@webmail.hzau.edu.cn

通信作者: 郭忠录(1980—), 男, 教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀退化与土壤质量研究。E-mail: zglohu@163.com

衣、藻类、苔藓等孢子植物类和细菌、真菌等微生物群落通过菌丝、假根及分泌物等与土壤表层胶结形成的复合有机体^[2],广泛存在于各类气候区,占全球陆地总面积的 12% 以上^[3]。作为近地表的主要特征之一,生物结皮发育势必对土壤表层水文循环、土壤侵蚀产生重要作用^[4-5]。如改良土壤属性和土壤结构^[6]、改变土壤表面特征^[7],土壤表层生物活性^[8]及地表水动力学特性、影响土壤表层水文循环^[9-10]、提升土壤固碳能力等^[11]。土壤分离(soil detachment)是土壤侵蚀过程的起始阶段,指通过雨滴溅蚀和径流冲刷使土壤颗粒脱离土体的过程,可为后续土壤侵蚀过程提供先决条件。土壤分离能力指径流含沙量为零时对土壤的最大分离速率,是表征径流冲刷分离过程及土壤抗蚀性的重要指标。

已有研究^[12-14]表明,生物结皮发育增强土壤抗蚀性能,然而具体哪个指标或哪些指标能更好地表征生物结皮土壤抗蚀性能,仍无统一定论。有研究^[15]认为,生物结皮主要依靠地上部覆盖及物理保护作用减少侵蚀,而不是通过改变土壤性质;相反,有研究^[16]发现,生物结皮是通过改变土壤性质从而降低土壤可蚀性;Liu 等^[13,17]研究表明,生物结皮通过改善土壤性质和结皮层覆盖降低土壤分离能力,并进一步将生物结皮降低土壤分离能力的因素垂直剖析为地表覆盖、物理捆绑及化学吸附 2 种作用;而张冠华等^[14]研究表明,生物结皮通过物理覆盖保护以及改变土壤属性增强土壤抗蚀性。目前,生物结皮的研究主要集中在沙漠、沙地、荒漠及黄土高原等干旱半干旱区域^[5,13,18],并逐步向半湿润、湿润区扩展^[14,19]。相对于干旱、半干旱地区,半湿润区作为向湿润区延伸的过渡区,其水热资源较为丰富,具有年降雨量大、降雨集中、暴雨频繁且强度较大等特点。已有研究^[4]表明,受气候特征和成土母质影响,生物结皮发育表现出宏观地带性,不同气候区生物结皮组成和结构、发育演替速度和过程、生态功能等差异较大,因此,其他区域研究成果可为半湿润区生物结皮研究提供借鉴,但不可直接推演。半湿润区生物结皮覆盖对土壤分离过程的影响程度和机制如何,有何积极和消极作用,揭示并量化其在土壤分离过程中的作用是认知该区域内生物结皮功能以及水土流失防治的重要前提。

丹江口库区作为南水北调中线工程水源区的核心水源地,是国家级水土流失重点防治区。该区域林下以及退耕区域,生物结皮广泛发育,可对近地表特征以及径流过程产生深远影响。鉴于此,开展丹江口库区生物结皮对土壤分离过程的影响及其机制研究,以期完善或建立考虑生物结皮因子的土壤侵蚀模型以及区域水土流失防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于湖北省习家店镇五龙池小流域(111°13'09"—111°13'31"E,32°44'30"—32°46'13"N),流域总面积为 1.92 km²,属北亚热带半湿润季风气候区,年平均气温和平均降水量分别为 15.8 °C 和 798 mm,降水多集中在 5—10 月。土壤类型为紫色土,具有典型的 A—C 剖面发育层,土层浅薄,研究点位土层厚度不超过 30 cm,在丹江口库区具有广泛代表性。采样点选择在退耕区域,苔藓优势种主要为丛藓科毛口藓属(*Trichostomum*)和真藓科真藓属(*Bryum*),草本和灌木主要有小蓬草(*Conyza canadensis* (L.) Cronq.)、狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv.)、白茅(*Imperata cylindrica* (L.) Beauv.)、野菊(*Chrysanthemum indicum* L.)等。不同盖度结皮采样点具有相似的坡位、坡向、坡度、海拔、退耕年限、下层土壤与母质等,尽最大限度保证其他环境一致性。

1.2 研究方法

1.2.1 样品采集 试验于 2021 年 8 月 21 日至 9 月 27 日进行,在五龙池小流域选取有苔藓发育的退耕地块,采用网格法对结皮盖度进行测算,并用电子设备拍照,室内通过 Image-Pro Plus 进行验证。将盖度划分为 5 个等级(1%~20%,20%~40%,40%~60%,60%~80%,80%~100%),以裸地为对照采集样品。每块样地 2 m×2 m,不同处理之间距离不超过 50 m。用电子游标卡尺原位测定生物结皮层厚度,每种处理重复测量 20 次。用链条法测量地表糙度(链条为长度 1 m,宽度 3 mm 的金属链条),每种处理重复测量 5 次。糙度计算公式为:

$$C = (1 - L_2/L_1) \times 100\% \quad (1)$$

式中: C 为糙度(%); L_1 为链条实际长度(cm); L_2 为链条铺设在地面后的水平长度(cm)。

用 TDR 水分测量仪(MP-406 III 型)测定采样点附近土壤含水量,重复测量 10 次。冲刷土样用取土环刀(直径 10 cm,高 6.35 cm)采集,采集时选择比较平整的地面,尽量避开植物根系。将环刀垂直打入土壤,以结皮样刚好填平环刀为准,削平环刀样下部土壤后装入环刀盒带回室内。在采样点附近用便携式剪切仪(TORVANE®)测量原位结皮土壤黏结力(不铲除结皮),将仪器压入土壤至刀片深度,并在垂直压应力为 0 下转动旋钮,当旋转发生后,缓慢释放剩余弹簧张力,旋钮上的分度标记将指示最大剪切值,即为土壤黏结力,每种处理重复测量 15 次。在每种盖度地块内分层次采集土壤样品(结皮层、结皮层下 0—2,2—5,5—10 cm),带回室内用于土壤理化性质分析。

