

黄土高原表层土壤孔隙性状与穿透阻力对藓结皮发育的响应

余星兴^{1,2,5}, 肖波^{2,3,4}, 曹尤淞^{1,2,5}, 李胜龙³, 孙福海³

(1.中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心,陕西 杨凌 712100;

2.中国科学院水利部水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西 杨凌 712100;

3.中国农业大学土地科学与技术学院,农业农村部华北耕地保育重点实验室,北京 100193;4.宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地,西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室,银川 750021;5.中国科学院大学,北京 100049)

摘要:为探明生物结皮如何改善土壤物理性质从而促进水土保持,针对黄土高原风沙土和黄绵土上发育的藓结皮,以无结皮为对照,原状取样后分别使用高分辨率 CT 扫描仪和高精度土壤贯入仪测定其孔隙性状与穿透阻力,并构建结构方程模型剖析生物结皮对土壤孔隙度和穿透阻力的作用途径。结果表明:藓结皮发育改变土壤孔隙特征参数,并显著提高表层 0—2 cm 土壤总孔隙度($p=0.01$),在此土层内,风沙土和黄绵土上藓结皮的总孔隙度比无结皮分别增加 1.62、2.12 倍,且藓结皮的孔隙度随土层深度增加呈指数降低。藓结皮和无结皮的土壤面孔率在 0—1 cm 土层内均急剧下降,但藓结皮整体面孔率显著高于无结皮($p<0.001$)。随土层深度增加,藓结皮的土壤穿透阻力总体呈增大趋势,但在结皮层中部发生突变,越过结皮层后趋于平稳。在 2 种土壤上,藓结皮的面孔率与穿透阻力均呈对数负相关关系,无结皮中则分别呈线性正相关和对数负相关关系。黄土高原藓结皮通过改变孔隙度和机械组成等间接途径,极显著地提升表层土壤穿透阻力,增强土壤表面稳定性,为区域水土保持和生态恢复提供有利条件。

关键词: 风沙土;黄绵土;生物结皮;土壤孔隙度;土壤穿透阻力;黄土高原

中图分类号:S151.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)03-0052-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2023.03.007

Effects of Moss Crusts on Topsoil Pore Characteristics and Penetration Resistance in Loess Plateau, China

YU Xingxing^{1,2,5}, XIAO Bo^{2,3,4}, CAO Yousong^{1,2,5}, LI Shenglong³, SUN Fuhai³

(1.The Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling, Shaanxi 712100; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 3.College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Key Laboratory of Arable Land Conservation in North China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193; 4.Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwestern China, Key Laboratory of Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystems in Northwestern China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021; 5.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract: As one of the important surface coverings in arid and semi-arid regions, biocrusts can promote the restoration and stability of ecosystems by stabilizing soil surface to resist soil erosion and degradation. However, the specific mechanism of this process needs to be further studied. In order to investigate how biocrusts improve soil physical properties and thus water and soil conservation, we measured the soil pore characteristics and penetration resistance of biocrusts and bare soil using high-resolution X-Ray computed tomography (CT) scanner and high-precision soil penetrator in the Loess Plateau. In addition, structural equation model (SEM) was established to analyze the effect pathway of biocrusts on soil porosity and penetration resistance. The results showed that moss-dominated biocrusts changed soil pore characteristic

收稿日期:2022-10-11

资助项目:国家自然科学基金面上项目(42077010);中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(2019);西北土地退化与生态恢复重点实验室(宁夏大学)开放基金项目(LDER2022Z02)

第一作者:余星兴(1996—),女,在读博士研究生,主要从事生物结皮的环境生态效应研究。E-mail:yuxxsc@126.com

通信作者:肖波(1981—),男,博士,教授,主要从事土壤物理与水土保持研究。E-mail:xiaobo@cau.edu.cn

parameter, and significantly increased the total soil porosity of 0–2 cm layer ($p=0.01$). Compared with bare soil, the total soil porosity of moss-dominated biocrusts on aeolian sand and loess soil increased by 1.62 and 2.12 times, respectively. Moreover, the porosity of moss-dominated biocrusts decreased exponentially with the increase of soil depth. The plane porosity of moss-dominated biocrusts was significantly higher than that of bare soil ($p<0.001$), both of them decreased sharply within 0–1 cm. The penetration resistance of moss crusts improved with the increase of soil depth, but obvious mutation of penetration resistance was found in the middle of crust horizon, while it basically stabilized in the subcrusts layer. On both aeolian sand and loess soil, the plane porosity and penetration resistance of moss crusts were log negatively correlated, and they were linearly positively and log negatively correlated in bare soil, respectively. The effect of biocrusts on soil penetration resistance was mainly realized through indirect ways such as particle composition and porosity. In Loess Plateau, moss crusts significantly increase the penetration resistance of topsoil through indirect means such as changing porosity and particle composition, which was conducive to improving soil surface stability and providing strong conditions for regional soil and water conservation and ecological restoration.

