

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.01.024

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. 土壤, 2021, 53(1): 173–182.

黄土高原藓结皮覆盖土壤的穿透阻力特征及其影响因素^①

王国鹏^{1,2}, 肖波^{1,2,3*}, 李胜龙^{1,2}, 孙福海^{1,2}, 李渊博^{1,2}

(1 中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193; 2 农业农村部华北耕地保育重点实验室, 北京 100193; 3 中国科学院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)

摘要: 生物结皮的发育显著地影响并改变了表层土壤的理化性状, 从而影响土壤穿透阻力。为探明生物结皮层对土壤穿透阻力的影响, 针对黄土高原风沙土和黄绵土两种典型土壤, 利用高精度土壤贯入仪测定并比较了不同含水量下藓结皮土壤和无结皮土壤的穿透阻力差异, 定量分析了藓结皮层对土壤穿透阻力的影响及其与土壤性质(含水量、容重和有机质含量以及颗粒组成)的关系。结果表明: 风沙土和黄绵土藓结皮层最大穿透阻力的变化范围为 0.38 ~ 3.74 MPa 和 0.43 ~ 8.01 MPa, 分别为同等深度下无结皮土壤的 2.14 ~ 9.45 倍($P=0.001$)和 1.38 ~ 6.27 倍($P=0.051$)。藓结皮对风沙土穿透阻力的影响深度为表层 2 ~ 12 mm($P=0.028$), 而对黄绵土的影响深度为 3 ~ 24 mm(随含水量变异较大)。同时, 与无结皮土壤的穿透阻力随深度增加而线性增加的趋势不同, 藓结皮土壤的穿透阻力随深度增加在结皮层呈先增后减的趋势, 在结皮下层呈线性增加的趋势。此外, 藓结皮土壤的横向穿透阻力和纵向穿透阻力差异显著($P \leq 0.03$), 但在无结皮土壤上差异不显著($P \geq 0.052$)。藓结皮土壤的穿透阻力与含水量呈显著的幂函数关系($P < 0.001$), 与容重、有机质含量以及砂粒含量呈线性关系, 这些因素均为藓结皮改变表层土壤穿透阻力的重要途径。

关键词: 生物结皮; 土壤硬度; 土壤紧实度; 机械稳定性; 土壤机械阻力

中图分类号: S152.4; S152.9 **文献标志码:** A

Characteristics of Penetration Resistance of Moss-dominated Biocrusts on Aeolian and Loessal Soils and Its Influencing Factors on Chinese Loess Plateau

WANG Guopeng^{1,2}, XIAO Bo^{1,2,3*}, LI Shenglong^{1,2}, SUN Fuhai^{1,2}, LI Yuanbo^{1,2}

(1 College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2 Key Laboratory of Arable Land Conservation (North China), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100193, China; 3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: The development of biocrust significantly affect and change the physiochemical properties of the surface soil, which in turn affects the penetration resistance. In order to investigate the effect of biocrust on soil penetration resistance, this study took moss-dominated biocrusts and bare soils from aeolian and loessal soils on the Loess Plateau as the test materials, compared the differences in penetration resistance between biocrusts and bare soils, and investigated their differences in penetration resistance under different water contents by using the high precision soil penetrometer. At the same time, the influence of biocrusts on soil penetration resistance and its relationship with soil properties (water content, bulk density, organic matter content, particle composition) were quantitatively analyzed. The results showed that the maximum penetration resistance was 0.38–3.74 MPa for aeolian soil with biocrust and 0.43–8.01 MPa for loessal soil with biocrust, which was about 2.14 to 9.45 times ($P=0.001$) and 1.38 to 6.27 ($P=0.051$) times of the same depth of aeolian and loessal soils without crust, respectively. The effect of moss crust on the penetration resistance of aeolian soil was 2 to 12 mm ($P=0.028$), while the depth of influence on loessal soil varied greatly under different water contents, ranging from 3 to 24 mm. At the same time, the penetration resistance of the bare soil increased linearly with the increase of soil depth. The penetration resistance of soil with biocrust increased first and then decreased with the increase of depth in the crust layer, while it was linear in the lower layer of the crust. In addition, the lateral and the longitudinal

①基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41671221)和中国科学院“西部之光”人才培养引进计划项目(2019)资助。

* 通讯作者(xiaobo@cau.edu.cn)

作者简介: 王国鹏(1993—), 男, 山东东营人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理和水土保持研究。E-mail: w_guopeng01@163.com

penetrating resistances were significantly different ($P \leq 0.03$) for soil with the biocrust, but not significant for soil without crust ($P \geq 0.052$). The penetration resistance of soil with biocrust had a significant power function relationship with water content ($P < 0.001$), but was linearly correlated with bulk density, organic matter and sand contents. These factors are important ways for the biocrust to change the penetration resistance of the surface soil.

