

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.004

田婧,王兵,马金龙,等.生物结皮生长发育对黄绵土抗侵蚀性能的影响[J].水土保持学报,2024,38(3):73-81.

TIAN Jing, WANG Bing, MA Jinlong, et al. Effects of biological soil crusts development on soil erosion resistance of loessial soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 73-81.

生物结皮生长发育对黄绵土抗侵蚀性能的影响

田婧¹, 王兵^{1,2}, 马金龙¹, 白洁¹, 张智健¹

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 黄土高原退耕还林(草)工程驱动的生物结皮发育可显著抑制土壤侵蚀,为探明土壤抗侵蚀性能随生物结皮生长发育的变化特征及其响应机制。[方法] 设置藻结皮、藓结皮和自然演替结皮 3 个处理,培育 176 天,系统研究生物结皮不同发育阶段及其类型差异对黄绵土抗侵蚀性能的影响。[结果] (1)生物结皮盖度、厚度、生物量、叶绿素和粗糙度随生长时间均显著增加,培育初期藓结皮较高,培育末期自然演替结皮反而最高。(2)随生物结皮发育,土壤黏结力呈幂函数增强,较初期增加 39.8%~60.3%;质量损失率呈指数函数减小,较初期降低 45.6%~57.3%;饱和导水率变化趋势较为复杂,但培育末期均最低(0.08~0.12 mm/min)。(3)土壤黏结力随生物结皮盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度的增加呈幂函数增长,质量损失率随生物结皮盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度的增加呈指数函数下降。(4)土壤抗侵蚀综合指数(C_{ser})可表示为盖度(Cov)、厚度(T)和生物量(B)的幂函数($C_{ser} = 0.279 Cov^{0.194} T^{0.188} B^{0.119}$, $R^2 = 0.73$, $p < 0.05$)。[结论] 黄土高原生物结皮发育可显著提高黄绵土抗侵蚀性能,藓结皮效果最强。

关键词: 地表粗糙度; 土壤黏结力; 饱和导水率; 质量损失率; 黄土高原

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0073-09

Effects of Biological Soil Crusts Development on Soil Erosion Resistance on Loessial Soil

TIAN Jing¹, WANG Bing^{1,2}, MA Jinlong¹, BAI Jie¹, ZHANG Zhijian¹

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWB, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The extensive development of biological soil crusts driven by the project of “Grain for Green” on the Loess Plateau can significantly inhibit soil erosion, but the characteristics of soil erosion resistance and the response mechanism with the growth and development of biological soil crusts are still unclear. [Methods] Algal crusts, moss crusts, and natural succession crusts were cultivated for 176 days to systematically study the effects of different developmental stages and types of biological soil crusts on loessial soil erosion resistance. [Results] (1) The coverage, thickness, biomass, chlorophyll and roughness of the biological soil crusts increased significantly with growth time, and the moss crusts were higher at the beginning of cultivation and the natural succession crusts were highest at the end of cultivation. (2) With the development of biological soil crusts, the cohesion increased as a power function, which increased by 39.8%~60.3% compared with the initial period; the mass loss rate decreased exponentially, which decreased by 45.6%~57.3% compared with the initial period; and the saturated hydraulic conductivity(K_s) was more complex, but the K_s was lowest at the end of cultivation(0.08~0.12 mm/min). (3) Soil cohesion increased as a power function with the increase of coverage, thickness, chlorophyll, biomass and roughness, and the mass loss rate decreased exponentially with the increase of coverage, thickness, chlorophyll, biomass and

收稿日期: 2023-06-28

修回日期: 2023-10-20

录用日期: 2023-11-15

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-04-29

资助项目: 国家自然科学基金面上项目(42377352); “十四五”国家重点研发计划项目(2022YFF1300405)

第一作者: 田婧(1997—), 女, 甘肃天水人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: tianj1016@163.com

通信作者: 王兵(1982—), 男, 陕西武功人, 博士, 研究员, 主要从事植被恢复与土壤侵蚀研究。E-mail: bwang@ms.iswc.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

roughness. (4) The comprehensive index of soil erosion resistance (C_{ser}) constructed based on soil properties can effectively show the effect of biological soil crusts development on soil erosion resistance. And the C_{ser} can be expressed as a power function of coverage (Cov), thickness (T) and biomass (B) ($C_{\text{ser}} = 0.279 \text{ Cov}^{0.194} T^{0.188} B^{0.119}$, $R^2 = 0.73$, $p < 0.05$). [Conclusion] The development of biological soil crusts on the Loess Plateau can significantly improve soil erosion resistance, and the effect of moss crusts is the best.

Keywords: surface roughness; soil cohesion; saturated hydraulic conductivity; the mass loss rate; the Loess Plateau

Received: 2023-06-28

Revised: 2023-10-20

Accepted: 2023-11-15

Online(www.cnki.net): 2024-04-29

黄土高原生态环境脆弱,自退耕还林(草)工程实施以来,生物土壤结皮(biological soil crusts, BSCs, 简称生物结皮)广泛发育,其覆盖率可达 70% 以上,提升土壤抗侵蚀性能,对于控制该区水土流失具有重要作用^[1]。生物结皮是由藻类、地衣、藓类和微生物以及相关的其他生物体通过自身的菌丝体、假根及代谢产生的分泌物等与土壤表层颗粒胶结形成的十分复杂的生物—土壤复合层^[2]。其生长发育可显著影响土壤水分运动与循环和土壤养分状况,进而影响土壤抗侵蚀性能。首先,生物结皮通过假根系及菌丝体捆绑束缚作用和微生物分泌物黏结作用增强土体抵抗侵蚀能力,其在水平方向形成的稳定层状结构,覆盖地表可削减雨滴动能,保护表层土壤免受侵蚀^[3]。其次,生物结皮生长发育影响土壤表面粗糙度、持水性及斥水性,从而改变地表入渗及产汇流过程^[4-6]。一方面,生物结皮延长径流在地表的停滞时间从而增加入渗^[5];另一方面,生物结皮发育形成不透水层可降低地表入渗速率和土壤饱和导水率,其影响程度与生物结皮厚度相关^[6];再者,生物结皮生长发育可提高土壤表层黏粒和有机质含量,增强黏结力,改变土壤容重,进而影响土壤抗侵蚀性能^[7-8]。生物结皮对土壤抗侵蚀性能的影响与其生长发育特征有关。随生物结皮盖度的增加,土壤黏结力也呈显著增加趋势。生物结皮发育特征对土壤容重的影响存在差异,有研究^[8]认为,土壤容重随着结皮生物量的增加而减小,也有研究^[9]认为,土壤容重随生物结皮厚度及叶绿素的增加而增加。此外,生物结皮类型对土壤抗侵蚀性能的影响也存在差异,藓结皮对土壤团聚体稳定性功能的提升显著大于藻结皮^[10],高丽倩等^[11]研究也证实藓结皮发育土壤可蚀性明显小于藻结皮。

