

基于SfM近景摄影测量技术的藓结皮 坡面土壤侵蚀空间分布特征

陈浩然¹, 高丽倩^{1,2}, 欧阳文峰², 张采月¹, 王鹏³

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所)水土保持与荒漠化整治全国重点实验室, 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;
3.宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021)

摘要: [目的] 为探究黄土高原地区藓结皮坡面的土壤侵蚀-沉积空间分布特征。[方法] 以黄土高原不同盖度的藓结皮为研究对象,通过室内模拟降雨试验,结合运动恢复结构(structure-from-motion, SfM)近景摄影测量技术,分析不同盖度(裸土、20%、40%、60%、80%)的藓结皮坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征。[结果] 1)藓结皮覆盖显著降低坡面土壤侵蚀速率,与裸土坡面相比,藓结皮坡面降低程度分别为23.34%、37.01%、51.01%和71.26%。2)藓结皮坡面的侵蚀重点区域位于坡中上部裸土覆盖区域,沉积重点区域为坡底部藓结皮覆盖区域。3)藓结皮的覆盖有效降低坡面侵蚀区面积和侵蚀深度,与裸土坡面相比,不同盖度藓结皮坡面侵蚀区面积分别降低14.69%、42.97%、58.69%和82.25%,坡面侵蚀深度降低4 mm。4)藓结皮的覆盖使坡面产生沉积,不同盖度藓结皮坡面的沉积区面积分别为0.21%、8.41%、4.53%和0.41%,沉积厚度较裸土增加2 mm。5)藓结皮通过覆盖作用和拦截作用显著影响坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征。[结论] 研究结果对深入了解黄土高原生物结皮坡面土壤侵蚀空间分布规律及制定和实施有效的水土保持管理措施提供理论依据。

关键词: 生物结皮; 运动恢复结构; 土壤侵蚀沉积空间分布; 地表形态; 土壤侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2025)04-0324-07

Spatial Distribution Characteristics of Erosion on Moss Crust-Covered Slopes Using SfM Photogrammetry Technology

CHEN Haoran¹, GAO Liqian^{1,2}, OUYANG Wenfeng², ZHANG Caiyue¹, WANG Peng³

(1.State of Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, College of Soil and Water Conservation Science and Engineering (Institute of Soil and Water Conservation), Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3.School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: [Objective] This study aimed to investigate the effects of moss crusts on the spatial distribution characteristics of soil erosion and deposition on slopes on the Loess Plateau. [Methods] Simulated rainfall experiments integrated with Structure-from-Motion (SfM) photogrammetry were conducted to analyze the spatial distribution of soil erosion and deposition on slopes with varying moss crust coverage levels (bare soil, 20%, 40%, 60% and 80%). [Results] 1) Moss crusts significantly reduced soil erosion rates by 23.34%, 37.01%, 51.01% and 71.26%, respectively, compared to bare slopes. 2) The primary erosion zones on moss crust-covered slopes were located in the bare patches of the upper and middle part of the slopes, while deposition predominantly

收稿日期:2025-01-10

修回日期:2025-03-22

录用日期:2025-04-26

网络首发日期(www.cnki.net):2025-05-14

资助项目:中国科学院“西部之光”人才培养计划项目(XAB2022YW01);国家重点研发计划项目(2022YFF1300802);宁夏回族自治区重点研发计划项目(2024BEG03002)

第一作者:陈浩然(1999—),男,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:chen_hc1597@163.com

通信作者:高丽倩(1986—),女,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀与土壤生态研究。E-mail:glq@nwfufu.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

occurred in moss crust-covered regions at the base of the slopes. 3) Compared to bare slopes, moss crusts effectively reduced the area of slope erosion by 14.69%, 42.97%, 58.69% and 82.25%, respectively, and reduced erosion depth by 4 mm. 4) Moss crusts caused localized deposition on the slopes, with depositional areas accounting for 0.21%, 8.41%, 4.53% and 0.41% for the moss crust-covered slopes under respective coverage, and the thickness of the deposition increased by 2 mm compared to bare slopes. 5) Moss crust significantly influenced the spatial distribution characteristics of erosion-deposition on slopes through surface coverage and sediment interception. [Conclusion] The results can advance our understanding of the spatial distribution of soil erosion on the biocrust-covered slopes on the Loess Plateau, and provide a scientific foundation for further analysis of the mechanisms underlying the soil erosion process on the moss-covered slopes, as well as for formulating and implementing effective soil and water conservation management measures.