1.2.2 生物结皮层及下层土壤性质测定 将样品风干研磨后过筛,用于土壤性质测定(pH 为 2 个重复,其余指标均为 3 个重复);pH 计测定土壤 pH(土水比 1:2.5);吸管法测定土壤机械组成;土壤有机质采用重铬酸钾容量法—外加加热法测定;土壤全氮采用半微量开氏法测定;土壤全磷采用 $\text{HClO}_4\text{—H}_2\text{SO}_4$ 法测定;Le Bissonnais (LB) 法测定团聚体,并用平均重量直径 (MWD)、相对消散指数 (RSI)、相对机械破碎指数 (RMI)、团聚体特征性稳定参数 (A_s) 对其稳定性进行评价,MWD、RSI、RMI、 A_s 计算公式为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \frac{r_{i-1} + r_i}{2} m_i \quad (2)$$

$$\text{RSI} = \frac{\text{MWD}_{\text{SW}} - \text{MWD}_{\text{FW}}}{\text{MWD}_{\text{SW}}} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{RMI} = \frac{\text{MWD}_{\text{SW}} - \text{MWD}_{\text{WS}}}{\text{MWD}_{\text{SW}}} \times 100\% \quad (4)$$

$$A_s = \text{RSI} \times \text{RMI} \quad (5)$$

式中: r_i 表示第 i 个筛子的孔径 (mm); m_i 表示第 i 个筛子上的破碎团聚体的百分比含量 (%); n 表示筛子的个数; MWD_{FW} 、 MWD_{WS} 、 MWD_{SW} 分别代表快速湿润、预湿润振荡、慢速湿润 3 种处理下水稳性团聚体的平均重量直径 (mm); A_s 为团聚体特征性稳定参数,其值越大,表明团聚体稳定性越差。

1.2.3 土壤分离能力测定 在长 2.20 m,宽 0.13 m 的冲刷水槽内进行土壤分离能力测定,坡度可以在 $0^\circ \sim 30^\circ$ 范围内调节。在水槽底部黏 1 层试验用土,以模拟原地表的糙度。进行冲刷试验前,先将套有纱布的冲刷环刀样置于水盘中,水面高度 5 cm,水透过纱布自下而上浸润土壤 8 h 达到饱和后,将环刀样放置于架子上静止 8 h 除去土壤重力水,保证样品初始含水量一致。水流表面流速通过高锰酸钾染色法测定,重复测量 10 次,同时,测定水温,查表得水运动黏滞系数 (ν),计算出雷诺数 (Re),判断水流流态,通过校正系数与平均表面流速 ($\bar{V}$) 得到平均流速 (V)。雷诺数、平均流速、水流深度、剪切力计算公式为:

$$Re = \frac{\bar{V}R}{\nu} \quad (6)$$

$$V = \bar{V} \cdot a \quad (7)$$

$$h = \frac{Q}{VB} \quad (8)$$

$$\tau = \rho ghS \quad (9)$$

式中: Re 为雷诺数; $\bar{V}$ 为水流表面平均流速 (m/s); R 为水力半径 (m); ν 为水运动黏滞系数 (m^2/s); V 为水流平均流速 (m/s); a 为修正系数,紊流取 0.8; h 为径流深 (m); Q 为流量 (m^3/s); B 为水槽宽度 (m); τ 为水流剪切力 (Pa); ρ 为水的密度 (kg/m^3); g 为重力加速度 (m/s^2); S 为坡度的正弦值。

通过不同的水槽坡度 ($10^\circ \sim 20^\circ$) 和放水流量 ($0.38 \sim 1.23 \text{ L/s}$) 组合,设置 6 个水流剪切力 (6.12 ~ 19.64 Pa),其水动力学特性见表 1。每种处理在不同水流剪切力下做 5 次重复,共计 180 次有效冲刷试验。

表 1 不同水流剪切力下的坡面径流水动力学特性

编号	单宽流量/ ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	水深/ mm	坡度/ ($^\circ$)	平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	流态	剪切力/ Pa
1	2.71×10^{-3}	3.59	10	0.76	紊流	6.12
2	4.10×10^{-3}	5.14	10	0.80	紊流	8.76
3	5.45×10^{-3}	4.23	15	1.29	紊流	10.74
4	7.55×10^{-3}	5.35	15	1.41	紊流	13.58
5	7.51×10^{-3}	4.85	20	1.55	紊流	16.26
6	9.46×10^{-3}	5.86	20	1.61	紊流	19.64