Key words: Biocrusts; Soil hardness; Soil compaction; Mechanical stability; Soil mechanical resistance

土壤穿透阻力也称土壤硬度、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^[1]。土壤穿透阻力是重要的土壤力学特征指标,影响土壤水分、温度、通气性和根系的生长、穿插以及对养分的吸收等状况^[1-2]。影响土壤穿透阻力的因素主要包括:土壤质地、容重、土壤水分状况以及土壤结构等^[2-5]。这些因素共同对土壤穿透阻力产生影响,且他们之间也相互影响。其中,土壤水分状况是影响穿透阻力的主要因素之一。研究表明,当土壤基质势为 -200 kPa 时,约 50% 的土壤穿透阻力大于 2.0 MPa (衡量穿透阻力对作物根系生长影响的临界值)^[6]。目前,国内外关于农田土壤穿透阻力的研究较多,主要集中在土壤穿透阻力的测定与预测^[7-8]、土壤穿透阻力的动态变化及影响因素^[5,9]、土壤穿透阻力对作物根系生长和产量的影响等方面^[2,10]。

生物土壤结皮(简称生物结皮)是由藻类、地衣、苔藓、细菌以及真菌等生物同表层土壤颗粒相互作用形成的特殊复合体^[11]。它普遍存在于干旱和半干旱地区,覆盖度占陆地面积的 12.2% ^[12]。研究发现,生物结皮不仅能在干旱贫瘠的环境中生长、发育和繁殖,而且能通过生理代谢影响并改变周围微环境,在土壤水分循环、养分循环、水土流失以及植被恢复等方面发挥着重要作用^[11,13]。生物结皮显著地影响并改变了表层土壤的理化性状,如容重、有机质含量、水分状况等^[14-15],进而影响到土壤穿透阻力。穿透阻力是表征和量化生物结皮发育阶段的重要指标,也是表征生物结皮机械强度和稳定性的重要指标。随着生物结皮的发育,机械稳定性逐渐增大^[16]。有研究显示,物理结皮、藻结皮以及藓结皮的穿透阻力(硬度)分别为 1.10 、 1.28 和 1.68 kg/cm^2 ^[17]。Drahorad 和 Felix-Henningsen^[18]首次通过高分辨率的电子微穿透阻力计研究了生物结皮沙土和无结皮沙土的穿透阻力随土壤深度的变化,结果显示藻结皮穿透阻力的最大值为 1.11 MPa ,且相同深度藻结皮土壤穿透阻力均大于无结皮土壤。王蕊等^[19]则通过生物结皮影响下种子萌发和生长试验侧面揭示了生物结皮对土壤穿透阻力的影响。此外,穿透阻力还可作为表征生物结皮抗干扰能力的重要指标^[18,20]。尽管国内外学者针对生

物结皮土壤穿透阻力开展了不少研究,但以往的研究也暴露出不少问题,主要集中在以下几个方面:①概念混乱,通常所指的机械稳定性、硬度以及机械强度,其实质均为本研究所指的穿透阻力;②穿透阻力通常作为生物结皮研究的重要指标,少有研究专门针对生物结皮穿透阻力;③定性或者半定量研究居多,研究范围局限于结皮层或单一条件(含水量等)下;④研究内容尚不全面,诸如生物结皮对表层土壤穿透阻力的影响程度如何?在不同含水量、不同土壤深度以及不同土壤类型上又如何?横向穿透阻力和纵向穿透阻力的表现是否一致?这些问题都没有明确的答案。黄土高原地处西部内陆,环境条件多变,且随着退耕还林(草)工程的实施,生物结皮已逐渐成为该区普遍存在的地被物,显著地影响着地表结构和性质。因此,开展黄土高原地区生物结皮土壤穿透阻力的研究极为重要。