Keywords: biocrusts; structure-from-motion; spatial distribution characteristics of erosion-deposition; surface morphology; soil erosion

Received: 2025-01-10

Revised: 2025-03-22

Accepted: 2025-04-26

Online(www.cnki.net): 2025-05-14

土壤侵蚀是影响人类社会生存和制约社会可持续发展的全球性环境问题之一。因此,深入研究土壤侵蚀过程和机理对土壤侵蚀防控具有重要意义。坡面是土壤侵蚀的基本地貌单元^[1],研究坡面土壤侵蚀-沉积空间分布规律,确定坡面土壤侵蚀和沉积的重点区域,有利于解析坡面土壤侵蚀规律和土壤侵蚀机理,可为建立土壤侵蚀预报模型和制定有效的水土保持管理措施提供科学依据。

黄土高原自退耕还林草工程实施以来,植被盖度显著增加,土壤侵蚀问题得到有效缓解。同时,由藻类、地衣类、藓类等光合自养生物和土壤中微生物及土壤颗粒胶结形成的生物结皮也广泛发育,平均盖度可达47.3%,对土壤侵蚀防控及泥沙源-汇格局具有不可忽视的作用^[2-3]。研究^[4-6]表明,生物结皮能够显著降低坡面土壤侵蚀。特别是藓结皮,作为生物结皮演替的高级阶段,其对土壤侵蚀的降低程度显著高于发育早期的藻结皮^[7-9]。藓结皮不仅可通过自身覆盖作用保护土壤,提高土壤稳定性,也可通过降低土壤可蚀性,从而有效减少土壤侵蚀^[10]。然而,尽管在藓结皮能够有效减小土壤侵蚀方面得到基本共识,但是大多数研究主要关注坡面土壤流失量,对藓结皮坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征及土壤侵蚀和沉积的重点区域的相关研究仍有不足,制约了对藓结皮坡面土壤侵蚀机理的全面理解,进而影响对藓结皮在水土保持中作用的深入认识 and 实际应用。

与传统侵蚀监测方法相比,近景摄影测量法是一种非接触式、高精度、适用性强的方法。且随着计算机视觉技术的发展,基于运动恢复结构(structure-from-motion, SfM)的近景摄影测量技术逐渐兴起,相关成果^[11-12]也成功应用到土壤侵蚀领域,SfM近景

摄影测量技术结合计算机视觉领域的运动恢复结构算法和遥感领域的摄影测量法,具有速度快、精度高、对影像姿态要求低、匹配效果好^[13]、可操作性强的特点,该技术通过一台单目相机在短时间内对目标区域拍摄具有高冗余度的连续照片提取出目标的高精度DEM,能够获取被测区域的三维信息,可直观展示出坡面土壤侵蚀和沉积的重点区域及侵蚀或沉积范围,为藓结皮坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征的研究提供有力工具。

本研究以黄土高原不同盖度藓结皮为研究对象,通过室内模拟降雨试验,借助SfM近景摄影测量技术,研究藓结皮盖度对坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征的影响,以期深化生物结皮抗侵蚀机理及黄土高原水土保持管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

为明确不同盖度藓结皮对坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征的影响,设置(20%±5%)、(40%±5%)、(60%±5%)、(80%±5%)4种藓结皮盖度梯度,以裸土为对照,每个盖度设置3次重复,共计试验15场。

1.2 样品采集

研究所用藓结皮采自陕西省定边县杨井镇退耕20 a以上坡地,坡度15°,选择坡地上生长发育稳定且连续分布的藓结皮进行采集。因藓结皮斑块较大,采集时脆弱易碎且不易携带,故使用10 cm×10 cm的方形培养皿采集,采样深度1 cm,单个培养皿内藓盖度≥90%,同时采集0~20 cm农地耕层土,采回后置于阴凉通风处保存备用。

1.3 模拟降雨试验

模拟降雨试验在水土保持与荒漠化整治全国

重点实验室人工模拟降雨大厅进行,降雨高度 16 m,满足所有降雨雨滴达到终点速度。降雨强度为 40~260 mm/h,降雨均匀度>80%,最大持续降雨时间 12 h^[14]。

使用规格为 100 cm(长)×60 cm(宽)×25 cm(高)的不锈钢土槽填装过 1 cm 筛的农地耕层土壤,土壤填装高度为 20 cm,填装过程中以 5 cm 分层,共分为 4 层,最下部 5 cm 均匀铺上 1 层细砂,而后覆盖无纺布,保证降雨过程中水分充分下渗,自此向上的 15 cm 每 5 cm 一层按照体积质量 1.4 g/cm³填入,每层土壤填装完成后并使用工具将土壤表面打毛用以消除相邻两层土壤间的垂直层理,共计填装土槽 15 个。土槽填装完成后,将供试藓结皮按照不同盖度处理随机移植在土槽表面。移植前使用橡皮锤轻轻敲打完整的藓结皮样品,使其自然碎裂成不规则斑块,以保证藓结皮分布的随机性,移植过程中使用 25 点样方法调查并调整藓结皮盖度,供试藓结皮最终盖度分别为 19.06%±1.54%、43.31%±1.97%、61.48%±1.24% 和 79.56%±3.46%。随后将土槽放置在阴凉通风处进行浇水养护 3~4 周,使藓结皮与下伏土壤充分结合。当土壤体积含水率达到 5% 以下时进行模拟降雨试验。供试土壤颗粒组成为黏粒(<2 μm)9.72%、粉粒(2~50 μm)48.18%、砂粒(50~2 000 μm)42.10%。