进行冲刷试验时,当环刀内土样冲刷深度约为 2 cm 时立即停止试验,分别记录结皮冲破时间 (t) (冲破面积 $\geq 0.78 \text{ cm}^2$,即直径为 1 cm 的圆的面积) 及冲刷总历时 (T),将冲刷后的土样烘干称重,计算土壤分离能力:

$$D_c = \frac{\Delta W}{T \cdot A} \quad (10)$$

式中: D_c 为土壤分离能力 ($\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$); ΔW 为分离土壤的烘干重 (kg); T 为冲刷历时 (s),冲刷时间上限 20 min; A 为冲刷环刀的面积 (m^2)。

细沟可蚀性可根据 WEPP 模型方程计算,公式为:

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (11)$$

式中: K_r 为细沟可蚀性 (s/m); τ 为水流剪切力 (Pa); τ_c 为临界水流剪切力 (Pa)。以 τ 为横坐标, D_c 为纵坐标拟合线性方程,则拟合直线的斜率为 K_r ,在横坐标上的截距为 τ_c 。

1.2.4 数据处理 采用 Excel 2016、SPSS 26 和 origin 2022b 软件进行数据分析以及绘图。利用单因素方差分析进行不同盖度处理下,土壤分离能力及土壤属性的差异性检验,采用双因素方差对不同生物结皮盖度和土壤深度对结皮下层土壤养分的影响进行分析;独立样本 t 检验比较裸地与结皮土壤各指标之间的差异;回归分析结皮盖度等级与结皮厚度、土壤黏结力、结皮冲破时间、相对土壤分离能力、细沟可蚀性之间的关系;非线性回归拟合土壤分离能力与水动力学特性、生物结皮表面特征及土壤属性之间的关系。

2 结果与分析

2.1 生物结皮盖度对结皮层表面特征及土壤性质的影响

生物结皮层平均厚度为 $0.441 \sim 1.364 \text{ cm}$,呈现弱到中等变异性。方差分析表明,生物结皮盖度显著影响厚度 ($p < 0.05$),除结皮盖度等级为 $40\% \sim 60\%$

和 60%~80% 结皮厚度差异不显著外,其余盖度均存在显著差异,且高盖度结皮厚度显著大于低盖度结皮厚度(表 2)。回归分析表明,生物结皮厚度(*crust thickness*, C_t)随着生物结皮盖度(C_{moss})呈线性增加(图 1)。

平均土壤黏结力为 12.23~26.20 kPa,呈现弱至中等变异性。生物结皮盖度显著影响土壤黏结力($p<0.05$),黏结力随着盖度等级增大而显著增大,结皮覆盖

下土壤黏结力为裸地的 1.10~2.14 倍。高盖度等级(60%~80%,80%~100%)下的土壤黏结力显著大于中低盖度等级(1%~20%,20%~40%,40%~60%),中高盖度等级(40%~60%,60%~80%,80%~100%)间差异显著,但低盖度等级(1%~20%,20%~40%)与裸地间差异不显著(表 2)。回归分析表明,土壤黏结力(*Coh*)随着生物结皮盖度(C_{moss})呈指数增加(图 1)。

表 2 不同盖度等级结皮厚度和土壤黏结力描述性统计

结皮 盖度/%	结皮厚度/cm				土壤黏结力/kPa			
	最小值	最大值	平均值	变异系数(CV)	最小值	最大值	平均值	变异系数(CV)
裸地	—	—	—	—	4.00	17.00	12.23d	0.29
1~20	0.306	0.605	0.441d	0.20	9.00	18.00	13.44d	0.21
20~40	0.583	0.892	0.732c	0.11	12.00	17.00	14.23cd	0.10
40~60	0.882	1.103	1.001b	0.07	13.00	23.00	16.70c	0.20
60~80	0.856	1.223	1.035b	0.11	16.00	24.00	20.20b	0.13
80~100	1.103	1.652	1.364a	0.11	20.00	34.00	26.20a	0.16

注:变异系数 $CV\leq 0.1$ 呈现弱变异性, $0.1<CV<1$ 呈现中等变异性, $CV\geq 1$ 呈现强变异性;同列不同小写字母代表不同结皮盖度等级间差异显著($p<0.05$)。下同。

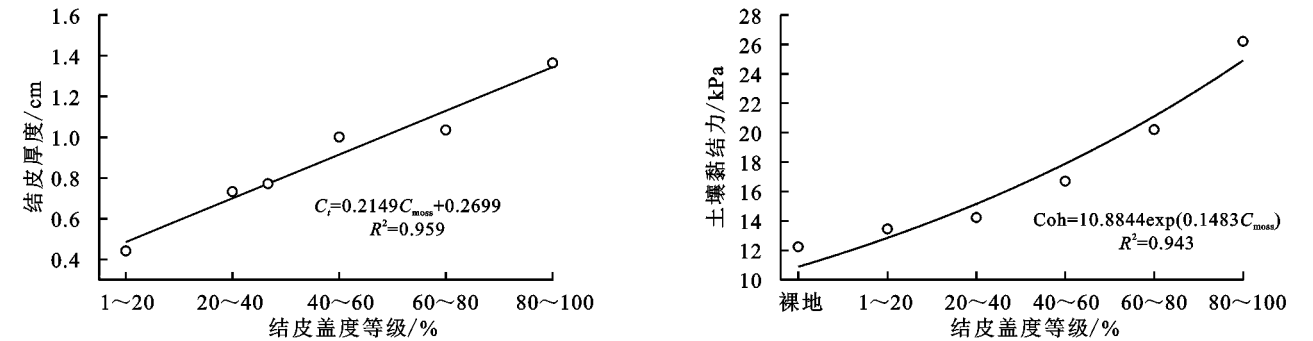


图 1 结皮厚度、土壤黏结力与结皮盖度等级之间的关系

方差分析显示,不同生物结皮盖度等级间各指标均受结皮发育影响(表 3)。黏粒含量、团聚体平均重量直径均随结皮盖度增加呈现规律性变化,而地面糙度、pH、土壤容重、砂粒含量、粉粒含量呈现无规律变化。随结皮盖度等级增加,As 总体呈现减小趋势,表明团聚体稳定性逐步增强,土壤抗蚀性能逐步提高。3 种破碎机制中,不同结皮盖度等级 MWD 大小均为