目前,有关生物结皮对土壤抗侵蚀性能的研究多侧重于生物结皮特征对土壤侵蚀过程的影响,而生物结皮生长发育过程及其结皮类型对土壤抗侵蚀性能的影响缺乏系统研究。基于此,选取黄土高原典型黄绵土,通过培育藻结皮、藓结皮及自然演替生物结皮,

系统研究生物结皮类型及其生长发育过程中黄绵土容重、土壤黏结力、饱和导水率和质量损失率的变化特征,提出基于上述指标的土壤抗侵蚀综合指数,阐明黄土高原典型生物结皮生长发育影响土壤抗侵蚀性能的作用机制,以期揭示生物结皮影响土壤侵蚀过程机理提供理论依据,为土壤侵蚀精准控制提供科学借鉴。

1 材料与方法

1.1 试验设计

设置藻结皮、藓结皮和自然演替结皮 3 个处理,2 个重复,采用土槽(2 m×0.5 m×0.6 m,长×宽×高)于 2021 年 3 月 20 日进行生物结皮接种,培育时长为 176 天。在 4 月 20 日进行第 1 次取样测量,之后每隔 1 个月左右,取样 1 次,共计 5 次。

试验在中国科学院水土保持研究所开展,土样取自安塞区退耕地表层(0—40 cm)的黄绵土(黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 15.7%,63.5%和 29.8%,有机质含量为 19.82 g/kg)。装填土槽时,底部铺 10 cm 厚的细砂,并在细砂与土壤间铺 1 层纱布,保证土壤水分均匀下渗,之后分 4 层填土,每层高 10 cm,并将表面打毛,消除分层现象,填土容重控制在 1.2 g/cm³。土槽填土后静止 1 周,采用撒播法接种藻结皮和藓结皮,接种量为 1 000 g/m²,自然演替处理不进行人工种源接种,只将土槽置于同等环境条件下使其自然发育。生物结皮样品采自陕西省安塞县南沟,经鉴定,此区域的藻结皮主要为蓝藻类(*Cyanobacterium*),藓结皮优势种为长尖对齿藓(*Didymodon ditrichoides*)。在环境较为干旱时,完整揭下藻结皮和藓结皮层(结皮层厚度约 1 cm),分别装入洁净铝盒中,运回实验室自然阴干。挑出石子及植物残体,并将其粉碎后过 120 目土壤分样筛,获得藻结皮和藓结皮的接种材料。所有处理培育方式一致,培育期内,每隔 2 天浇 1 次水(可根据降雨量及降雨频次调整浇水频率),保持生物结皮表面湿润并控制土壤含水率为 20%~30%,并在培育第 1 个月采用遮阳网

进行遮阳保湿处理。

1.2 研究方法

1.2.1 指标测定 (1)生物结皮生长特征测定方法

盖度测定采用点针样框法^[12],每个处理6次重复。网格规格为25 cm×25 cm,按“S”形布设样方,通过记录生物结皮出现的频次,计算其盖度。

厚度采用游标卡尺测定,每个处理8次重复。测定时轻轻施加外力使生物结皮层与下层土壤自然分离,测量其4个方向的厚度,取平均值。

叶绿素采用萃取一分光光度法^[13]测定,每个处理6次重复。在暗处用研钵将生物结皮研碎,取3 g放入离心管,并加入25 mL乙醇溶剂,于85℃恒温水浴锅中萃取,样品沸腾后取出,冷却10 min,振荡20 min,随后离心10 min(4 000 r/min),用滤纸过滤上清液并于波长665,750 nm处测吸光值,然后加5滴1 mol/L的HCl酸化,90 s后置于波长665,750 nm处再次测吸光值。叶绿素含量的计算公式为:

$$\text{Chl} = 29.6 \times [(E_{665} - E_{750}) - (A_{665} - A_{750})] \times V/M \quad (1)$$

式中:Chl为测定的叶绿素含量(mg/g); E_{665} 、 E_{750} 分别为萃取液酸化前于波长665,750 nm处测吸光值; A_{665} 、 A_{750} 分别为萃取液酸化后于波长665,750 nm处测吸光; V 为萃取液体积(mL); M 为土样质量(g)。

生物量采用打孔器取样测定^[5],每个处理6次重复。将风干后遮光保存的生物结皮用水喷湿,使其脱离休眠状态,然后用打孔器取一定的面积(0.95 cm²)的藓结皮样品放入网筛中冲洗,收集网筛中藓植物放至称量瓶中,于烘箱中85℃杀青30 min后,65℃烘干至恒重后称重,计算出单位面积生物结皮的生物量。

表面粗糙度采用链条法^[12]测量,每种处理6次重复。选用链条长、链节长和直径分别为200,1.12,0.91 mm的银质链条。表面粗糙度计算公式为:

$$R = (1 - L_2/L_1) \times 100 \% \quad (2)$$

式中: R 为生物结皮表面粗糙度; L_1 为链条原始长度(mm); L_2 为链条按生物结皮表面起伏放置后的长度(mm)。

(2)土壤抗侵蚀性能指标测定方法

土壤容重采用环刀法测量,每个处理6次重复。去除生物结皮层后,采用体积为100 cm³的环刀插入土壤采集土样,并将采集的样品放至于105℃下烘干至恒重,计算单位体积土壤干重。