Keywords: aeolian sand; loess soil; biocrusts; soil porosity; soil penetration resistance; the Loess Plateau

生物结皮是由生活在土壤表层之上或几毫米之内的自养生物(如蓝绿藻、地衣、苔藓)和异养生物(如细菌、真菌)通过菌丝、假根及其分泌物等与土壤颗粒胶结形成的活性层状结构,是干旱和半干旱地区广泛分布的地表覆盖物,其发育过程影响土壤的物理化学特性,因而,在稳定土壤表面、防风固沙和防止土壤侵蚀等方面发挥着重要的生态作用^[1-2]。

生物结皮发育后,通过改善土壤容重、孔隙状况等物理结构,影响水分入渗、植物生长等过程,促进土壤稳定性。研究^[3]表明,生物结皮提高土壤孔隙度,对土壤孔隙的影响因结皮类型和盖度而异,通常藓结皮表层的土壤孔隙度高于地衣结皮和藻结皮,结皮发育后期,盖度增加,土壤孔隙度有降低的趋势。但这一结论长期停留在表象,受限于生物结皮的脆弱性难以深入探究其如何改变土壤物理结构。随着研究技术手段的进步,目前,可借助X射线计算机断层扫描(CT)技术实现描述和量化生物结皮对土壤微观孔隙结构的影响机制。CT扫描是基于射线与物质的相互作用,将模拟信号转变为数字信号计算出每一个像素的衰减系数,再进行图像重建显示物质结构,具有无损性、精确性、全面性和快速性等优点,现常被应用于土壤孔隙等结构研究中^[4]。如使用CT扫描原状生物结皮发现,孔隙度提高的原因是大孔隙数量的增加^[5],但该研究仅针对沙坡头地区发育的地衣结皮,目前,利用CT扫描技术针对黄土高原地区生物结皮展开的研究尚不多见。研究^[6]表明,生物结皮发育后的土壤孔隙度与其有机质含量、机械组成、穿透阻力等理化性质之间存在显著的统计学关系。由于土壤结构特性,土壤孔隙度的降低通常伴随着穿透阻力的

增加^[7],因此,生物结皮改变孔隙度后可能进一步影响穿透阻力。

穿透阻力是土壤最重要的力学特征指标之一,也称土壤硬度、土壤紧实度或土壤机械阻力,是土壤基质抵抗外物下穿或压实的能力^[8]。在衡量生物结皮稳定土壤和抗侵蚀能力的研究中,常用穿透阻力来表示生物结皮强度,即生物结皮的机械稳定性^[9]。应用高精度穿透阻力仪得到的穿透深度—阻力曲线不仅可以反映生物结皮的结构和成分特征,还可以表征土壤剖面连续的结构变化,如利用表层土壤0–40 mm内39 μm 步长的穿透阻力曲线可以确定沙埋影响下生物结皮的分层结构^[10],从而进一步明确生物结皮的稳定性机制。已有相关学者^[11]通过穿透阻力显示的小尺度边界发现,生物结皮的整体稳定性取决于结皮表层和亚层的结构,但未对结皮稳定性的形成机制进行深入探讨。土壤稳定性是土壤理化性质综合作用的结果,穿透阻力是最直观的表征之一,受土壤质地、容重、土壤结构、有机质含量等性质影响,并在一定程度上反映出土壤孔隙状况与团粒结构稳定性^[12]。

目前,已有部分学者^[13]将土壤孔隙作为穿透阻力的影响因素之一进行研究,但通常只停留在土壤孔隙与穿透阻力具有较强相关性这一初步结果,少有针对二者关系在剖面尺度上进行的深入研究。尤其是在生物结皮领域,结皮发育对土壤孔隙度与穿透阻力在微观尺度上的变化特征及其相互作用的影响机制尚不明确。运用高分辨率CT扫描技术和高精度土壤贯入仪,探讨黄土高原土壤物理结构及土壤稳定性对藓结皮发育的响应,可为进一步研究生物结皮对水土保持的促进机制提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市六道沟流域(38°46′—38°51′N, 110°21′—110°23′E), 地处神木市以西 14 km, 流域面积约为 6.9 km², 海拔高度为 1 094.0~1 273.9 m, 属中温带半干旱气候, 年均气温 8.4 ℃, 多年平均降水量 454 mm。该区地处黄土高原北部, 属于毛乌素沙地与黄土丘陵的过渡地带, 是典型的水蚀风蚀交错带, 生态环境脆弱^[14]。流域内为典型的盖沙黄土丘陵地貌, 东部以黄绵土为主, 占流域总面积的 86.5%; 西部以风沙土为主, 占流域总面积的 13.5%。植被以柠条(*Caragana korschinskii*)、沙柳(*Salix psammophila*)、沙蒿(*Artemisia ordosica*)、长芒草(*Stipa bungeana*)等为主, 以苔藓为主的生物结皮发育状况良好, 其平均覆盖度约为 30%, 在特定生境下可高达 70%~80%^[15]。

1.2 样品采集与理化性质测定

在野外调查的基础上, 于 2021 年 9 月在研究区内的风沙土和黄绵土上分别选择 3 组藓结皮与无结皮典型样地进行采样, 每个处理 3 个重复。采用内径 50 mm、高度 40 mm 的 PVC 硬质管采集原状土柱, 并将 PVC 管的下端打磨出刃口以减少采样时对土壤结构的破坏。采样时, 先喷洒去离子水润湿结皮层, 以尽量保持结皮层完整, 然后将 PVC 管的下端垂直压入土壤, 直至上端与地面齐平。之后挖出原状土柱并封底, 运至英华检测(上海)有限公司进行 CT 扫描。

在各样点附近分别采集 0—20, 20—40 mm 土层土壤以测定其基础理化性质^[16]。土壤机械组成采用 MS 2000 型马尔文激光粒度仪测定(美国制); 土壤容重采用环刀法(直径 61.8 cm, 高度 2 cm)测定; 土壤有机质采用重铬酸钾容量法测定; 土壤质量含水量采用烘干法测定。