模拟降雨试验于 2024 年 10 月 6 日进行,降雨雨强为 90 mm/h,为黄土高原常见暴雨雨强,降雨历时 45 min,坡度设置为 15°。每个土槽自产流后每隔 3 min 收集出水口的径流和泥沙样,沉淀后将泥沙样收集并放入烘箱中 105 ℃烘干至恒重后测定泥沙质量,并使用公式(1)计算土壤侵蚀速率:

$$D = \frac{W}{At} \quad (1)$$

式中: D 为土壤侵蚀速率,g/(min·m²); W 为泥沙量,g; A 为试验土槽面积,m²; t 为时间,min。

1.4 SfM 近景摄影测量

SfM 近景摄影测量采用 Nikon Z30 微单数码相机,配备有尼克尔 Z DX 24 mm f/1.7 定焦镜头。拍摄时将 ISO 感光度设置为 100,光圈调整为最大光圈,并调节快门速度以获得曝光适宜、视野清晰且噪点较少的照片,拍摄过程中保证所有照片均围绕土槽四周获得,且相邻 2 张照片的重叠度不小于 60%^[15];每个土槽拍摄照片为 70 张左右。照片获取选择在阴天或者晴朗的午后,目的是免除光照的干扰,单次采集时间不超过 30 min。分别在降雨前、后对试验土槽进行影像采集。为建立坐标系,将土槽的左下角设置为坐标原点,记为(0,0,0)^[16],土槽四周每隔 10 cm

设置 1 个标记点,并使用盒尺测量相对坐标^[17]。

试验结束后,将每个处理对应的照片导入 Agisoft PhotoScan Professional 软件中进行土槽表面重建。在软件中执行标准的 SfM 流程,在相机校准、特征点匹配、点云重建、3 D 模型重建、坐标校正后生成土槽的 DEM 并导出^[16]。将同一土槽降雨前、后两期的 DEM 数据导入 ArcGIS 10.7 软件中,以降雨前的 DEM 为基准进行栅格相减,得到的小于 0 的区域为侵蚀区,大于 0 的区域为沉积区,等于 0 的区域为未变化区。使用重分类工具对土槽侵蚀区域和沉积区域进行分级,每 2 mm 分为 1 级,并统计各级侵蚀深度(沉积厚度)对应区域面积所占坡面面积比例。

1.5 数据处理

使用 Excel 2021 和 SPSS 26 软件对数据进行统计分析。采用单因素和 LSD 法对裸土坡面和藓结皮坡面的土壤侵蚀速率、土壤侵蚀区域面积占比、土壤侵蚀深度(沉积厚度)进行方差分析和 LSD 多重比较($\alpha=0.05$),方差分析前对数据进行正态检验和方差齐性检验。对藓结皮盖度和坡面未变化区域面积占比进行 Pearson 双尾相关性分析($\alpha=0.05$)。使用 ArcGIS 10.7 软件和 Origin 2017 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同盖度藓结皮坡面土壤侵蚀速率

藓结皮覆盖显著降低坡面土壤侵蚀速率,且土壤侵蚀速率随藓结皮盖度的增加呈减小趋势(图 1),与裸土相比,藓结皮坡面土壤侵蚀速率平均降低 45.66%,且降低程度随藓结皮盖度的增加而增强,20%~80% 盖度藓结皮坡面的土壤侵蚀速率较裸土坡面分别降低 23.34%、37.01%、51.01% 和 71.26%。

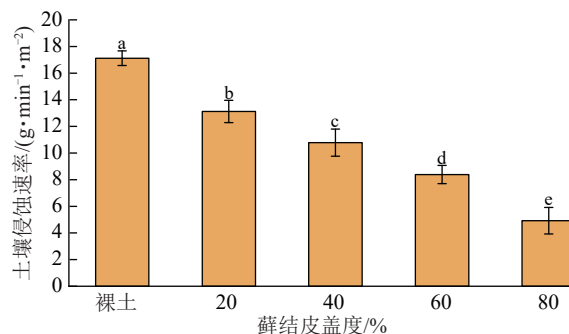


图 1 不同盖度藓结皮坡面土壤侵蚀速率

Fig. 1 Soil erosion rate on slopes with different coverage of moss crusts

2.2 不同盖度藓结皮坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征

不同盖度藓结皮坡面土壤侵蚀-沉积分布状况较裸土表现出显著差异(图 2)。其中,裸土全坡面表现为侵蚀区域,且 90% 以上的区域侵蚀深度均>2 mm,侵

蚀最严重的部位发生在坡顶,其次为坡中部,坡底侵蚀程度相对较轻。对于20%盖度的藓结皮坡面,侵蚀区集中在坡顶和坡中部,其中,坡中部是侵蚀最严重的区域,侵蚀深度达到4 mm以上,在坡底的藓结皮覆盖区域有少量沉积区,但沉积厚度较浅,沉积面积相对较小。盖度为40%和60%的藓结皮坡面整体的侵蚀情况较20%盖度有所减弱,坡面发生侵蚀的区域面积显