土壤黏结力用袖珍黏结力仪(MI-1410e)测定,每个处理6次重复。测定前先用喷壶将地表喷湿,使

地表充分湿润,然后将黏结力仪的叶轮垂直插入土壤,顺时针扭动黏结力仪,当扭矩达到土壤最大抗剪强度时,土壤开始转动,此时记下黏结力仪刻度盘上的数值。

土壤饱和导水率采用常水头法测定,每个处理6次重复。环刀规格同土壤容重。在泡至饱和的环刀上垫上滤纸,在其上用防水胶带固定1个空环刀,并在上层环刀中加满水,利用马氏瓶继续加水,每隔5 min测定1次出水量,同时,在试验开始、期间、结束各测定1次水温,取平均值。饱和导水率计算公式为:

$$K_s = \frac{10 QL}{St h (0.7 + 0.03T)} \quad (3)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率(mm/min); Q 为过一定截面积的水量(mL); L 为饱和土层厚度(cm); S 为环刀横截面积(cm²); t 为渗透过水量 Q 所需的时间(min); h 为水头高差(cm); T 为试验期间平均水温(℃)。

质量损失率采取改进湿筛法^[14]测定,每个处理6次重复。取3 cm×3 cm×1 cm(长×宽×高)的生物结皮小块,使用FT-3型电动团粒分析仪,振荡前喷水使其饱和并静置2 h后称重(原质量)并开始振荡,振荡周期为1.9 s,共30 min,吸干表面水分后静置2 h,称重并计算质量损失率(质量损失率=损失量/原质量)。

1.2.2 土壤抗侵蚀综合指数 目前,有关土壤抗侵蚀性能的研究多集中于单指标分析,现引用模糊数学原理,建立土壤抗侵蚀综合指数,综合评价生物结皮对土壤抗侵蚀性能的影响。WANG等^[15]利用此方法量化不同退耕年限近地表特征对土壤抗侵蚀性能的影响,取得理想的结果。具体计算方法为:

$$C_{\text{ser}} = \sum_{i=1}^n = K_i C_i \quad (4)$$

式中: C_{ser} 为综合土壤抗侵蚀综合指数; K_i 和 C_i 分别为第 i 个土壤抗蚀性能指标的权重, $K_i C_i$ 为第 i 个因子对 C_{ser} 的贡献率。

通过因子分析法得土壤容重、黏结力、饱和导水率和质量损失率所占权重分别为0.15,0.31,0.23,0.31。隶属度通过“S”形曲线、反“S”形曲线关系确定。“S”形隶属函数表示与土壤抗侵蚀性能正相关,可抽象为上升半梯形分布(公式2),其中包含黏结力和饱和导水率;反“S”形隶属函数表示与土壤抗侵蚀性能负相关,可抽象为下降半梯形分布(公式3),其中包含土壤容重和质量损失率(表1)。

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \geq b \\ \frac{x-a}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \leq a \end{cases} \quad (5)$$

$$u(x) = \begin{cases} 1 & x \leq b \\ \frac{x-a}{b-a} & b < x < a \\ 0 & x \geq a \end{cases} \quad (6)$$

式中: $u(x)$ 为隶属函数, x 为土壤抗侵蚀性能指标值, $[a, b]$ 、 $[b, a]$ 分别为各指标实测值范围。

表 1 土壤抗侵蚀性能指标在隶属函数中的临界值

Table 1 The critical value of soil erosion resistance index in membership function

指标	“S”形曲线		反“S”形曲线	
	黏结力/ kPa	饱和导水率/ (mm·min ⁻¹)	容重/ (g·cm ⁻³)	质量 损失率/%
a	3.82	0.01	1.35	100
b	7.46	0.47	1.20	25

1.3 数据处理

利用 Excel 2010 软件进行数据记录与处理,利

用 SPSS 22 软件对生物结皮发育特征及土壤抗侵蚀性能指标进行单因素方差分析,使用 Pearson 相关分析及主成分分析揭示各因素的影响程度,使用 OriginPro 2018 软件分析拟合及绘图。

2 结果与分析

2.1 培育时间对不同生物结皮发育特征的影响

随生物结皮生长发育,藻结皮、藓结皮和自然演替结皮其盖度、叶绿素和生物量呈幂函数增加,厚度和表面粗糙度呈指数函数增加(图 1)。培育前 92 天,藓结皮盖度、叶绿素和表面粗糙度均显著高于藻结皮和自然演替结皮。培育 92 天,不同处理间仅生物量存在显著差异,藓结皮生物量显著高于藻结皮和自然演替结皮。培育 92 天后,生物结皮生长发育指标仅随培育时间的增加而显著增加,各处理间差异不显著。经过 176 天的培育,生物结皮盖度、叶绿素、生物量、厚度和表面粗糙度最终分别为 81.18%~86.91%, 147.51~175.18 mg/g, 100.67~132.67 g/m², 2.94~3.34 mm, 8.13~9.35。