$MWD_{FW} < MWD_{WS} < MWD_{SW}$,表明消散作用和机械破碎作用为该区域结皮土壤的主要破碎机制。独立样本 t 检验表明,苔藓结皮土壤容重、砂粒、粉粒、黏粒、团聚体平均重量直径均与裸地对照存在显著性差异($p<0.05$),其中,土壤容重、砂粒含量较裸地降低 11.8%,16.3%,粉粒、黏粒、 MWD_{FW} 、 MWD_{WS} 、 MWD_{SW} 较裸地增加 7.9%,21.5%,87.8%,77.0%,43.4%。

表 3 不同生物结皮盖度等级下的表面特征及土壤性质

结皮 盖度/%	地表 糙度/%	pH	土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$)	土壤机械组成/($g \cdot kg^{-1}$)			团聚体平均重量直径/mm			A_s
				砂粒	粉粒	黏粒	MWD_{FW}	MWD_{WS}	MWD_{SW}	
0	0.70b	7.95c	1.70a	324.9ab	322.1a	353.0d	0.360e	0.586d	0.779d	0.133
1~20	1.50ab	7.91d	1.66a	313.9b	324.8d	361.3cd	0.525d	0.798c	0.902cd	0.048
20~40	0.93ab	8.01b	1.49b	339.2a	300.8e	360.0d	0.574cd	0.888c	0.974bc	0.036
40~60	1.67a	8.06a	1.46b	289.9c	335.4cd	374.7bc	0.646c	0.993b	1.093b	0.037
60~80	0.97ab	8.10a	1.48b	193.1e	429.6b	377.3b	0.759b	1.209a	1.263a	0.017
80~100	1.53ab	7.90d	1.40b	224.1d	347.0c	428.8a	0.874a	1.295a	1.351a	0.015
苔藓结皮	1.32	7.99	1.50*	272.0*	347.5*	380.4*	0.676*	1.037*	1.117*	—

注:黏粒为 $<0.002\text{ mm}$,粉粒为 $0.002\sim 0.05\text{ mm}$,砂粒为 $0.05\sim 2\text{ mm}$;苔藓结皮为所有结皮盖度等级下的总体统计结果;*表明通过独立样本 t 检验,苔藓结皮总体统计结果与裸地间有显著差异。下同。

2.2 生物结皮盖度及土层深度对土壤养分分布的影响

由图 2 可知,土层深度、结皮盖度以及两者交互作

用均显著影响土壤养分含量($p<0.05$)。同一土层深度,土壤养分含量随着结皮盖度等级增加显著提升。结皮

层养分含量为裸地表层 0—2 cm 的 1.10~5.35 倍。结皮下层土壤养分为同层裸地的 0.99~4.32 倍,且均以盖度 80%~100% 养分含量最高。因此,结皮发育显著增加土壤养分含量,高盖度结皮养分表聚效应更明显。同一盖度等级下,生物结皮土壤养分含量随土层深度增加显著降低。而对于裸地,土壤养分含量则呈现先增加后减少趋势,以 2—5 cm 土壤养分含量最高。生物结皮土壤养分含量从结皮层到 0—2 cm 减少幅度 2.2%~36.1%,

0—2 到 2—5 cm 减少幅度为 1.6%~29.3%,2—5 到 5—10 cm 减少幅度仅为 2.6%~11.3%,因此,以结皮层及 0—2 cm 土壤养分提高最为显著。中低盖度结皮覆盖的结皮层及以下 5 cm 土壤养分较裸地提升幅度为 -6.9%~227.1%,5—10 cm 土壤养分较裸地提升幅度仅为 3.5%~46.2%。高盖度结皮覆盖的结皮层及以下 5 cm 土壤养分较裸地提升幅度为 2.0%~434.8%,5—10 cm 土壤养分较裸地提升幅度为 3.5%~172.4%。