著减小,主要侵蚀区域发生在坡顶和坡中部的裸土区域,其中,坡中部仍是侵蚀最严重的区域,侵蚀深度均>4 mm,在坡底的藓结皮覆盖区域有部分沉积现象。在80%盖度的藓结皮坡面上,全坡面基本未发生侵蚀,发生侵蚀的区域较小,主要集中在坡顶和坡中部的裸土区域,在坡底的藓结皮覆盖区域,有少量沉积现象,但沉积厚度较浅,沉积面积相对较小。

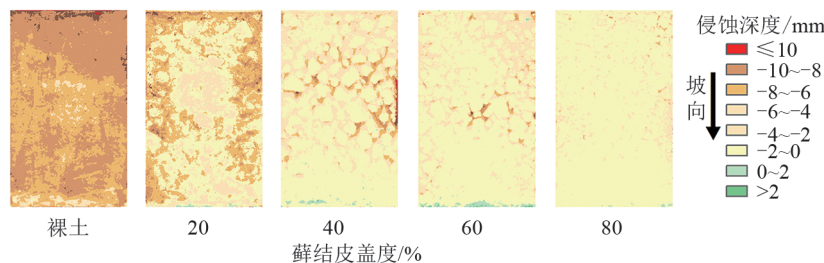
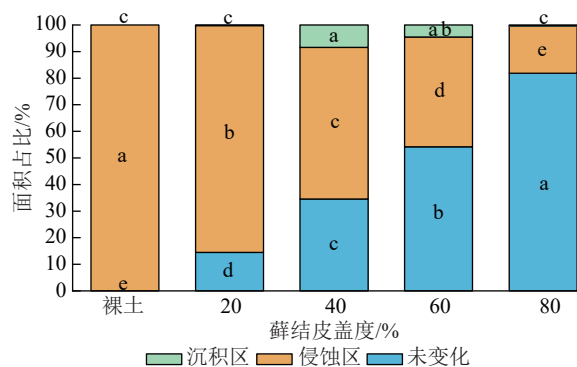


图2 不同盖度藓结皮坡面土壤侵蚀-沉积空间分布特征

Fig. 2 Spatial distribution characteristics of soil erosion and deposition on slopes with different coverage of moss crusts

2.3 不同盖度藓结皮坡面土壤侵蚀区、沉积区与未变化区面积占比

随着藓结皮盖度的增加,坡面侵蚀区的面积占比呈下降趋势(图3)。裸土坡面的侵蚀区面积占比为100%。与裸土相比,当藓结皮盖度从20%增加到80%时,侵蚀区面积占比分别降低14.69%、42.97%、58.69%和82.25%。同时,坡面未变化区域的面积占比随藓结皮盖度的增加呈增加趋势,分别为14.48%、34.56%、54.16%和81.84%,藓结皮盖度从20%增加到80%时,坡面未变化区域对应的面积占比增加4.65倍。说明藓结皮的覆盖作用可保护坡面的土壤免受侵蚀,维持坡面土壤稳定,从而增加未变化区域面积,有效减少坡面的受侵蚀面积。坡面沉积区的面积占比随着藓结皮盖度的增加呈先增加后降低趋势,裸土坡面无沉积。20%和80%盖度的藓结皮坡面沉积区面积占比均不足1%,而盖度40%和60%的藓结皮坡面沉积区面积占比分别为8.41%和4.53%。



注:不同小写字母表示不同盖度处理间同一分区面积占比差异显著($p < 0.05$)。

图3 不同盖度藓结皮坡面各区域面积占比

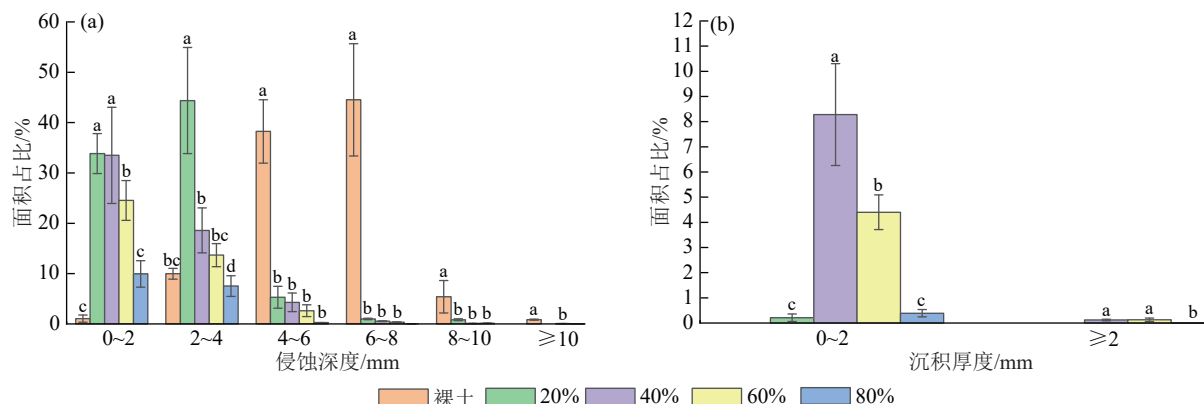
Fig. 3 Area proportion of different zones on slopes with different coverage of moss crusts