1.3 土壤孔隙与穿透阻力测定

CT 扫描所用仪器为美国通用电气公司生产的 Phoenix v|tome|x m 微米 CT 扫描仪, 电压为 300 kV, 分辨率为 27 μm。扫描结束后, 选取代表层面调节数值优化图像质量, 重建数字三维模型, 使用 VOLUME GRAPHICS STUDIO MAX 软件对重建的三维模型数据进行分析处理。为减少取样时 PVC 管壁对原状土柱边缘孔隙结构的影响, 后续分析和计算选取居中直径 40 mm 扫描图像。以上表面为界, 每间隔 2 mm 计算该段土柱三维孔隙度, 计算步长为 0.06 mm 的水平二维面孔率(即某一截面上总孔隙的面积占比情况, 可以表征更小尺度上的孔隙度变化)。

完成 CT 扫描后, 将原状土柱取回自行进行穿透阻力测试。穿透阻力测试采用深圳三思纵横科技股份有限公司生产的 UTM6102 型半自动土壤贯入仪, 探针直径 2 mm, 下降速度为 20 mm/min, 步长设置为 0.06 mm, 最大试验力为 100 N, 每个样品做 3 次平行测试。

1.4 数据处理

采用 IBM SPSS 26.0 软件进行统计分析, 对藓结皮与无结皮间的孔隙度、面孔率和理化性质分别进行 *t* 检验和方差分析, 对土壤面孔率与穿透阻力进行 Pearson 相关分析。采用 OriginPro 2021 软件绘图, 并对土壤面孔率和穿透阻力进行数据拟合。采用 IBM Amos 26 软件构建结构方程模型, 将砂粒、粉粒、黏粒含量降维成机械组成后与其他数据进行归一化处理。

2 结果与分析

2.1 藓结皮与无结皮的表层土壤理化性质差异

藓结皮发育明显影响风沙土和黄绵土的理化性质, 但影响范围随着土层深度增加呈递减趋势(表 1)。对于风沙土, 藓结皮与无结皮的土壤理化性质在 0—20 mm 土层内差异显著, 与无结皮相比, 藓结皮砂粒含量和容重更低, 而有机质、粉粒、黏粒含量更高, 表明藓结皮发育后增加风沙土的细颗粒含量, 并降低土壤紧实度。藓结皮在 20—40 mm 土层内的土壤理化性质表现出相似的变化规律, 与无结皮的差异仍然显著, 但其影响程度渐弱。在黄绵土上, 藓结皮的黏粒含量与无结皮相近, 粗颗粒和有机质含量增加, 容重降低; 0—20, 20—40 mm 土层内, 藓结皮和无结皮的土壤理化性质表现出相似的变化规律。藓结皮的发育显著改变土壤的机械组成, 降低土壤紧实度, 土壤中增加的有机质主要积累在 0—20 mm 土层, 其对土壤理化性质的影响随土层深度增加而减弱。

2.2 藓结皮与无结皮的表层土壤孔隙度差异

由图 1 可知, 风沙土和黄绵土上藓结皮总孔隙度的变化规律相似, 藓结皮主要影响浅表层 0—20 mm 内的土壤总孔隙度。在 0—40 mm 内的风沙土上, 藓结皮的孔隙度随土层深度增加而呈指数降低, 0—20 mm 土层内最大孔隙度为 38.3%, 降幅达 70.7%, 而 20—40 mm 土层内无明显变化趋势; 无结皮的孔隙度整体变化不明显, 平均值为 11.8%。在 0—40 mm 土层内的黄绵土上, 藓结皮的孔隙度变化与风沙土上相仿, 0—20 mm 土层内降幅达 71.6%, 20—40 mm 土层内变化趋势不明显; 无结皮的孔隙度则随土层深度增加从 11.5% 线性降低至 3.9%。整体上看, 与风沙土相比, 黄绵土上藓结皮和无结皮的总孔隙度更小。

表 1 藓结皮与无结皮的土壤理化性质

土壤类型	土层深度/mm	处理	机械组成/%			容重/ (g·cm ⁻³)	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)
			砂粒/ (0.05~2 mm)	粉粒/ (0.002~0.05 mm)	黏粒/ (<0.002 mm)		
风沙土	0—20	藓结皮	90.1±0.1d	9.2±0d	0.7±0d	1.15±0.01e	29.69±0.14a
		无结皮	95.4±0b	4.4±0e	0.2±0e	1.58±0.01a	4.82±0.59f
	20—40	藓结皮	93.8±0.1c	5.6±0.1e	0.6±0d	1.44±0.03b	7.50±0.27e
		无结皮	97.8±0.1a	2.2±0.1f	0.0±0f	1.60±0.02a	3.66±0.20f
黄绵土	0—20	藓结皮	71.8±0.2e	25.7±0.2c	2.5±0c	1.08±0.03f	26.39±0.99b
		无结皮	66.9±0.4g	30.2±0.3b	2.9±0b	1.22±0.02d	15.59±0.28c
	20—40	藓结皮	70.6±0.2f	26.8±0.1c	2.6±0c	1.19±0.03de	8.61±0.19d
		无结皮	64.7±0.1h	32.2±0.1a	3.1±0a	1.32±0.02c	8.34±0.21d