本研究以黄土高原风沙土和黄绵土两种典型土壤上发育的藓结皮为研究对象,通过测定土壤的穿透阻力,比较藓结皮土壤和无结皮土壤及其在不同含水量下穿透阻力的差异,同时比较横向穿透阻力和纵向穿透阻力的差异,以期探讨生物结皮对土壤穿透阻力的影响及其与土壤性质(含水量、容重和有机质含量以及颗粒组成)的关系,为认识和理解生物结皮对表层土壤结构和性质的影响提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省神木市以西的六道沟流域($110^{\circ}21' \sim 110^{\circ}23' \text{ E}$, $38^{\circ}46' \sim 38^{\circ}51' \text{ N}$),流域面积为 6.89 km^2 ,海拔高度为 $1094.0 \sim 1273.9 \text{ m}$,属中温带半干旱气候,年均气温 8.4°C ,多年平均降雨量 408.5 mm 。流域的地理位置十分特殊,是典型的水蚀风蚀交错带,生态环境脆弱,土壤侵蚀问题严重^[21]。主要植被有沙柳(*Salix psammophila* C. Wang et Chang Y. Yang)、小叶杨(*Populus simonii* Carr.)、长芒草(*Stipa bungeana* Trin.)、苜蓿(*Medicago sativa* Linn.)、沙蒿(*Artemisia ordosica* Krasch.)、柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)等。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%^[22]。

1.2 样品采集与测定

在野外调查的基础上，于 2018 年 9—10 月在研究区内选择无结皮风沙土、藓结皮风沙土、无结皮黄绵土、藓结皮黄绵土 4 种典型样地各 1 块(单块样地面积大于 15 m²，且同种土壤上无结皮和藓结皮样地相邻)，用环刀(直径 5.4 cm，高度 5 cm)取原状土样若干带回实验室备用(样地及样品基本情况见表 1)。

在每块样地中随机均匀选择 5 个样点作为重复进行采样，每个样点采集一个纵向样品和一个横向样品(探究两种不同方向穿透阻力之间的关系)。同时在各样点附近采集土样测定其他理化指标(分层测定，2 cm 为 1 层，共测 3 层)。纵向取样的基本操作为保持环刀侧壁与地表垂直，取土壤表层 0~5 cm(环刀高度)的原状土样。横向取样的基本操作为挖取土壤剖面，保持环刀侧壁与地表平行，取土壤表层 0~5.4 cm(环刀直径)的原状土样。

表 1 所选样地及供试土壤样品基本信息(平均值±标准误差)
Table 1 Characteristics of sampling sites and soil samples

测定指标	无结皮风沙土	藓结皮风沙土	无结皮黄绵土	藓结皮黄绵土	<i>t</i> (<i>F</i>)	<i>P</i>
土壤质地	砂土	砂土	砂质壤土	砂质壤土	—	—
土地利用类型	灌木林地	灌木林地	草地	草地	—	—
容重(g/cm ³)	1.56 ± 0.02 a	1.42 ± 0.04 b	1.40 ± 0.03 b	1.26 ± 0.03 c	43.403	0.001
黏粒含量(%)	2.56 ± 0.59 d	4.29 ± 0.98 c	10.47 ± 0.76 b	13.72 ± 2.40 a	214.207	0.001
砂粒含量(%)	94.97 ± 1.18 a	89.34 ± 3.75 b	49.93 ± 10.27 c	30.39 ± 9.09 d	286.060	0.001
藓结皮厚度(mm)	—	9.30 ± 1.15 b	—	12.93 ± 1.92 a	−9.781	0.001
藓结皮盖度(%)	—	76.42 ± 10.12 a	—	50.84 ± 8.20 b	−3.401	0.027
藓生物量(g/cm ²)	—	0.11 ± 0.04 a	—	0.06 ± 0.02 b	−3.225	0.005
藓植株密度(株/cm ²)	—	95.00 ± 7.18 a	—	64.67 ± 4.46 b	−4.396	0.012

注：*t*(*F*)：表示 *t* 检验(单因素方差分析)结果；*P* 为概率值；同行不同小写字母表示不同样地之间差异显著(*P* < 0.05)。

土壤穿透阻力的测定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，最大试验力为 100 N，分辨率可达 1×10^{−5} N。无特别标注外，下文所指的穿透阻力均为纵向穿透阻力。