2.4 不同盖度藓结皮坡面各级侵蚀深度与沉积厚度面积占比

不同盖度藓结皮坡面各级侵蚀深度及其面积占比具有显著差异(图4a)。裸土坡面的侵蚀深度主要集中在4~8 mm,对应的面积占比为82.74%。其中,4~6、6~8 mm侵蚀深度对应的面积占比分别为38.24%和44.51%,而侵蚀深度超过10 mm的区域面积占坡面总面积的0.85%。藓结皮坡面的侵蚀深度主要集中在0~4 mm,随着藓结皮盖度的增加,0~4 mm侵蚀深度对应的面积占比逐渐减小。20%、40%、60%和80%盖度坡面对应的面积占比分别为78.21%、52.05%、38.19%和17.46%。其中,20%盖度藓结皮坡面在0~2、2~4 mm侵蚀深度对应的面积占比分别为33.84%和44.37%。40%盖度藓结皮坡面在0~2、2~4 mm侵蚀深度对应的区域面积占比分别为33.48%和18.57%,侵蚀深度超过10 mm的区域占坡面总面积的0.06%。60%盖度藓结皮坡面在0~2、2~4 mm侵蚀深度对应的区域面积占比分别为24.52%和13.67%,坡面侵蚀深度超过10 mm的区域占坡面总面积的0.02%。80%盖度藓结皮坡面在0~2、2~4 mm侵蚀深度对应的区域面积占比分别为9.93%和7.53%。坡面最大侵蚀深度随着藓结皮覆盖的增加呈下降趋势,当藓结皮盖度从20%增加到80%时,8~10 mm的侵蚀深度区域面积占比降低100%,6~8 mm的侵蚀深度区域面积占比降低98.97%。同时,坡面最小侵蚀深度随着藓结皮盖度的增加也呈下降趋势,当藓结皮盖度从20%增加到80%时,0~2 mm的侵蚀深度区域面积占比减小70.66%。表明藓结皮的覆盖显著减小坡面的侵蚀深度及其面积占比。

不同盖度藓结皮坡面各级沉积厚度及其面积占比也具有显著差异(图4b)。裸土坡面未发生沉积现象,而藓结皮坡面均有沉积发生。20%盖度藓结皮坡面的沉积厚度为0~2 mm,对应的区域面积占比为0.21%。对于40%、60%和80%盖度的藓结皮坡面,沉积厚度主要集中在0~4 mm。其中,3种坡面在0~2 mm的沉积厚度对应的区域面积占比分别为

8.29%、4.40%和0.40%,在2~4 mm的沉积厚度对应的区域面积占比分别为0.12%、0.13%和0.01%。80%盖度坡面在沉积厚度为2~4 mm时对应的区域面积占比显著低于40%和60%盖度。表明随着藓结皮盖度的增加,坡面的沉积厚度并非线性增加,高盖度藓结皮坡面沉积较少主要是坡面较稳定并未发生侵蚀的原因。



注:不同小写字母表示不同盖度处理间同一分级面积占比差异显著($p < 0.05$)。

图4 不同盖度藓结皮坡面各级侵蚀深度和沉积厚度对应区域面积占比

Fig. 4 Proportion of erosion depth and deposition thickness at all levels on slopes with different coverage of moss crusts

3 讨论

生物结皮作为干旱、半干旱地区重要的地表覆被物^[18],其抗侵蚀功能已经得到国内外学者^[19-20]的广泛接受和认可。本研究表明,藓结皮覆盖较裸土显著降低土壤侵蚀速率,且降低程度与藓结皮盖度呈负相关,与已有研究^[21]结果一致。本研究使用SfM近景摄影测量法厘清藓结皮坡面侵蚀和沉积的重点区域及坡面的侵蚀深度和沉积厚度,揭示藓结皮坡面土壤侵蚀-沉积的空间分布规律。

本研究发现,坡面受侵蚀区域的面积随着藓结皮盖度的增加显著减小,侵蚀主要集中在裸土覆盖区域。是因为当土壤被藓结皮覆盖时,降雨和坡面径流对土壤的分离作用减弱。藓结皮的存在削弱雨滴动能^[7],进而降低其对土壤颗粒的分离作用。同时,在藓结皮覆盖位置临近的裸土区域,雨滴对土壤的分离能力也受到影响而减弱^[22]。坡面径流的水流功率随着生物结皮盖度的增加显著减小^[21],导致坡面径流对土壤的分离能力降低。进一步分析表明,不同盖度藓结皮坡面未受侵蚀的区域面积占比和藓结皮盖度具有较高相关性($R^2=0.978$, $p < 0.05$),说明藓结皮有效抵抗降雨和坡面径流对坡面土壤的分离。表明藓结皮可通过自身的覆盖作用改变降雨和泥沙对坡面土壤的分离过程进而影响坡面土壤的侵蚀规律,改变坡面土壤侵蚀空间分布特征。