注:数据均为平均值±标准差;同列不同小写字母表示藓结皮和无结皮之间差异显著($p<0.05$)。下同。

在 0—20 mm 土层内,与无结皮相比,风沙土和黄绵土上藓结皮的发育使土壤总孔隙度分别增加 1.62, 2.12 倍。 t 检验结果表明,2 种土壤上藓结皮与无结皮的土壤总孔隙度存在显著差异($F=21.74, p=0.01$)。在 20—40 mm 土层内,藓结皮和无结皮的平均总孔隙度在风沙土上分别为 11.6%,16.3%,在黄绵土上分别为 9.0%,6.3%。 t 检验结果显示,2 种土壤上藓结皮与无结皮的土壤总孔隙度之间均无显著差异($F=19.27, p=0.44$)。可见,生物结皮的发育显著增加浅表层 0—20 mm 土壤内的总孔隙度。

由图 2 可知,藓结皮最表层的面孔率最高,在约 10 mm 土层深度时降至与无结皮接近。风沙土藓结皮的面孔率从 47.4%迅速降低至 11.1%后趋于稳定,风沙土无结皮的面孔率为 14.0%~10.4%;黄绵土藓结皮的面孔率从 41.6%迅速降低至 8.1%后趋于稳定,黄绵土无结皮的面孔率从 14.5%逐渐降低至 3.5%。藓结皮发育显著提高土壤上层 10 mm 内的面孔率($p<0.01$),但藓结皮的面孔率在结皮层 5 mm 内急剧下降。

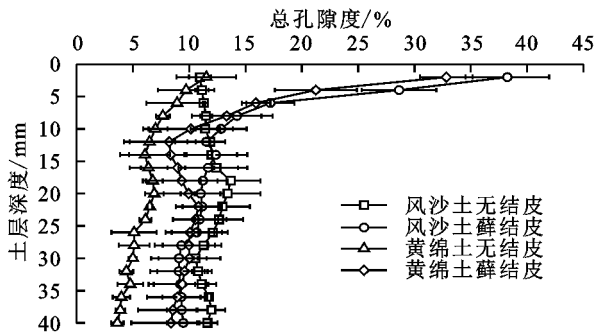


图 1 藓结皮与无结皮总孔隙度随土层深度的变化

2.3 藓结皮与无结皮的表层土壤孔隙特征差异

由表 2 可知,在风沙土上,藓结皮的发育降低土壤孔隙当量直径和表面积,并增加土壤大孔隙数量。其中,各土层藓结皮的孔隙直径均值为 0.31~0.32 mm,孔隙表面积均值为 0.23~0.24 mm²,均低于无

结皮;大孔隙数均值为 4 132.21~2 468.23,均显著高于无结皮($p<0.05$)。在黄绵土上,藓结皮发育提高各土层内土壤孔隙当量直径、表面积和大孔隙数。其中,藓结皮孔隙直径、表面积和大孔隙数均值在各土层内均高于无结皮,且与无结皮的大孔隙数差异随土层深度增加逐渐减小。

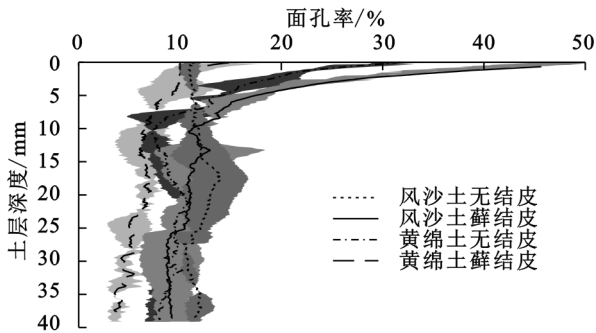


图 2 藓结皮与无结皮面孔率随土层深度的变化

通过 CT 扫描图像(图 3)可知,藓结皮与无结皮间土壤孔隙存在差异。在风沙土上,藓结皮中大孔隙较多,土壤颗粒填充导致大小孔隙分布不均,孔隙网络结构复杂,形成许多互相连接的不规则孔隙;无结皮中孔隙尺寸较小,分布均匀。在黄绵土上,藓结皮中存在许多孤立的中小孔隙,孔隙连通性不佳,其边缘清晰可见,形状近圆形,分布相对均匀,孔隙网络结构较为简单;无结皮中由于土壤颗粒紧密堆积,成圆孔隙较少,可见团块状结构间的裂隙。2 种土壤的藓结皮剖面图显示,风沙土上,结皮层遍布较多不规则孔隙,土壤颗粒松散堆积,且贯通的大孔隙较多,有无脊椎动物活动的痕迹,与下层土壤形成明显的边界;黄绵土上,结皮层孔隙明显增多,土壤颗粒排列疏松,与下层致密的土体形成鲜明对比。

2.4 藓结皮与无结皮的土壤穿透阻力差异

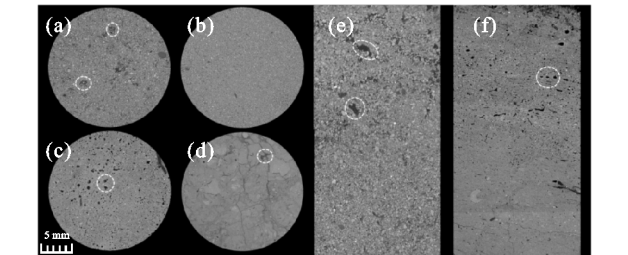
由图 4 可知,在 0—40 mm 土层内,藓结皮和无结皮的土壤穿透阻力随深度的变化趋势明显不同。