土壤含水量控制及穿透阻力测定：将装有原状土样的环刀带孔一侧朝下放进空水槽中，分 3 次间隔注水至与环刀口齐平，每次间隔 6 h 以上，浸泡至饱和状态；将饱和后的土样取出，放置至无成股水流下时，擦拭环刀外壁多余的水分后称重(取平均值计算含水量)，同时测定土壤穿透阻力(测定时均保持环刀竖直放置)；随后将样品置于室温下自然干燥，期间每隔 24 h 称重一次同时测定穿透阻力，共测定 7 次(7 次测定均匀分布在样品表面，以减少相互之间的影响)，其中最后一次与前一次间隔 10 d(确保土样达到风干状态)。

横向穿透阻力和纵向穿透阻力数据的获取：以 2.5 cm(用 2~3 cm 穿透阻力的均值代表)处的横向和纵向穿透阻力数据为例研究横向和纵向穿透阻力的关系。纵向穿透阻力数据通过纵向取样的原状土直接测定获取。横向穿透阻力数据获取的基本操作为以横向取样获得的原状土表面中心为测试点(保证土壤深

度为 2.5 cm)测定土壤穿透阻力，取 2~3 cm 深度穿透阻力数据的平均值(保证上覆压力与实际情况相同)。

土壤理化性质的测定：机械组成采用 MS2000 型马尔文激光粒度仪测定(美国制)；土壤容重测定采用环刀法(直径 61.8 cm，高度 2 cm)；土壤有机质测定采用重铬酸钾容量法；藓结皮生物量测定采用水洗、烘干称重法；生物结皮厚度采用游标卡尺测量；烘干法测定土壤质量含水量。

1.3 数据处理

使用 Excel 2016 进行数据统计，计算平均值和标准误差。使用 SPSS Statistics 21 对供试样品的理化性质进行 *t* 检验，对藓结皮和无结皮土壤穿透阻力随深度的变化进行重复测量方差分析，对横向穿透阻力和纵向穿透阻力进行多变量方差分析。使用 OriginPro 2019 绘图，同时进行穿透阻力与土壤性质之间的数据拟合，其中含水量与穿透阻力的拟合数据为 7 种含水量下 0~2 cm 穿透阻力的均值，容重、有机质含量以及砂粒含量与穿透阻力的拟合数据为 0~2、2~4 和 4~6 cm 分层所测定的数据；在此基础上，进行穿透阻力与相关因素的线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 藓结皮对土壤穿透阻力的影响

藓结皮对土壤穿透阻力产生了显著影响,不同质量含水量(θ)下,穿透阻力随土壤深度的变化情况如图 1 和图 2 所示。对于风沙土,藓结皮显著增加了土壤表层 2~12 mm 的穿透阻力($P=0.028$);藓结皮影响下,12~30 mm 的穿透阻力也一定程度地提高,但未达到显著水平($P=0.618$)。当 $\theta \leq 51.8$ g/kg 时,藓结皮对穿透阻力的影响能达到 40 mm。对于黄绵土,藓结皮对表层土壤穿透阻力的影响深度波动较大,且随着含水量的变化呈现增加和降低两种效应。当 $\theta=253.9$ g/kg 时,藓结皮显著增加了土壤表层 3~24 mm 的穿透阻力($P=0.008$);当 $\theta=184.4$ g/kg 和 32.2 g/kg 时,藓结皮增加了土壤表层 3~12 mm 的穿透阻力($P>0.061$);而当 $\theta=253.9$ g/kg 时,藓结皮降低了 24 mm 以下土壤的穿透阻力,其中 24~36 mm 的穿透阻力显著降低($P=0.040$);在 $\theta \leq 184.4$ g/kg 时,藓结皮显

著降低了 12~40 mm 的穿透阻力($P<0.05$)。

穿透阻力随着土壤深度的增加而变化,整体来看,无结皮风沙土的穿透阻力随深度的增加呈线性增长;其穿透阻力的最大值出现在土壤最深处,不同含水量下,其穿透阻力最大值的变化范围为 0.27~4.75 MPa。无结皮黄绵土的穿透阻力随土壤深度的增加呈先缓后急持续增大,其穿透阻力的最大值出现在 30 mm 左右,不同含水量下,其穿透阻力最大值的变化范围为 0.77~21.58 MPa。藓结皮土壤穿透阻力随深度的变化可分为两段,结皮层呈现先增后减的变化趋势,而结皮下层随土壤深度的增加呈线性增长。由图 1 可见,结皮层与结皮下层界线清晰。藓结皮层的厚度为 10~15 mm,其最大穿透阻力出现在中部 5 mm 左右;不同含水量下,风沙土和黄绵土藓结皮层最大穿透阻力的变化范围为 0.38~3.74 MPa 和 0.43~8.01 MPa,分别为同等深度下无结皮风沙土和黄绵土的 2.14 倍~9.45 倍($P=0.001$)和 1.38 倍~6.27 倍($P=0.051$)。