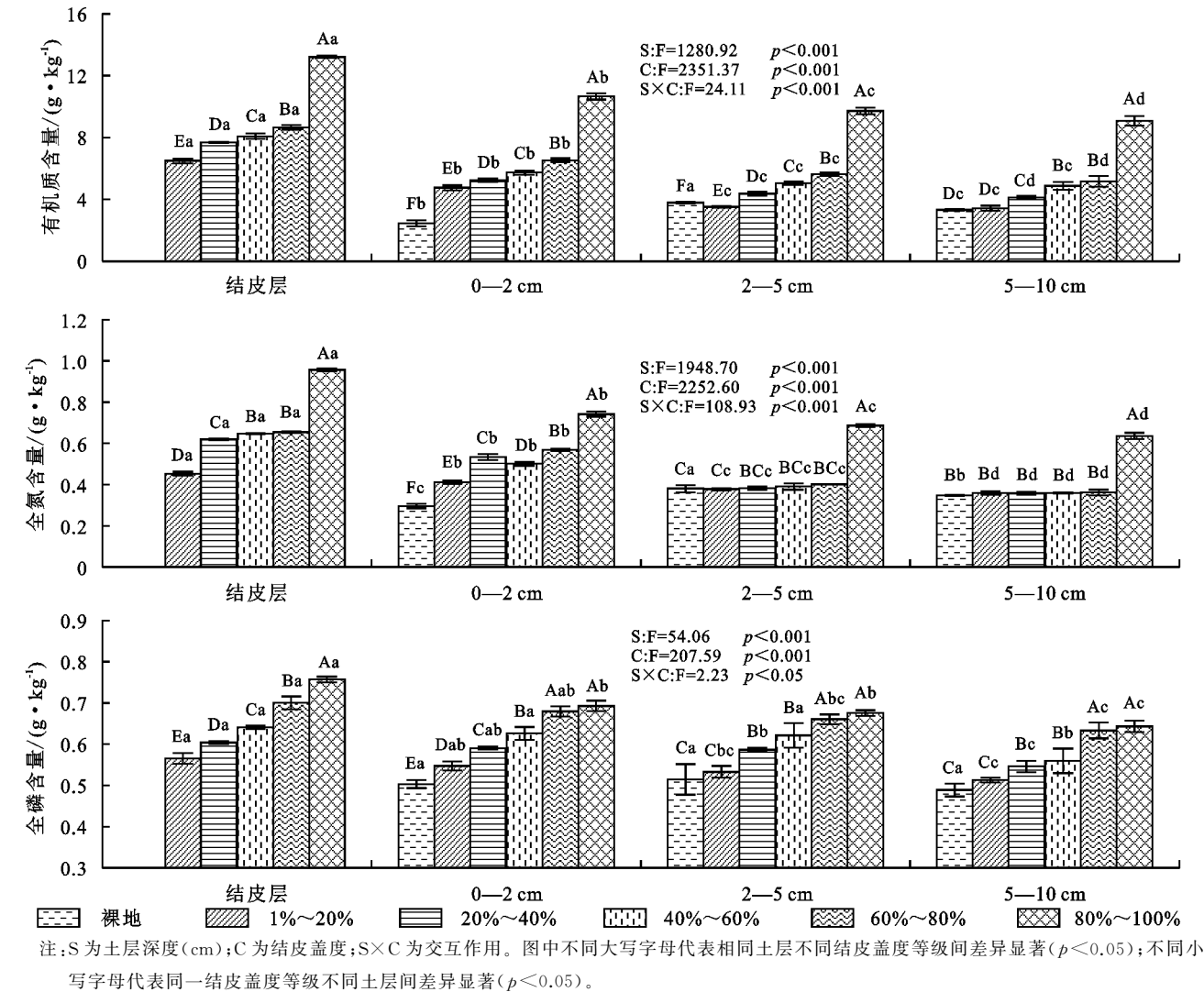


图 2 生物结皮盖度及土层深度对土壤养分分布的影响

2.3 生物结皮盖度对土壤分离能力、结皮冲破时间及土壤侵蚀阻力的影响

方差分析结果(表 4)表明,生物结皮盖度等级对土壤分离能力有显著影响($p<0.05$),土壤分离能力随苔藓结皮盖度增加而降低。平均土壤分离能力从裸地的 1.465 6 kg/(m²·s)降低到盖度为 80%~100% 的 0.004 2 kg/(m²·s)。裸地土壤分离能力为结皮覆盖土壤的 3.58~348.95 倍,与裸地相比,苔藓结皮覆盖土壤分离能力减少 68%~99%,盖度为 80%~100% 时,所产生的土壤侵蚀几乎可以忽略不计。

生物结皮盖度对结皮冲破时间有显著影响($p<$

0.05),随着苔藓结皮盖度等级增加,结皮冲破时间逐渐变长,平均结皮冲破时间从盖度为 1%~20% 的 15.76 s 增加到盖度为 80%~100% 的 849.02 s。回归分析表明,结皮冲破时间随着结皮盖度等级呈指数增长,其拟合方程为:

$$S=e^{1.3541C_{\text{moss}}}, R^2=0.929 \tag{12}$$

为方便比较本研究与其他研究中苔藓结皮覆盖土壤分离能力的大小与变化趋势,选取相对土壤分离速率(RSD)作为指标,其与结皮盖度之间的关系见图 3。回归分析表明,当苔藓结皮覆盖率从 0 增加到 40% 时,RSD 迅速下降,土壤分离能力大幅降低

82.44%，之后随着结皮覆盖度的增加，RSD 缓慢下降并相对稳定。最佳拟合方程为：

$$RSD=e^{-1.009C_{\text{moss}}}, R^2=0.993 \tag{13}$$

表 4 不同盖度等级生物结皮土壤分离能力及结皮冲破时间特征统计

结皮盖度/%	样本数	土壤分离能力/(kg·m ⁻² ·s ⁻¹)			标准差	结皮冲破时间/s			标准差
		最小值	最大值	均值		最小值	最大值	均值	
0	30	0.0078	4.8880	1.4656a	1.5789	—	—	—	—
1~20	30	0.0105	1.9123	0.4682b	0.5077	0.70	109.95	15.76c	26.84
20~40	30	0.0067	0.6349	0.2573bc	0.2134	1.35	135.31	16.82c	26.46
40~60	30	0.0009	0.6272	0.1247bc	0.1967	1.43	994.07	220.55b	293.71
60~80	30	0.0004	0.0937	0.0223c	0.0293	1.59	849.73	304.32b	350.67
80~100	30	0	0.0208	0.0042c	0.0060	8.85	1200.00	849.02a	425.98
苔藓结皮	150	0	1.9123	0.1754*	0.3094	0.70	1200.00	280.33	415.10