在风沙土上, 藓结皮的穿透阻力在 0—24 mm 内随土层深度增加而增大至 0.95 MPa, 变化速率逐渐减小, 在 24 mm 以下则无明显变化趋势, 为 0.91~0.96 MPa; 无结皮的穿透阻力随土层深度增加逐渐增大至 0.44 MPa, 整体低于藓结皮。在黄绵土上, 藓结皮的

穿透阻力在 0—18 mm 内随土层深度增加而增大至 2.14 MPa, 在 18 mm 以下则为 2.19~2.56 MPa, 无明显变化趋势; 无结皮的穿透阻力随土层深度增加而增大至 5.81 MPa, 变化速率逐渐减小, 但整体仍高于藓结皮。

表 2 藓结皮与无结皮各土层的孔隙参数

土壤类型	土层深度/mm	处理	当量直径/mm	表面积/mm ²	大孔隙数
风沙土	0—10	藓结皮	0.31±0.02b	0.23±0.09d	4132.21±89.79a
		无结皮	0.38±0.07a	0.32±0.05b	1115.34±39.62g
	10—20	藓结皮	0.32±0.03b	0.24±0.03d	4123.13±35.14a
		无结皮	0.35±0.04a	0.26±0.08c	1717.78±79.28e
	20—30	藓结皮	0.32±0.02b	0.23±0.01d	2468.23±35.98c
		无结皮	0.36±0.05a	0.27±0.07c	1387.69±44.66g
	30—40	藓结皮	0.32±0.03b	0.23±0.03d	2483.07±88.72c
		无结皮	0.40±0.08a	0.33±0.07b	1809.00±60.35e
黄绵土	0—10	藓结皮	0.22±0.01d	0.37±0.08a	2903.12±40.59b
		无结皮	0.18±0.07f	0.11±0.01f	322.71±21.38h
	10—20	藓结皮	0.20±0.02e	0.12±0.01f	2002.00±23.44d
		无结皮	0.19±0.01ef	0.11±0.02f	457.48±19.54h
	20—30	藓结皮	0.23±0.02d	0.14±0.05e	1353.33±19.81g
		无结皮	0.16±0.05fg	0.07±0g	1180.09±24.60g
	30—40	藓结皮	0.25±0.05c	0.15±0.02e	1526.06±59.74f
		无结皮	0.15±0.01g	0.07±0.01g	1428.51±15.13fg



注: a、b、c、d、e、f 分别为风沙土藓结皮、风沙土无结皮、黄绵土藓结皮、黄绵土无结皮、风沙土藓结皮剖面、黄绵土藓结皮剖面。

图 3 藓结皮和无结皮的 CT 扫描图像

土壤穿透阻力总体均随土层深度增加而增大, 由于土壤本身质地及水分含量的差异, 风沙土上藓结皮的穿透阻力始终高于无结皮, 黄绵土上藓结皮始终低于无结皮; 但 2 种土壤上藓结皮的穿透阻力随土层深度的变化趋势相似, 以 20 mm 左右的土层深度为界, 上层总体呈增大的趋势, 在 6 mm 附近均有先增后减的明显突变; 下层则无明显变化趋势。

2.5 土壤孔隙度与穿透阻力的关系及其对藓结皮发育的响应途径

由图 5 可知, 在风沙土上, 藓结皮的面孔率与穿透阻力在 0—5 mm 土层内呈对数负相关, 随着土壤孔隙度升高, 穿透阻力不断减小且变化速率随之减小; 无结皮的面孔率与穿透阻力在 0—20 mm 土层内

呈线性正相关, 穿透阻力随土壤孔隙度升高而增大。在黄绵土上, 藓结皮的面孔率与穿透阻力在 0—5 mm 土层内呈对数负相关, 无结皮的面孔率与穿透阻力在 0—20 mm 土层内亦呈对数负相关, 穿透阻力均随土壤孔隙度升高而减小。在不同土壤上, 藓结皮表层 0—5 mm 土层内孔隙度对穿透阻力的影响是相似的, 但无结皮孔隙度对穿透阻力的影响明显不同。藓结皮发育改变土壤最表层 0—5 mm 土层内孔隙度与穿透阻力的相关关系, 使得结皮表层穿透阻力对孔隙度具有相似的响应。

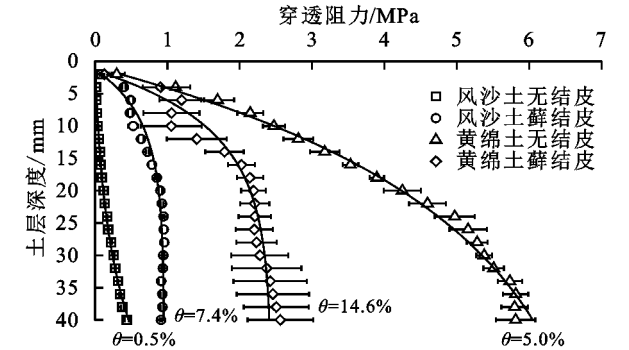


图 4 藓结皮与无结皮穿透阻力随土层深度的变化

结构方程模型分析结果见图 6, 藓结皮发育显著影响土壤的机械组成 ($p<0.01$), 进而影响土壤孔隙度 ($p<0.01$) 和穿透阻力 ($p<0.01$)。发育后的藓结皮,

其土壤机械组成和有机质含量可解释 75.0% 的土壤孔隙度变化,机械组成和孔隙度可解释 88.0% 的土壤穿透阻力变化。一方面,藓结皮发育通过改变土壤机械组成直接影响穿透阻力,具有极显著正效应,机械组成对穿透阻力的路径系数达 0.61;另一方面,土壤机械组成和有机质含量通过改变孔隙度间接影响穿透阻力,孔隙度对穿透阻力具有极显著负效应,路径系数达 0.40。