藓结皮坡面的沉积区面积显著高于裸土坡面,与

前人^[23]的研究结果一致。主要归因于藓结皮表面分布有致密的藓类植物,其优势藓种呈密集的丛状、垫状或毯状结构^[24],对地表微地形产生显著影响,从而改变坡面径流路径并减缓坡面流速^[25]。藓结皮的覆盖增加坡面径流阻力,降低坡面径流的挟沙能力^[9,26]。径流作为坡面水蚀过程的载体^[27],其流量减少也导致坡面薄层水流搬运泥沙量的上限降低,藓结皮的覆盖可以减少坡面径流量^[28],降低坡面薄层水流搬运泥沙量的上限。研究^[29]表明,生物结皮可以捕获细颗粒物,藓结皮在表面吸水后叶片扩张膨胀,从而更有效地捕捉坡面携沙水流中的泥沙颗粒^[30],促进泥沙在藓结皮表面的沉积。因此,藓结皮能够通过自身拦截作用改变坡面泥沙输移过程,进而影响坡面土壤沉积规律,改变坡面土壤沉积空间分布特征。

不同盖度藓结皮坡面的最大侵蚀深度随着藓结皮盖度的增加表现为先降低后增加再降低趋势。具体而言,40%和60%盖度藓结皮坡面有极少部分区域的最大侵蚀深度超过10 mm,而20%和80%盖度的藓结皮坡面侵蚀深度未超过10 mm。可能是因为藓结皮虽然能够通过降低坡面流速和径流量来减弱径流对坡面土壤的分离和搬运能力,但是藓结皮表面的壅水增加坡面流的局部水深^[31],提高局部径流能量^[32],从而增强局部径流对土壤的分离能力,导致对藓结皮斑块下坡向裸土的侵蚀可能性增加。不同盖度藓结皮坡面沉积面积的变化趋势呈先增加后降低

趋势,20%和80%盖度的藓结皮坡面沉积面积均不足1%,但原因有所不同。20%盖度藓结皮坡面沉积面积较小是由于藓结皮盖度较低,对坡面侵蚀的抵抗能力和对泥沙的捕捉能力有限;而80%盖度藓结皮则是因为其有效阻止降雨和坡面径流对土壤的分离,坡面并未产生过多泥沙。相比之下,40%和60%盖度藓结皮坡面对降雨和坡面径流分离土壤的阻抗能力低于80%盖度,故产生更多的泥沙,但其对坡面径流搬运泥沙能力的影响高于20%盖度。同时,40%和60%盖度藓结皮坡面中部出现的侵蚀深度10 mm以上的区域可提高局部水流汇聚,当含沙水流经过该区域时,动能与势能相互转化做功削减径流能量,从而减小水流对泥沙的搬运能力,促进沉积形成。

总之,藓结皮的存在能够削弱雨滴动能,显著影响坡面水动力学特征,使坡面土壤侵蚀的分离和搬运受到限制^[33]。此作用改变坡面土壤侵蚀和沉积规律,影响坡面土壤侵蚀—沉积空间分布特征。本研究所使用的藓结皮为生物结皮演替的高级阶段,其抗侵蚀能力优于发育初期的藻结皮。同时,雨强、坡度、坡长等降雨和地形因子亦对坡面土壤侵蚀沉积分布产生影响。因此,未来还需要进一步探讨不同发育阶段的生物结皮及降雨和地形对土壤侵蚀空间分布规律的影响。以上研究结果为理解藓结皮坡面土壤侵蚀机理及制定黄土高原水土保持管理措施提供科学依据和数据支撑。

4 结论

藓结皮通过覆盖作用和拦截作用改变坡面土壤侵蚀与沉积的空间分布特征。藓结皮坡面的土壤侵蚀主要发生在坡中上部,沉积主要发生在坡底部,坡面侵蚀重点区域为坡中上部裸土覆盖区域,坡面沉积重点区域为坡底部藓结皮覆盖区域。与裸土相比,不同盖度的藓结皮坡面侵蚀区面积显著减少14.69%~82.25%,土壤侵蚀深度降低0~4 mm,坡面未变化区面积和沉积区面积分别增加14.48%~81.84%和0.21%~8.41%,坡面沉积厚度提高0~2 mm。

本研究结果有助于了解黄土高原生物结皮坡面的土壤侵蚀—沉积空间分布规律,可为进一步解析生物结皮坡面的土壤侵蚀机理及制定和实施有效的水土保持管理措施提供科学依据。

参考文献:

- [1] 杨明义,田均良.坡面侵蚀过程定量研究进展[J].地球科学进展,2000,15(6):649-653.
YANG M Y, TIAN J L. Research progress in erosion process on hillslope quantitatively[J]. Advance in Earth Sciences, 2000, 15(6): 649-653.