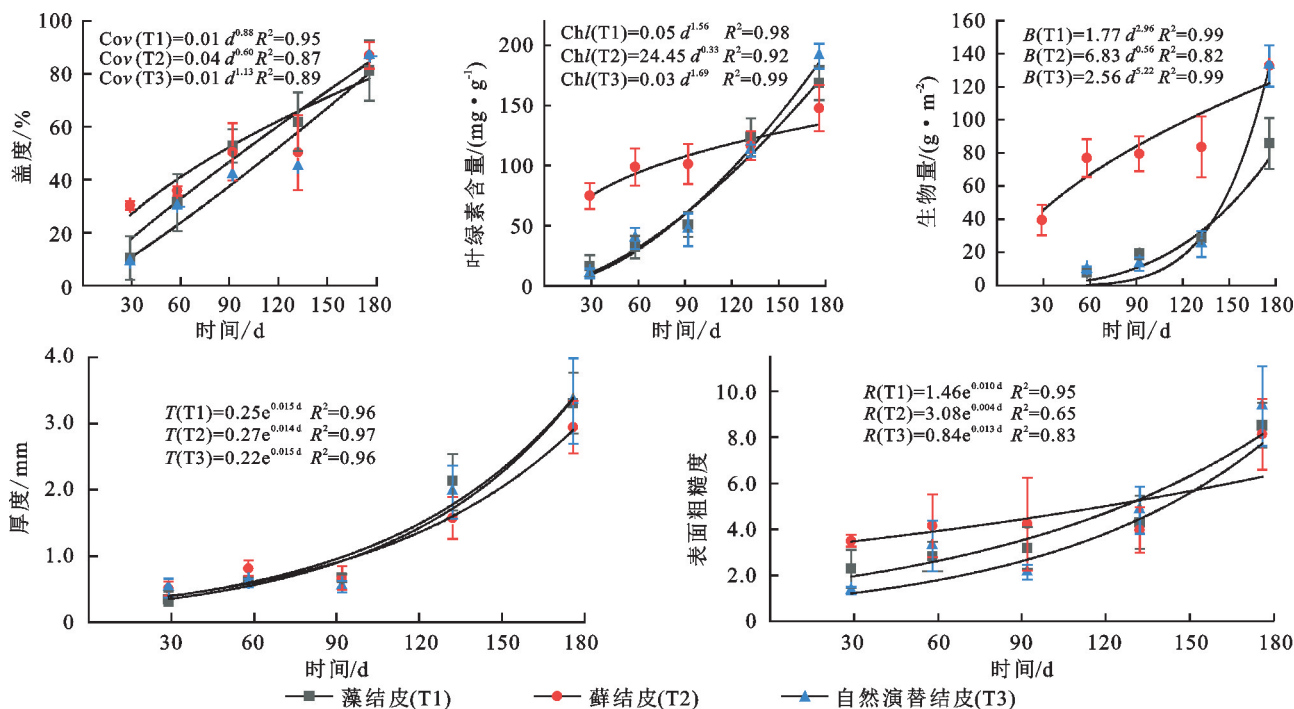


图 1 生物结皮生长发育特征

Fig. 1 Characteristics of biological soil crusts

2.2 不同生物结皮覆盖下土壤抗侵蚀性能变化

生物结皮可显著影响土壤抗侵蚀性能(图 2),土壤容重变化范围较小(1.27 ± 0.03 g/cm³)。土壤黏结力随生物结皮生长发育均呈幂函数增加($R^2 \geq 0.73$, $p < 0.05$)。培育 29 天,土壤黏结力存在显著差异,即藻结皮>藓结皮>自然演替结皮。当培育 92

天后,土壤黏结力在藻结皮、藓结皮和自然演替结皮间不存在显著差异,仅随培育时间的增加而显著增加。培育 176 天,藻结皮、藓结皮和自然演替结皮土壤黏结力相较于 29 天分别增加 39.8%, 53.1%, 60.3%。随生物结皮生长发育,藻结皮饱和导水率呈下降趋势;藓结皮饱和导水率先增加后迅速降低;自

然演替结皮在培育 29 天时,饱和导水率显著高于藻结皮和藓结皮,培育 58 天时显著下降,随后变化趋势与藓结皮一致。其中,藓结皮在培育 58~132 天内,饱和导水率高于藻结皮和自然演替结皮。质量损失率随生物结皮生长发育均呈指数函数下降($R^2 \geq$

0.99, $p < 0.05$),藓结皮显著低于藻结皮和自然演替结皮。藓结皮培育 92 天其质量损失率显著下降,藻结皮培育 132 天显著下降,自然演替结皮培育 176 天显著下降,即自然演替结皮变化滞后于藻结皮,藻结皮滞后于藓结皮。