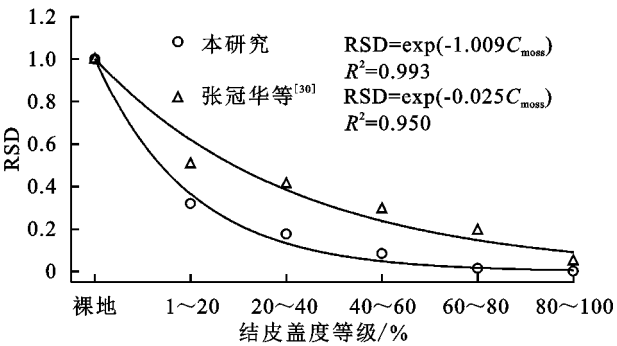


图 3 本研究及前人研究中相对分离速率、细沟可蚀性与结皮盖度等级之间的关系

根据测得的水流剪切力及土壤分离能力，通过公式(11)拟合不同生物结皮盖度的细沟可蚀性和临界剪切力(表 5)。苔藓结皮覆盖土壤细沟可蚀性为 0.001 0~0.082 2 s/m，且随着结皮盖度增加，细沟可蚀性逐渐减小。裸地细沟可蚀性(0.293 5 s/m)是苔藓结皮覆盖土壤的 3.57~293.50 倍，表明生物结皮能够有效降低土壤细沟可蚀性，增强土壤抗蚀性。

进一步分析(图 3)表明，生物结皮土壤的细沟可蚀性随结皮盖度呈指数下降，其拟合方程为：

$$K_r=0.291e^{-1.153C_{\text{moss}}}, R^2=0.992 \tag{14}$$

临界剪切力为 5.54~8.60 Pa，回归分析结果表明，不同处理间的临界剪切力无显著差异($R^2=0.271$)。

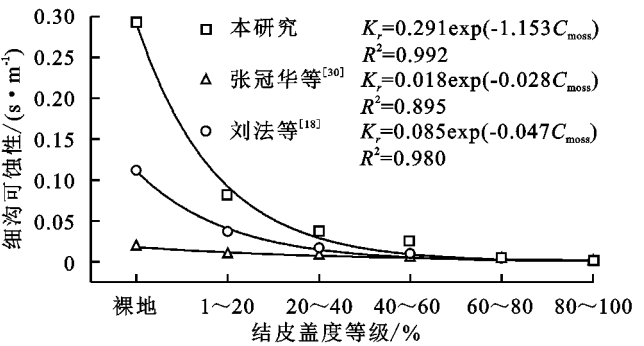
表 5 不同结皮盖度等级下土壤分离能力与水流剪切力线性回归结果

结皮盖度/%	回归方程	细沟可蚀性/(s·m ⁻¹)	临界剪切力/Pa	R ²
0	$D_c=0.2935\tau-2.2082$	0.2935	7.52	0.999
1~20	$D_c=0.0822\tau-0.5605$	0.0822	6.82	0.935
20~40	$D_c=0.0368\tau-0.2037$	0.0368	5.54	0.928
40~60	$D_c=0.0249\tau-0.1866$	0.0249	7.49	0.865
60~80	$D_c=0.0046\tau-0.0354$	0.0046	7.70	0.925
80~100	$D_c=0.0010\tau-0.0086$	0.0010	8.60	0.818

2.4 土壤分离能力的主要影响因子及模型模拟

采用非线性回归方法分析土壤分离能力与水动力学特性、生物结皮表面特征及土壤属性之间的关系，土壤分离能力可以通过水流剪切力、生物结皮盖

式中：RSD 为苔藓结皮覆盖土壤的土壤分离能力与裸地土壤分离能力的比值(%)； C_{moss} 为苔藓结皮的覆盖度(%)。



度和土壤黏结力的幂函数进行模拟(图 4)：

$$D_c=\tau^{3.125}Coh^{-3.222}e^{(-2.431C_{\text{moss}})} \tag{15}$$

$R^2=0.749, NSE=0.749, n=180$

表明生物结皮通过改变结皮表面特征，改良土壤属性，在水动力侵蚀下影响土壤分离过程。

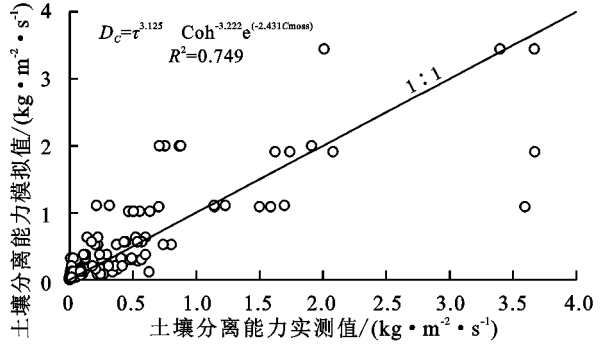


图 4 实测土壤分离能力与拟合土壤分离能力之间的比较

3 讨论

3.1 生物结皮发育对结皮表面特征及下伏土壤特性的影响

已有研究^[20]表明，生物结皮的形成发育可显著改变土壤表面物理—化学—生物性质。本研究结果表明，随着结皮盖度提升，土壤黏结力、土壤黏粒含量、团聚体稳定性均得到提升。苔藓结皮土壤容重、砂粒含量较裸地显著降低。生物结皮发生发育过程中，土壤养分含量不断累积，并与下层土壤及微生物形成结皮—土壤—微生物复合生态系统，进行物质循