3 讨论

3.1 生物结皮对土壤孔隙性状的影响及其机制

土壤孔隙度是土壤孔隙性状最重要的指标之一,受土壤形成过程中生物化学作用影响。通常,生物结皮发育对土壤孔隙度的影响存在正负两方面的效应:一方

面,其生物体及分泌物附着在土壤表面并在湿润时体积膨胀,堵塞土壤孔隙,导致土壤孔隙度降低^[17];另一方面,生物结皮中的分泌物和生物残体增加土壤有机质,而胞外多糖的黏结作用和菌丝、藻丝、苔藓假根等的缠绕捆绑又将土壤颗粒和有机质胶结起来^[18],从而促进土壤中水稳性团聚体的形成,导致土壤中微小孔隙增加,最终提高表层土壤的整体孔隙度。此外,生物结皮发育后,土壤中以藻类、苔藓为食的无脊椎动物增加,无脊椎动物在土壤中的活动也产生更多的微孔隙和大孔隙,使土壤孔隙度升高^[17]。藓结皮发育显著提高表层土壤孔隙度,且大孔隙数量增加,表明生物结皮对土壤孔隙度的正效应更明显。

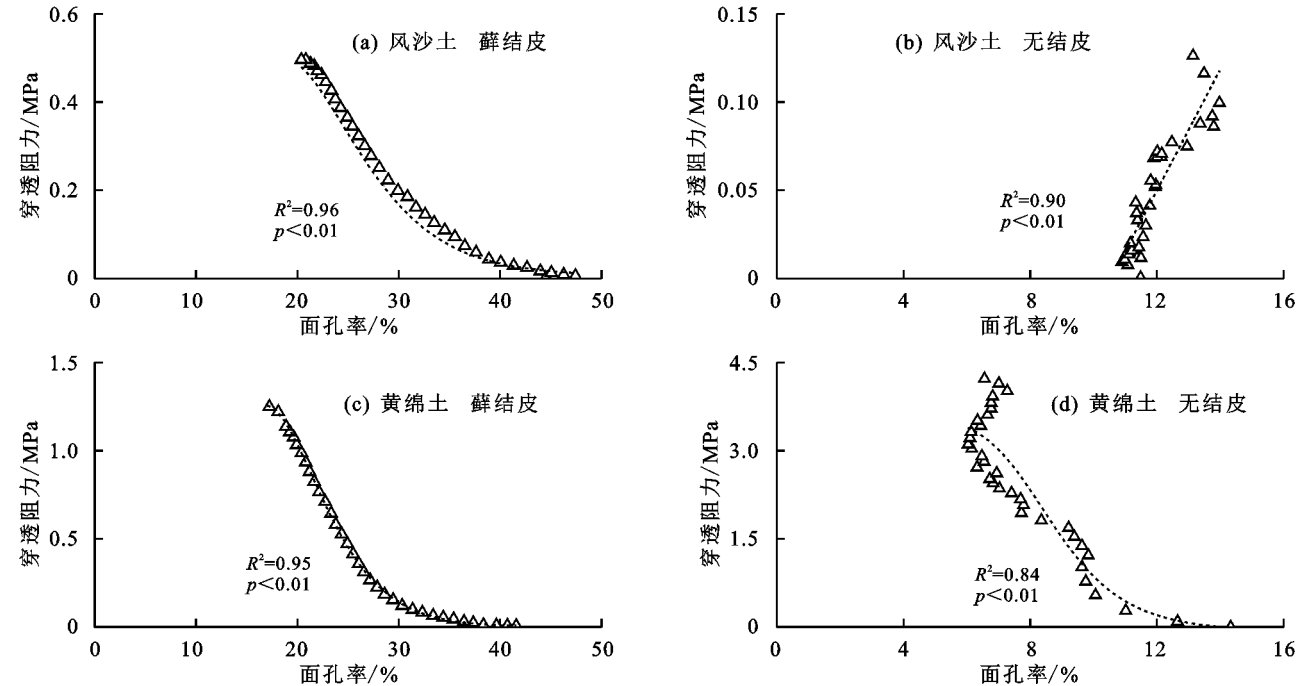
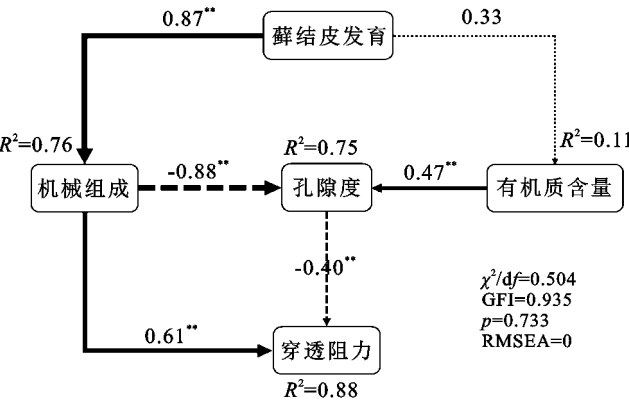