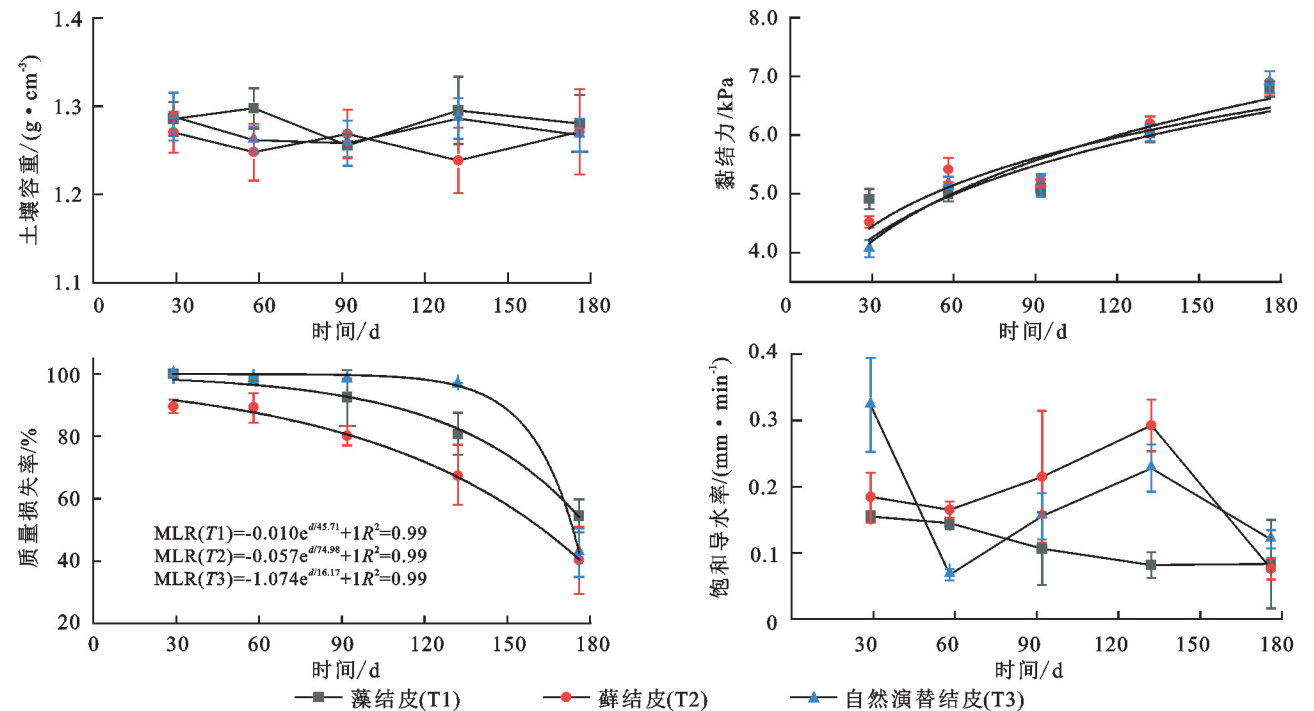


图 2 土壤抗侵蚀性能

Fig. 2 Soil erosion resistance

2.3 生物结皮发育特征对土壤抗侵蚀性能的影响
生物结皮生长发育特征变化是影响土壤抗侵蚀性能的主要因素。生物结皮盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度与土壤容重相关性不显著,与黏结力呈极显著正相关;与饱和导水率存在显著差异(除生物量外),但相关系数小;与质量损失率极显著负相关(表 2)。

表 2 生物结皮发育特征与土壤抗侵蚀性能的 person 相关分析
Table 2 Person correlation analysis between characteristics of BSCs and soil erosion resistance

指标	盖度	厚度	叶绿素	生物量	表面粗糙度
容重	-0.110	0.059	-0.078	-0.140	0.012
黏结力	0.829 **	0.904 **	0.824 **	0.679 **	0.755 **
饱和导水率	-0.326 **	-0.314 **	-0.270 *	-0.086	-0.335 **
质量损失率	-0.812 **	-0.807 **	-0.829 **	-0.810 **	-0.803 **

注: **、* 分别表示 $p < 0.01$ 和 $p < 0.05$ 。

为进一步探究生物结皮盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度与黏结力和质量损失率的定量关系,将各指标进行非线性拟合发现,土壤黏结力随盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度的增加呈幂函数增加,且土壤黏结力与厚度的拟合效果最优。质量损

失率随盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度的增加呈指数函数下降,且质量损失率与生物量的拟合效果最优(图 3, $p < 0.05$)。
通过主成分分析,再次证实生物结皮生长发育特征对土壤黏结力和质量损失率的影响显著(图 4)。藻结皮、藓结皮和自然演替结皮间存在差异,藻结皮对土壤容重的影响较大,藓结皮对饱和导水率的影响较大,自然演替结皮对土壤黏结力和质量损失率的影响较大。为综合评价生物结皮发育特征对土壤抗侵蚀性能的影响,引入土壤抗侵蚀综合指数(C_{ser})。土壤抗侵蚀综合指数随生物结皮生长发育呈幂函数增加($R^2 \geq 0.81$, $p < 0.05$),且藓结皮始终高于藻结皮和自然演替结皮,即藓结皮对土壤抗侵蚀性能的提升效果优于藻结皮和自然演替结皮(图 5)。
此外,对土壤抗侵蚀综合指数与生物结皮生长发育特征指标进行多元逐步回归发现,综合指数(C_{ser})随生物结皮盖度(Cov)、厚度(T)和生物量(B)的增加呈幂函数增加($C_{ser} = 0.279Cov^{0.194} T^{0.188} B^{0.119}$, $R^2 = 0.73$, $p < 0.05$)。

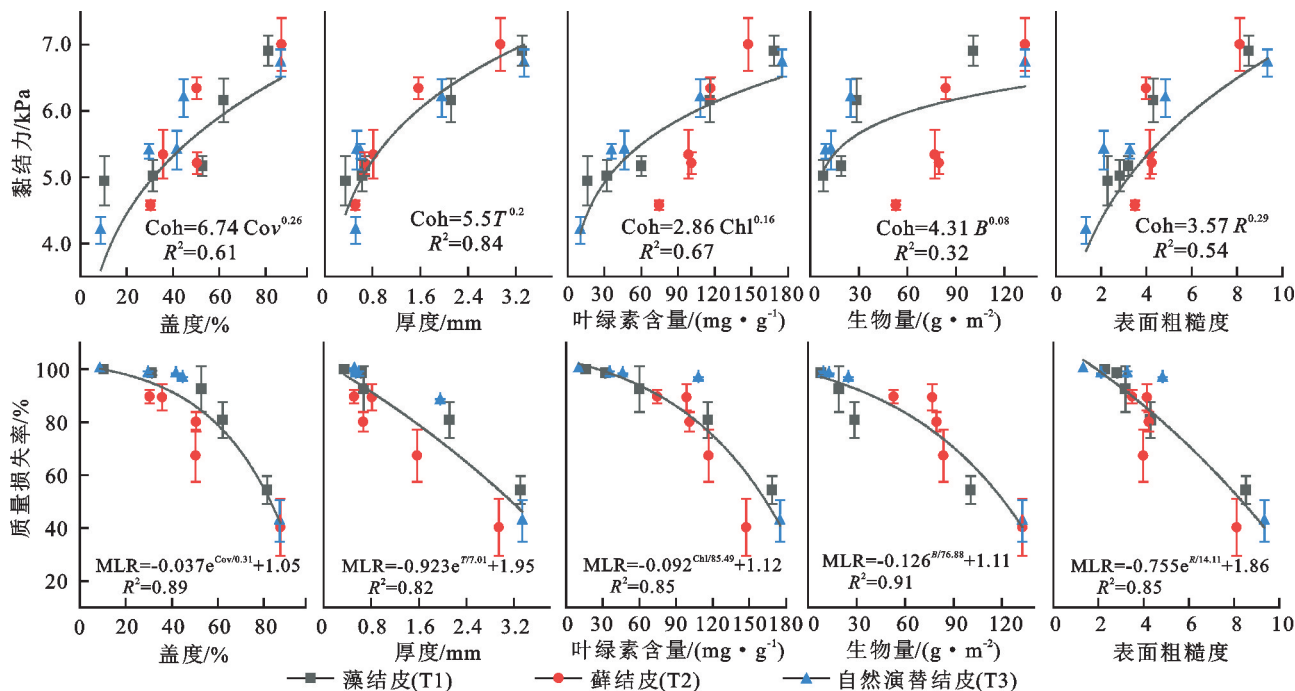


图 3 生物结皮发育特征与土壤抗侵蚀性能的相关关系

Fig. 3 Correlation analysis between characteristics of biological soil crusts and soil erosion resistance