环和能量流动,形成区域养分小循环,使得表层土壤团聚体结构和黏结力得到提升。与裸地相比,生物结皮及其下层土壤养分含量均有所提升,以80%~100%盖度提升最显著。养分含量随着土层深度增加而显著降低,以结皮层及以下0—2 cm养分含量提升最为显著。可见,在结皮影响下,结皮下方土壤养分含量有所增加,且高盖度结皮养分聚集效应更加明显。生物结皮不仅可以通过光合作用提升碳储量,其死亡残体分解过程同样是土壤有机质的重要来源;虽然,苔藓结皮本身不具备固氮能力,但可以依靠其附着的寄生藻类及死亡残体分解等为表层土壤提供氮源,且苔藓结皮更易捕获大气粉尘和颗粒物以及结皮固碳的同时也增加氮素的累积。但结皮土壤养分表聚效应与土壤发生学中土壤养分垂直剖面分布规律有明显区别^[21],结皮层与下层土壤养分含量差异较大,因为生物结皮的菌丝和假根分布较浅,大多集中在表层2 cm土壤(即结皮层),因此,结皮层的光合固碳作用、微生物丰度及活性明显高于下层土壤。对于生物结皮对不同深度土壤养分的影响,本研究发现,结皮层及以下10 cm土壤养分相比裸地均得到一定提升。但中低盖度结皮影响深度主要为结皮层及以下5 cm,高盖度结皮覆盖下土壤养分提升幅度更为明显,其影响深度甚至可以超过10 cm,王芳芳等^[21]、张光辉^[22]有相关论述,但本研究未测定10 cm以下土层养分。裸地养分则呈现先增加后减少的趋势,以2—5 cm土层养分最高,可能是裸地表层土壤被水流侵蚀,表层养分流失所致。

本研究结皮厚度为0.306~1.652 cm,与Liu等^[13]、张冠华等^[14]研究的厚度量级大体一致。结皮厚度与盖度均可一定程度上表征生物结皮发育情况,且结皮厚度与结皮盖度、大部分土壤属性及土壤分离能力均存在相关性。目前,大多数研究^[13,18,23]对结皮分等级划分均采用结皮盖度,仅有少量研究^[24]用厚度分级或在土壤分离拟合过程中引入结皮厚度参量^[25],可能是相比于厚度,盖度更容易测量,而厚度如何控制达到既定值则是一个难题。结皮厚度表征结皮发育程度效果如何,影响土壤分离能力程度如何,未来仍需深入研究。

结皮通过菌丝、假根缠绕、多糖分泌物等对土壤颗粒进行胶结、捆绑和吸附,使土壤黏结力显著增强^[20]。土壤黏结力受到季节、降水、日照及近地表特性等多种因素影响,本研究土壤黏结力为12.23~26.20 kPa,高于张冠华等^[14]在紫色土的结果。可能是季节及降雨量等因素以及本研究测量原位结皮土壤黏结力时

保留结皮的原因。

3.2 生物结皮发育对土壤分离能力的影响

本研究表明,随结皮盖度增加,土壤抗蚀性显著增强,且当结皮覆盖度达到40%后,土壤分离能力较裸地降低82.44%,之后随着结皮盖度等级提升,土壤分离能力稳定在较小数值。与冉茂勇等^[23]研究结论相近,高盖度结皮覆盖土壤具有很高的抗蚀性能,在冲刷过程中几乎不发生土壤侵蚀。生物结皮通过菌丝和假根在土壤基质中穿插缠绕,如锚杆一般固结表层土壤颗粒,形成密集的网络结构,同时,菌丝及假根分泌的一些多糖等物质进一步与土壤胶结。另外,结皮与下层土壤通过长时间的结皮—土壤—微生物复合生态系统反馈作用改善土壤养分、团聚体结构和土壤黏结力,进而使得土壤抗蚀性得到提升。因此,生物结皮发育除直接的覆盖及假根菌丝缠绕捆绑作用影响土壤分离过程外,也通过小区域的物质循环和能量流动影响或改变土壤属性间接影响土壤分离。与张冠华等^[14]研究结果相比,RSD降低幅度较大,差异可能是土壤性质及季节、降雨等气候因素造成的,且本研究中对照裸地受水流侵蚀严重,土壤抗蚀性差,因此,裸地土壤分离能力实测值高。另外,本研究中,细沟可蚀性与结皮盖度显著相关,但临界剪切力与结皮盖度则没有明显的相关性。Liu等^[13]、张冠华等^[14]研究也有同样的报道。可能是临界剪切力本身存在较低敏感性且对试验数据要求比较严格,或结皮发育情况、土壤性质等变化不足以引起临界剪切力响应。