图 5 风沙土和黄绵土上藓结皮(0—5 mm)与无结皮(0—20 mm)的土壤面孔率与穿透阻力的关系



注:线条粗细程度与路径系数呈正比;实线表示正效应,短横线表示负效应,点线表示不显著。

图 6 土壤理化性质、孔隙度与穿透阻力的结构方程模型

藓结皮发育后土壤孔隙形态的改变也充分体现生物结皮对土层孔隙度的正向影响(图 3)。在风沙土上,相比无结皮松散均质的无结构状态,藓结皮则

形成团聚体,细颗粒填充在大团聚体中,微小孔隙增多,体现出土壤颗粒和孔隙镶嵌分布的非均质性。结合其土壤孔隙直径和表面积均值减小可以推测,藓结皮发育后,风沙土孔隙度增加的原因主要是生物结皮的物理化学作用促进团聚体的形成,产生更多破碎的微小孔隙。黄绵土上,藓结皮中存在许多孤立的近圆形孔隙,与质地细密孔隙较少的无结皮形成鲜明对比,藓结皮明显增大土壤孔隙直径和表面积均值。生物结皮覆盖下,其菌丝、假根等的延伸分解黄绵土中致密的团块状结构,形成更多较大的孔隙,使得其孔隙度增加。

3.2 生物结皮对土壤穿透阻力的影响及其机制

受含水量^[19]和土壤质地^[12]影响,风沙土和黄绵土的穿透阻力差异显著,但在生物结皮发育的情况下,穿透阻力随土层深度的变化趋势相同。藓结皮在结皮层中部出现穿透阻力的突增(图 4),可能是由于

结皮层中的真菌菌丝和苔藓假根与土壤颗粒锚定形成的致密网状结构^[20],稳定表层土壤颗粒同时也是生物结皮层强度的来源。生物结皮的物理化学过程改变土壤颗粒的形状和尺寸,导致其机械组成发生变化,颗粒间的作用力直接影响土壤穿透阻力。在上覆压力作用下,下层土壤颗粒之间摩擦力增加,土壤穿透阻力持续增大,但藓结皮下层土壤穿透阻力增大速率明显变缓,可能是由于 0—20 mm 土层内藓结皮土壤容重明显低于无结皮土壤容重(表 1),生物结皮层对下层土壤施加的压力更小。

另一方面,生物结皮对穿透阻力的影响来自于孔隙度,生物结皮发育后,不同尺寸土壤颗粒的堆积方式与有机质的胶结作用共同导致土壤孔隙度的变化,进而对穿透阻力具有极显著的负效应。结合面孔率与穿透阻力的相关性分析结果可知,孔隙度低,说明土壤紧实度大、颗粒排列更紧密,颗粒之间以及颗粒—水界面间的作用力增大,土壤内聚力和机械稳定性增强。此外,孔隙度降低导致部分起润滑作用的游离水逐渐转变为弱结合水,润滑效果减弱、颗粒间的摩擦力增大,土壤穿透阻力增大^[21],因此,孔隙度通常与穿透阻力呈反比。生物结皮层的孔隙度可以表征其分泌物、菌丝、假根与土壤颗粒胶结形成的网络结构密度,孔隙度越低胶结越紧密,摩擦力越大,穿透阻力的增长速率也更快。但在风沙土无结皮表层土壤中,孔隙度与穿透阻力呈正比,可能是由于干旱和半干旱地区的风沙土表层中通常存在气泡状孔隙,甚至形成气泡层,增加土壤孔隙度。表面密闭的气泡状孔隙导致孔隙内部气压升高,而孤立的近球形孔隙又使得土壤颗粒间连通性减弱^[22],在一定程度上增大穿透阻力。但藓结皮发育明显改变风沙土和黄绵土上孔隙度与穿透阻力间的关系,本研究中,不同土壤上结皮表层土壤的孔隙度与穿透阻力及其相关关系反映出相似的物理结构变化,说明生物结皮对土壤的物理结构具有一定的调控作用。

3.3 生物结皮影响土壤孔隙和穿透阻力的水土保持意义

研究区位于黄土高原水蚀风蚀交错区,由于其地理位置的过渡性和气候变化的剧烈性,导致干旱缺水,水土流失严重,生态环境极为脆弱。该区生物结皮的大面积发育首先改变土壤的物理特性,继而对径流入渗、土壤侵蚀、土壤水分蒸发、地球化学循环和生物多样性等方面产生积极影响^[23-24]。

土壤孔隙从数量、尺寸以及空间分布等方面影响和控制着土壤中水、肥、气、热等功能,常被用来表征

土壤结构。土壤孔隙度和孔隙网络结构对土壤水分及溶质的流动特性起着重要作用,孔隙的形状和大小分布也与生物活性、根系生长等密切相关^[4]。在本研究中,藓结皮发育提高表层土壤的孔隙度和孔隙结构复杂性,说明生物结皮明显改善土壤结构,使得土壤稳定性更强,且有利于土壤水分入渗和土壤持水,减少地表径流,从而防止水土流失^[5];另一方面,生物结皮对表层土壤孔隙状况的改善为水气交换提供更好的条件,尤其是大孔隙数量的增加提高土壤透气性和水分有效性,促进维管植物根系的生长以及对水分的吸附,提高生物结皮层涵养水源的能力^[6],同时,其对微生境的不断改善也有利于该区植被恢复^[23]。