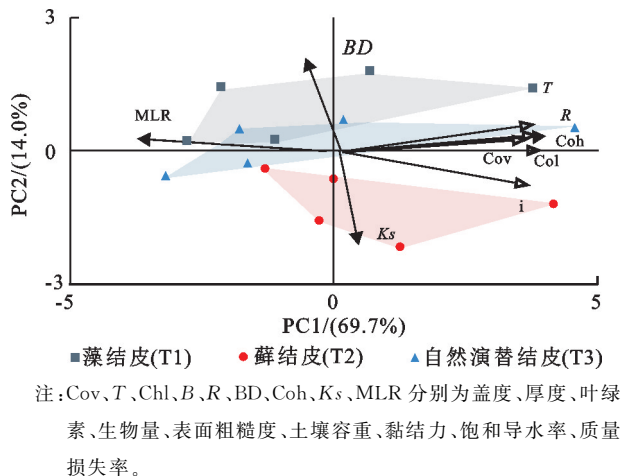


图 4 土壤抗侵蚀性能主成分分析

Fig. 4 Principal component analysis (PCA) of soil erosion resistance

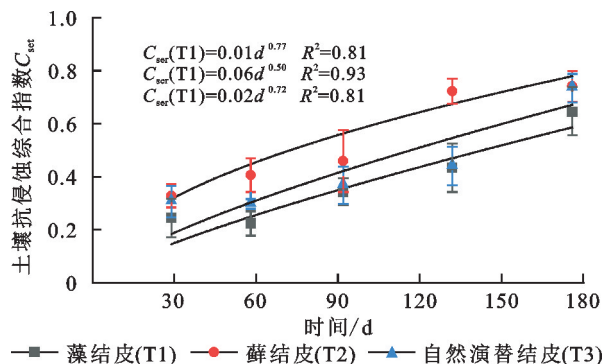


图 5 土壤抗侵蚀综合指数随生物结皮发育变化规律

Fig. 5 The comprehensive index of soil erosion resistance changes with the growth and development of biological soil crusts

3 讨论

生物结皮盖度、厚度、叶绿素、生物量及表面粗糙度是表示生物结皮发育特征的重要指标,随着生物结皮生长发育,上述指标呈幂函数或指数函数增长趋势。培育前 92 天内,藓结皮盖度、叶绿素、生物量、厚度和表面粗糙度均高于藻结皮和自然演替结皮。相较于无人添加生物结皮种源的自然演替结皮,相同环境条件下人工接种结皮发育速度较快,藓结皮为藻结皮的高级演替形态,其叶绿素、生物量和表面粗糙度显著高于其他处理。贾艳等^[16]研究表明,当培育时间一致时,自然形成的生物结皮盖度和密度均低于人工结皮。但培育 92 天后,藻结皮、藓结皮和自然演替结皮间不存在显著差异。可能是由于生物结皮演替速率与其生长环境密切相关,生物结皮在荒漠区域演替速率很慢,从结皮形成到发育为成熟结皮需要十几年时间,但在水分条件较好的半干旱区,整个演替在 1 年或几年即可完成^[17]。本试验中,生物结皮种源来自黄土丘陵沟壑区,培育地位于关中平原,湿热多雨,平均气温为 25.8℃,水热条件适宜,藻结皮与自然演替结皮可迅速发育演替。此外,生物结皮种源与培育地优势种可能存在差异,导致人工接种的藻结皮和藓结皮与当地演替结皮存在竞争关系。随生长时间增加,其对养分和生长空间的竞争也进一步加强,最终导致自然演替和藻结皮生长特征与苔藓结皮差异较小,甚至略高于藓结皮。TIAN 等^[18]研究也表明,人工藓结皮在培育 3~4 个月,逐渐出现衰退现象。

生物结皮生长发育过程中通过改变土壤容重、黏结力、入渗性能(饱和导水率)和土壤水稳性(质量损失率)等土壤性质,进而影响土壤抗侵蚀性能。生物结皮假根系及其胞外多糖等分泌物能够黏结土壤颗粒与有机物质,影响土壤颗粒组成与土壤孔隙度等,从而改变土壤容重和黏结力^[8]。本研究中,不同处理和培育时间均对土壤容重无显著影响,主要是由于生物结皮培育时长仅6个月,其对土壤的影响局限于表层土壤,不足以影响生物结皮层下的土壤容重。李盼盼等^[19]研究也表明,土壤容重及养分等指标变化相对缓慢,年内无显著差异。生物结皮生长发育过程中,假根及菌丝不断生长发育,其根系的捆绑作用、分泌物的胶结作用显著影响表层土壤黏结力。藓结皮由于假根和菌丝发育程度较高,其缠绕捆绑土壤颗粒能力较强,且生物结皮的假根、菌丝本身具有一定的抗剪性,因而,其黏结力高于藻结皮和自然演替结皮^[20]。