- [2] 赵允格,吉静怡,张万涛,等.黄土高原生物土壤结皮分布时空分异特征[J].应用生态学报,2024,35(3):739-748.
ZHAO Y G, JI J Y, ZHANG W T, et al. Characteristics of spatial and temporal variability in the distribution of biological soil crusts on the Loess Plateau, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 739-748.
- [3] WEBER B, BELNAP J, BUDEL B, et al. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening research community[J]. Biological Reviews, 2022, 97(5): 1768-1785.
- [4] 张思琪,张科利,马芊红.喀斯特坡面生物结皮发育对土壤抗蚀性能的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):64-70.
ZHANG S Q, ZHANG K L, MA Q H. Effects of biological soil crusts development on soil anti-erodibility on karst slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(5): 64-70.
- [5] 平原,澹腾辉,李雨晨,等.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[J].水土保持学报,2023,37(3):87-94.
PING Y, TAN T H, LI Y C, et al. Soil properties change and soil detachment response driven by biocrusts in typical small watershed of Danjiangkou reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(3): 87-94.
- [6] 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 J, WANG B, MA J L, et al. Effects of biological soil crusts development on soil erosion resistance on loessial soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 73-81.
- [7] 秦宁强,赵允格.生物土壤结皮对雨滴动能的响应及削减作用[J].应用生态学报,2011,22(9):2259-2264.
QIN N Q, ZHAO Y G. Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(9): 2259-2264.
- [8] ZHAO Y G, QIN N Q, WEBER B, et al. Response of biological soil crusts to raindrop erosivity and underlying influences in the hilly Loess Plateau region, China[J]. Biodiversity and Conservation, 2014, 23(7): 1669-1686.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 宋月君,黄炎和,杨洁,等.近景摄影测量在土壤侵蚀监

- 测中的应用[J].测绘科学,2016,41(6):80-83.
- SONG Y J, HUANG Y H, YANG J, et al. Application of close-range photogrammetry technology in soil erosion monitoring[J].Science of Surveying and Mapping, 2016, 41(6):80-83.
- [12] 史扬予,黄婷婷,罗建勇,等.SfM摄影测量法测定切沟的精度评价[J].水土保持研究,2020,27(1):39-46.
- SHI Y Z, HUANG T T, LUO J Y, et al. Evaluation on the accuracy of structure from motion(SfM) photogrammetry on gully surveying[J].Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(1):39-46.
- [13] 杨文环.结合空三与SfM的近景摄影测量点云获取研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2016.
- YANG W H. Research on point cloud acquisition of close-range photogrammetry by combining space three and SfM [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2016.
- [14] 郑粉莉,赵军.人工模拟降雨大厅及模拟降雨设备简介[J].水土保持研究,2004,11(4):177-178.
- ZHENG F L, ZHAO J. Brief introduction of artificial simulated rainfall hall and simulated rainfall equipment [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2004, 11(4): 177-178.
- [15] LINDER W. Digital photogrammetry: Theory and applications[M].Berlin:Springer, 2003.
- [16] YANG Y, SHI Y Z, LIANG X Z, et al. Evaluation of structure from motion (SfM) photogrammetry on the measurement of rill and interrill erosion in a typical loess [J]. Geomorphology, 2021, 385: e107734.
- [17] BALAGUER-PUIG M, MARQUES-MATEU Á, LERMA J L, et al. Estimation of small-scale soil erosion in laboratory experiments with structure from motion photogrammetry[J].Geomorphology, 2017, 295: 285-296.
- [18] 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.
- ZHAO Y G, XU M X, WANG Q J, et al. Physical and chemical properties of soil bio-crust on rehabilitated grassland in hilly Loess Plateau of China[J].Chinese Journal of Applied Ecology, 2006, 17(8):1429-1434.
- [19] 张培培,赵允格,王媛,等.黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J].应用生态学报,2014,25(3):657-663.
- ZHANG P P, ZHAO Y G, WANG Y, et al. Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the hilly Loess Plateau region, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2014, 25(3): 657-663.
- [20] BELNAP J, WILCOX B P, SCOYOC V M W, et al. Successional stage of biological soil crusts: An accurate indicator of ecohydrological condition [J]. Ecohydrology, 2013, 6(3):474-482.
- [21] 陈诗婷,查轩,黄少燕,等.暴雨条件下典型红壤区生物结皮坡面水土流失过程研究[J].水土保持学报,2022, 36(6):95-100.
- CHEN S T, ZHA X, HUANG S Y, et al. Soil erosion process on slope with biological soil crusts under rain-storm in typical red soil region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6):95-100.
- [22] GUO Q, WANG Z L, SHEN N. Plot-based study to evaluate raindrop detachment capacity on moss-dominated biocrusted slope under simulated rainfall with different intensities[J].Catena, 2023, 226: e107084.
- [23] 杨凯.黄土丘陵区生物结皮盖度影响坡面产流产沙的动力机制[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2022.
- YANG K. Dynamic mechanism of biological crust coverage affecting runoff and sediment yield on slope in Loess Hilly region [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [24] 张颖,肖波,王彦峰,等.黄土高原生物结皮覆盖对土壤线虫垂直分布格局的影响[J].生态学报,2024,44(19): 8447-8458.
- ZHANG Y, XIAO B, WANG Y F, et al. Effects of biocrust cover on the vertical distribution pattern of soil nematodes on the Loess Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(19):8447-8458.
- [25] 吉静怡,赵允格,杨凯,等.黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联[J].生态学报,2021, 41(4):1381-1390.
- JI J Y, ZHAO Y G, YANG K, et al. Correlation between runoff and sediment yield from biological soil crustal slope and its distribution patterns in the hilly Loess Plateau region [J].Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(4): 1381-1390.
- [26] BOWKER M A, SOLIVERES S, MAESTRE F T. Competition increases with abiotic stress and regulates the diversity of biological soil crusts [J]. Journal of Ecology, 2010, 98(3):551-560.
- [27] 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.
- SHI Z H, SONG C Q. Water erosion processes: A historical review [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(5):1-10.
- [28] 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.
- [29] YANG K, ZHAO Y G, GAO L Q. Biocrust succession improves soil aggregate stability of subsurface after "Grain for Green" Project in the hilly Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2022, 217: e105290.