本研究表明,随着结皮盖度提升,结皮冲破时间也随之变长,表明结皮盖度增加使土壤抗蚀性得到显著提升,且结皮冲破时间和结皮盖度等级之间具有较高相关性($R^2=0.929$),因此,结皮冲破时间能在一定程度上表征结皮土壤抗蚀性。对于结皮冲破面积标准的判断存在人为误差,与土壤分离能力一致,2 cm深度是否达到不可避免地存在人为误差,但同一实验员在一批样品下标准应大体一致。由于对照裸地没有结皮覆盖,结皮冲破时间仅可作为结皮土壤间抗蚀性比较的辅助性指标。

4 结论

结皮发育显著影响土壤养分含量,且高盖度结皮覆盖下,养分表聚效应更加明显。随生物结皮覆盖度增加,土壤分离能力显著降低,土壤抗蚀性能显著提升;裸土土壤分离能力是生物结皮覆盖土壤的3.58~348.95倍,裸地细沟可蚀性为生物结皮覆盖土壤的3.57~293.50倍。相对土壤分离能力随结皮盖度增加呈指数函

数衰减;土壤分离能力可用水流剪切力、生物结皮盖度和土壤黏结力进行模拟($NSE=0.749$)。研究结果对解析半湿润区生物结皮发育增强土壤抗侵蚀性能和影响侵蚀水动力的机理具有重要意义,可为半湿润区水土流失防治及生物结皮的管理利用提供理论参考。

参考文献:

- [1] 史志华,宋长青.土壤水蚀过程研究回顾[J].水土保持学报,2016,30(5):1-10.
- [2] Eldridge D, Greene R. Assessment of sediment yield by splash erosion on a semi-arid soil with varying cryptogam cover[J]. *Journal of Arid Environments*, 1994, 26(3):221-232.
- [3] 庞景文,卜崇峰,郭琦,等.毛乌素沙地区域尺度生物结皮有机碳空间分布特征及其影响因素[J].应用生态学报,2022,33(7):1755-1763.
- [4] Belnap J, Weber B, Büdel B. Biological soil crusts: An organizing principle in drylands[J]. *Ecological Studies*, 2016, 11:3-13.
- [5] Gao L Q, Bowker M A, Sun H, et al. Linkages between biocrust development and water erosion and implications for erosion model implementation[J]. *Geoderma*, 2020, 357(C):e113973.
- [6] Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49:96-105.
- [7] Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, Chamizo S, et al. Effects of biological soil crusts on surface roughness and implications for runoff and erosion[J]. *Geomorphology*, 2012, 145/146:81-89.
- [8] Liu Y M, Li X R, Xing Z S, et al. Responses of soil microbial biomass and community composition to biological soil crusts in the revegetated areas of the Tengger Desert[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 65:52-59.
- [9] 张冠华,易亮,丁文峰,等.三峡库区苔藓生物结皮对土壤水分入渗的影响[J].应用生态学报,2022,33(7):1835-1842.
- [10] Xiao B, Sun F H, Hu K, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568:792-802.
- [11] Elbert W, Weber B, Burrows S, et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(7):459-462.
- [12] Belnap J, Walker B J, Munson S M, et al. Controls on sediment production in two U.S. deserts[J]. *Aeolian Research*, 2014, 14:15-24.
- [13] Liu F, Zhang G H, Sun L, et al. Effects of biological soil crusts on soil detachment process by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2016, 41(7):875-883.
- [14] 张冠华,易亮,丁文峰,等.三峡库区生物结皮对土壤分离过程的影响及其机制[J].土壤,2021,53(3):610-619.
- [15] Bowker M A, Belnap J, Chaudhary V B, et al. Johnson. Revisiting classic water erosion models in drylands: The strong impact of biological soil crusts[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(9):2309-2316.
- [16] Gao L Q, Bowker M A, Xu M X, et al. Biological soil crusts decrease erodibility by modifying inherent soil properties on the Loess Plateau, China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 105:49-58.
- [17] Liu F, Zhang G H, Sun F B, 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.
- [18] 李宁宁,张光辉,王浩,等.黄土丘陵沟壑区生物结皮对土壤抗蚀性能的影响[J].中国水土保持科学,2020,18(1):42-48.
- [19] Cheng C, Gao M, Zhang Y D, et al. Effects of disturbance to moss biocrusts on soil nutrients, enzyme activities, and microbial communities in degraded karst landscapes in southwest China[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 152:e108065.
- [20] 赵允格,许明祥,王全九,等.黄土丘陵区退耕地生物结皮理化性状初报[J].应用生态学报,2006,17(8):1429-1434.
- [21] 王芳芳,肖波,李胜龙,等.黄土高原生物结皮对土壤养分的表层聚集与吸附固持效应[J].植物营养与肥料学报,2021,27(9):1592-1602.
- [22] 张光辉.退耕驱动的近地表特性变化对土壤侵蚀的潜在影响[J].中国水土保持科学,2017,15(4):143-154.
- [23] 冉茂勇,赵允格,刘玉兰.黄土丘陵区不同盖度生物结皮土壤抗冲性研究[J].中国水土保持,2011(12):43-45.
- [24] 张显强,刘天雷,从春蕾.贵州 5 种喀斯特石生藓类成土及保土生态功能研究[J].中国岩溶,2018,37(5):708-713.
- [25] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Effect of natural restoration time of abandoned farmland on soil detachment by overland flow in the Loess Plateau of China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2013, 38(14):1725-1734.