生物结皮通过增加地表粗糙度的方式捕获降尘,增加土壤细颗粒含量,堵塞土壤孔隙,阻挡水流入渗通道^[12]。此外,藻类、藓类及其与微生物分泌的多糖物质吸水迅速膨大形成不透水层,也可有效降低土壤入渗^[21]。BELNAP^[22]指出,生物结皮润湿后体积迅速膨大,藓结皮约膨胀13倍,藻结皮约膨胀8倍。生物结皮类型差异也可显著影响土壤水分入渗特征。本研究中,饱和导水率随藻结皮发育呈下降趋势,随藓结皮发育呈上升趋势(除176天),可能与生物结皮斥水性相关。孙福海等^[23]研究表明,饱和导水率受生物结皮斥水性影响,藻结皮斥水性随结皮发育程度逐渐增强,而藓结皮与之相反。培育29天,自然演替结皮饱和导水率显著高于藻结皮和藓结皮,此时,自然演替结皮土壤结构与裸土相似,而藻结皮和藓结皮均已开始发育,生物结皮和物理结皮协同抑制水分入渗^[24]。培育58~132天时,藓结皮饱和导水率高于藻结皮和自然演替结皮,相对于藓结皮,藻结皮和自然演替结皮的表层更封闭,降低入渗作用更显著^[25]。当培育176天时,藻结皮、藓结皮和自然演替结皮饱和导水率均下降,可能是此期间生物结皮发育快,盖度显著增加(高达80%及以上),生物结皮层吸水膨胀后形成密闭的不透水壳状结构,显著降低饱和导水率。一方面,培育前期土壤表面形成的物理结皮阻塞水分入渗;另一方面,生物结皮易吸水膨胀堵塞孔隙,吸附滞留土壤细颗粒的能力提升,加剧非毛管孔隙的形成。

土壤水稳性也与生物结皮生长发育密切相关,质量损失率随生物结皮发育时间呈指数函数下降。培育前3个月,生物结皮处于形成期,质量损失率随生

物结皮生长发育均无显著差异,随着水热条件逐渐适宜,生物结皮逐渐从形成期转为快速发育期,部分藻结皮演替为藓结皮,结皮层水稳性快速提高^[26]。此外,土壤水稳性与生物结皮类型有关。在整个培育期内,藓结皮质量损失率均显著低于其他处理,且质量损失率变化速率表现为藓结皮>藻结皮>自然演替结皮。杨凯等^[14]研究表明,藓结皮由于假根及其藻丝体共同穿插固结土壤,其质量损失率低于仅靠藻丝体缠绕土壤颗粒的藻结皮。

土壤容重、黏结力、饱和导水率和质量损失率可有效解释黄绵土抗侵蚀性能随生物结皮生长发育变化特征及其影响机制,基于上述土壤性质构建的土壤抗侵蚀综合指数可有效反映生物结皮发育对土壤抗侵蚀性能的影响。土壤抗侵蚀综合指数随生物结皮生长发育时间的增加呈幂函数增加,表明生物结皮的生长发育可显著提高土壤抗侵蚀性能,且藓结皮对土壤抗侵蚀性能的影响最强。此外,土壤抗侵蚀综合指数可表征为生物结皮盖度、厚度和生物量的幂函数。生物结皮盖度可表征生物结皮影响土体的范围;生物结皮厚度一定程度上可表征丝状藻类、苔藓假根及微生物对土壤的捆绑作用,其厚度越大捆绑效果越强^[20];在生物结皮盖度和厚度均一致时,其生物量越高结皮层越致密其作用效果越强^[5,8-9]。虽然,人工培育和自然演替的生物结皮均可显著影响土壤抗侵蚀性能,但在培育前3个月,人工接种生物结皮生长发育速率更快,对土壤抗侵蚀的提升效果也更强。因此,在急需修复地区及环境脆弱地区,可通过人工培育生物结皮迅速提高土壤抗侵蚀性能,抑制土壤侵蚀,为后续生态系统良性演替提供保障。

4 结论

(1)生物结皮生长发育过程中,其盖度、叶绿素和生物量呈幂函数增加,厚度和表面粗糙度均呈指数函数增加,且相同环境条件下人工接种结皮发育速度较快。

(2)生物结皮生长发育显著影响黄绵土表层黏结性、土壤入渗特征和水稳性。土壤黏结力随其盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度的增加均呈幂函数增长,质量损失率随其盖度、厚度、叶绿素、生物量和表面粗糙度的增加呈指数函数下降,当生物结皮盖度达到80%时,可显著降低饱和导水率。

(3)土壤抗侵蚀综合指数可有效反映生物结皮发育对土壤抗侵蚀性能的影响,且可表征为生物结皮盖度、厚度和生物量的幂函数。藓结皮覆盖下土壤抗侵蚀性能总体最强,随着结皮生长发育,自然演替结皮土壤抗侵蚀性能逐渐优于藻结皮。在环境脆弱地区,人工培育生物结皮可迅速增强土壤抗侵蚀性能。

参考文献:

- [1] 赵允格, 许明祥, 王全九, 等. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响[J]. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-448.
ZHAO Y G, XU M X, WANG Q J, et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau, China[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(3): 441-448.
- [2] ELDRIDGE D J, GREENE R. Microbiotic soil crusts: A review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia[J]. Soil Research, 1994, 32(3): e389.
- [3] 许欢欢, 张宝琦, 汪建芳, 等. 黄土高原典型生物结皮对坡面产流产沙过程的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 8-13.
XU H H, ZHANG B Q, WANG J F, et al. Effects of typical biological crusts on slope run off and sediment load in Loess Plateau region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 8-13.
- [4] 杨凯, 赵军, 赵允格, 等. 生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 135-141.
YANG K, ZHAO J, ZHAO Y G, et al. Characteristics of runoff on biological soil crust slope in different rainfall durations[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(23): 135-141.
- [5] 井海梦, 赵允格, 刘姝延, 等. 黄土高原风蚀水蚀交错区农田生物结皮对土壤渗透性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(7): 1532-1539.
JING H M, ZHAO Y G, LIU S Y, et al. Effects of biological soil crusts on soil permeability of croplands in wind-water erosion crisscross region of Loess Plateau[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2023, 42(7): 1532-1539.
- [6] 郭迎香, 马波, 曾建辉, 等. 冻融交替对不同生物结皮土壤饱和导水率的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(2): 324-332.
GUO Y X, MA B, ZENG J H, et al. Influence of freeze-thaw alternation on saturated hydraulic conductivity of soil covered with different biological crusts[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2022, 53(2): 324-332.
- [7] 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饱和导水率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(12): 35-40.
XIAO B, ZHAO Y G, SHAO M A. Effects of biological soil crust on saturated hydraulic conductivity in water-wind erosion crisscross region, North of Shaanxi Province, China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(12): 35-40.
- [8] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤物理属性的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(8): 1316-1326.
GAO L Q, ZHAO Y G, QIN N Q, et al. Impact of biological soil crust on soil physical properties in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Journal of Natural Resources, 2012, 27(8): 1316-1326.
- [9] 张晨晖, 肖波, 李胜龙, 等. 东北黑土区农田生物结皮的特征及其对表层土壤崩解的影响[J]. 应用生态学报, 2022, 33(7): 1773-1782.
ZHANG C H, XIAO B, LI S L, et al. Characteristics of biocrusts in croplands and their effects on surface soil disintegration in the black soil region of Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(7): 1773-1782.
- [10] 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.
- [11] 高丽倩, 赵允格, 秦宁强, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤可蚀性的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(1): 105-112.
GAO L Q, ZHAO Y G, QIN N Q, et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in hilly loess plateau region of Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(1): 105-112.
- [12] 李林, 赵允格, 王一贺, 等. 不同类型生物结皮对坡面产流特征的影响[J]. 自然资源学报, 2015, 30(6): 1013-1023.
LI L, ZHAO Y G, WANG Y H, et al. Impact of different types of biological soil crusts on slope runoff generation[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(6): 1013-1023.
- [13] 李振伟. 黄土丘陵区小流域土壤分离能力空间变异[D]. 西安: 中国科学院研究生院, 2016.
LI Z W. Spatial variability of soil detachment capacity in a small watershed on the hilly Loess Plateau[D]. Xi'an: University of Chinese Academy Sciences, 2016.
- [14] 杨凯, 赵允格, 马昕昕. 黄土丘陵区生物土壤结皮层水稳性[J]. 应用生态学报, 2012, 23(1): 173-177.
YANG K, ZHAO Y G, MA X X. Water stability of biological soil crusts in hilly regions of Loess Plateau, Northwest China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(1): 173-177.
- [15] WANG H, ZHANG G H, LI N N, et al. Soil erodibility influenced by natural restoration time of abandoned farmland on the Loess Plateau of China[J]. Geoderma, 2018, 325: 18-27.
- [16] 贾艳, 白学良, 单飞彪, 等. 藓类结皮层人工培养试验和维持机制研究[J]. 中国沙漠, 2012, 32(1): 54-59.
JIA Y, BAI X L, SHAN F B, et al. Experiment of artificially culturing moss crust and its maintenance mechanism[J]. Journal of Desert Research, 2012, 32(1): 54-59.

- [17] 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.
ZHANG B C, WU Z F, LI B. Progress and prospect of biological soil crusts in Loess Plateau[J].Acta Pedologica Sinica,2021,58(5):1123-1131.
- [18] TIAN G Q, BAI X L, XU J, et al. Experimental studies on the natural restoration and the artificial culture of the moss crusts on fixed dunes in the tengger desert, China[J]. Frontiers of Biology in China,2006,1(1):13-17.
- [19] 李盼盼,王兵,刘国彬,等.氮添加对白羊草种群及土壤特征的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(2):35-42.
LI P P, WANG B, LIU G B, et al. Effects of nitrogen addition on the population characteristics of *Bothriochloa ischaemum* and soil properties[J].Science of Soil and Water Conservation,2017,15(2):35-42.
- [20] 李聪会,朱首军,陈云明,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J].水土保持研究,2013,20(3):6-10.
LI C H, ZHU S J, CHEN Y M, et al. Effects of biological crusts on soil anti-erodibility in loess hilly areas [J].Research of Soil and Water Conservation,2013,20(3):6-10.
- [21] XIAO B, SUN F H, HU K L, 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.
- [22] BELNAP J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J].Hydrological Processes, 2006,20(15):3159-3178.
- [23] 孙福海,肖波,李胜龙,等.黄土高原不同发育阶段生物结皮的导水和持水特征[J].草业学报,2021,30(6):54-63.
SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Effects of biological soil crusts in different developmental stages on soil water permeability and water holding capacity in the Chinese Loess Plateau[J].Acta Prataculturae Sinica,2021, 30(6):54-63.
- [24] 马金龙,许欢欢,王兵,等.黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022, 36(1):45-49.
MA J L, XU H H, WANG B, et al. Effect of soil physical crust on runoff and sediment yield on sloping farmland of the Loess Plateau[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(1):45-49.
- [25] 饶本强,吴易雯,李华,等.库布齐沙漠不同发育类型人工结皮对露水凝结作用的比较研究[J].水土保持学报, 2011,25(6):159-164.
RAO B Q, WU Y W, LI H, et al. Comparison studies on dew condensation of different developmental artificial crusts in Hopq Desert[J].Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(6):159-164.
- [26] 陈青.荒漠生物结皮微生物群落组成研究[D].银川:宁夏大学,2014.
CHEN Q. Investigation of microbial communities structure in biological soil crusts of desert [D]. Yinchuan: Ningxia University,2014.
- (上接第72页)
- [22] 路培,王林华,吴发启.不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(8):141-146.
LU P, WANG L H, WU F Q. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(8):141-146.
- [23] GIMÉNEZ D, ALLMARAS R R, HUGGINS D R, et al. Prediction of the saturated hydraulic conductivity-porosity dependence using fractals[J].Soil Science Society of America Journal,1997,61(5):1285-1292.
- [24] 马敢敢,李光录,穆旭东,等.雨滴直径对表土结构和入渗特征的影响[J].水土保持研究,2022,29(6):104-111.
- [25] LEGOUT C, LEGUÉDOIS S, LE BISSONNAIS Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements[J].European Journal of Soil Science,2005,56(2):225-238.
- [26] GUAN S, AN N, ZONG N, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow[J].Soil Biology and Biochemistry,2018,116:224-236.