(下转第 341 页)

- variation of habitat quality along the main stream of the Yellow River based on InVEST model[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2022, 47(8): 114-122.
- [20] 吴楠, 陈红枫, 冯朝阳, 等. 基于土地覆被变化的安徽省生境质量时空演变特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(5): 1119-1127.
- WU N, CHEN H F, FENG C Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of habitat quality based on land cover change in Anhui Province[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(5): 1119-1127.
- [21] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG J F, XU C D. Geodetector: Principle and perspective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [22] 郭晖. 基于水沙置换的水土保持生态补偿研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- GUO H. Ecological compensation for soil and water conservation based on sediment and water replacement[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [23] 郭彩霞, 韩致文, 李爱敏, 等. 库布齐沙漠生态治理与开发利用的典型模式[J]. *西北师范大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 112-118.
- GUO C Y, HAN Z W, LI A M, et al. The typical models of ecological management and development and utilization in the Hobq Desert[J]. *Journal of Northwest Normal University(Natural Science)*, 2017, 53(1): 112-118.
- [24] 包美丽, 韩静, 刘菲, 等. 内蒙古自治区退耕还林还草工程建设成效浅析[J]. *内蒙古林业调查设计*, 2023, 46(6): 13-15.
- BAO M L, HAN J, LIU F, et al. Effects of the project of returning farmland to forest and grassland in Inner Mongolia Autonomous Region[J]. *Inner Mongolia Forestry Investigation and Design*, 2023, 46(6): 13-15.
- [25] 雷金睿, 陈毅青, 陈宗铸, 等. 基于InVEST模型的海南岛三大流域生境质量时空演变[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(9): 2511-2520.
- LEI J R, CHEN Y Q, CHEN Z Z, et al. Spatiotemporal evolution of habitat quality in three basins of Hainan Island based on InVEST model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022, 33(9): 2511-2520.
- [26] SONG S, LIU Z, HE C Y, et al. Evaluating the effects of urban expansion on natural habitat quality by coupling localized shared socioeconomic pathways and the land use scenario dynamics-urban model[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: e106071.
- [27] TERRADO M, SABATER S, CHAPLIN K B, et al. Model development for the assessment of terrestrial and aquatic habitat quality in conservation planning[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 540(1): 63-70.
- [28] 祁迷, 王飞, 滑永春, 等. 基于PLUS与InVEST模型的内蒙古自治区土地利用变化及碳储量评估[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 194-200.
- QI M, WANG F, HUA Y C, et al. Assessment of land use change and carbon storage in Inner Mongolia Autonomous Region based on PLUS and InVEST models[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 194-200.
- [29] 李亚娇, 沈昕昕, 李家科, 等. 丹汉江流域生境质量对景观格局变化响应[J]. *环境科学与技术*, 2022, 45(5): 206-216.
- LI Y J, SHEN B X, LI J K, et al. Evolution and correlation analysis of habitat quality and landscape pattern in Dan-Hanjiang River basin[J]. *Environmental Science and Technology*, 2022, 45(5): 206-216.
- [30] 刘如龙, 赵媛媛, 陈国清, 等. 内蒙古黄河流域1990—2020年生境质量评估[J]. *干旱区研究*, 2024, 41(4): 674-683.
- LIU R L, ZHAO Y Y, CHEN G Q, et al. Assessment of habitat quality in the Yellow River basin in Inner Mongolia from 1990 to 2020[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 41(4): 674-683.
- (上接第330页)
- [30] ELDRIDGE D J. Biological soil crusts and water relations in Australian Deserts[M]//*Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2001: 315-325.
- [31] 张慧妮, 王兵, 张宝琦, 等. 黄土丘陵区生物结皮对坡面流水动力特征的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2): 16-21.
- ZHANG H N, WANG B, ZHANG B Q, et al. Effects of biocrusts on hydrodynamic characteristics of slope flow in hilly regions of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(2): 16-21.
- [32] 彭诚, 王春振, 张帅普, 等. 基于判断矩阵和层次分析法的河网连通性评价[J]. *中国农村水利水电*, 2024(9): 38-44.
- PENG C, WANG C Z, ZHANG S P, et al. Evaluation of river network connectivity based on judgment matrix and analytic hierarchy process[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2024(9): 38-44.
- [33] PELLETIER J D. Fluvial and slope-wash erosion of soil-mantled landscapes: Detachment- or transport-limited? [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2012, 37(1): 37-51.