穿透阻力是土壤最重要的力学性质之一,生物结皮通过在结皮层中部形成更坚硬的层次来提高表层土壤穿透阻力,有效地稳定上表面土壤颗粒,并对下层土壤形成一个保护层来抑制风蚀水蚀。研究^[25]表明,生物结皮发育后的地表临界起沙风速远高于裸露地表,能够有效降低土壤风蚀,且生物结皮降低水蚀的能力是物理结皮的 3~5 倍。生物结皮对穿透阻力的提升增强土壤稳定性,也为种子着床、萌发和幼苗生长提供有利条件,从而增加植被覆盖度和生物多样性,促进黄土高原地区的水土保持和生态恢复。

4 结论

风沙土和黄绵土上发育藓结皮后,土壤孔隙直径和表面积发生改变,大孔隙数量增加,从而显著提高表层 0—10 mm 土层内的土壤总孔隙度,有利于土壤持水,防治水土流失。由于结皮层形成的致密网状结构,2 种土壤上的藓结皮穿透阻力均在结皮层中部发生明显突变,提高表层土壤强度,从而减少土壤侵蚀。生物结皮发育对土壤穿透阻力的影响一方面来自机械组成的正效应;另一方面,通过土壤理化性质改变孔隙度产生的负效应。不同土壤上结皮表层 5 mm 内穿透阻力对孔隙度的响应相似,说明生物结皮对土壤物理结构具有一定的调控作用,可以从不同方向改善土壤结构,促进生态恢复。生物结皮具有保持水土等宏观功能,其发育后的各种物理过程可为区域生态治理提供新思路。

参考文献:

- [1] Belnap J, Lange O L. Biological soil crusts: Structure, function, and management [M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2003.
- [2] Weber B, Belnap J, Büdel B, et al. What is a biocrust? A refined, contemporary definition for a broadening re-

- search community[J]. *Biological Reviews*, 2022, 97(5): 1768-1785.
- [3] Felde V, Peth S, Uteau-Puschmann D, et al. Soil microstructure as an under-explored feature of biological soil crust hydrological properties: Case study from the NW Negev desert[J]. *Biodiversity and Conservation*, 2014, 23(7): 1687-1708.
- [4] 周虎, 李文昭, 张中彬, 等. 利用 X 射线 CT 研究多尺度土壤结构[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6): 1226-1230.
- [5] 王新平, 李新荣, 潘颜霞, 等. 我国温带荒漠生物土壤结皮孔隙结构分布特征[J]. *中国沙漠*, 2011, 31(1): 58-62.
- [6] Miralles-Mellado I, Cantón Y, Solé-Benet A. Two-dimensional porosity of crusted silty soils: Indicators of soil quality in semiarid rangelands? [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2011, 75(4): 1330-1342.
- [7] Pagliai M, Vignozzi N. Soil pore system as an indicator of soil quality[J]. *Advances in Geoecology*, 2002, 35: 69-80.
- [8] 杨世琦, 吴会军, 韩瑞芸, 等. 农田土壤紧实度研究进展[J]. *土壤通报*, 2016, 47(1): 226-232.
- [9] Drahorad S L, Felix-Henningsen P. An electronic micropenetrometer (EMP) for field measurements of biological soil crust stability[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(4): 519-520.
- [10] Felde V, Drahorad S L, Felix-Henningsen P, et al. Ongoing oversanding induces biological soil crust layering - A new approach for biological soil crust structure elucidation determined from high resolution penetration resistance data [J]. *Geoderma*, 2018, 313: 250-264.
- [11] Drahorad S L, Felix-Henningsen P. Application of an electronic micropenetrometer to assess mechanical stability of biological soil crusts[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176(6): 904-909.
- [12] 王国鹏, 肖波, 李胜龙, 等. 黄土高原藓结皮覆盖土壤的穿透阻力特征及其影响因素[J]. *土壤*, 2021, 53(1): 173-182.
- [13] 杜满聪, 李江涛, 李淑玲, 等. 不同耕作方式对华南坡耕地土壤孔隙结构和抗穿透强度影响[J]. *广州大学学报* (自然科学版), 2018, 17(6): 74-80.
- [14] 唐克丽. 黄土高原水蚀风蚀交错区治理的重要性与紧迫性[J]. *中国水土保持*, 2000(11): 11-12.
- [15] Xiao B, Ma S, Hu K L. Moss biocrusts regulate surface soil thermal properties and generate buffering effects on soil temperature dynamics in dryland ecosystem[J]. *Geoderma*, 2019, 351: 9-24.
- [16] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [17] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J]. *Hydrol Process*, 2006, 20: 3159-3178.
- [18] 张元明, 王雪芹. 荒漠地表生物土壤结皮形成与演替特征概述[J]. *生态学报*, 2010, 30(16): 4484-4492.
- [19] Vaz C, Manieri J M, Maria I, et al. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content[J]. *Geoderma*, 2011, 166(1): 92-101.
- [20] Lan S B, Li W, Zhang D L, et al. Successional stages of biological soil crusts and their microstructure variability in Shapotou region (China) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 65(1): 77-88.
- [21] Ye C, Guo Z L, Cai C F, et al. Effect of water content, bulk density, and aggregate size on mechanical characteristics of Aquults soil blocks and aggregates from subtropical China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17: 210-219.
- [22] Dietze M, Bartel S, Lindner M. Formation mechanisms and control factors of vesicular soil structure[J]. *Catena*, 2012, 99: 83-96.
- [23] 肖波, 赵允格, 邵明安. 陕北水蚀风蚀交错区两种生物结皮对土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2007, 27(11): 1013-1023.
- [24] 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.
- [25] Williams J D, Dobrowolski J P, West N E, et al. Microphytic crust influence of wind erosion[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995, 38(1): 139-146.