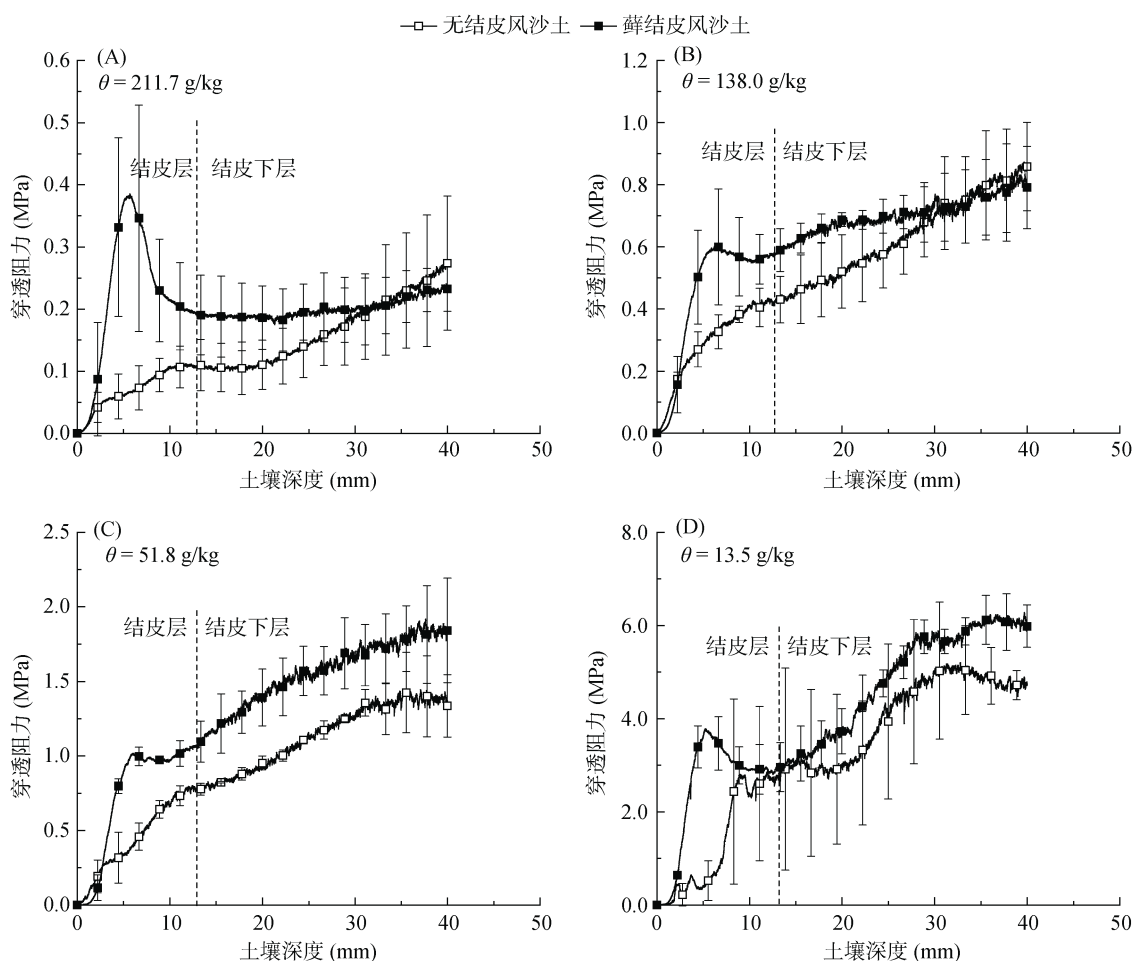


图 1 不同质量含水量(θ)下藓结皮和无结皮风沙土穿透阻力随土壤深度的变化

Fig. 1 Penetration resistances of aeolian soils with or without biocrust under different water contents (θ)

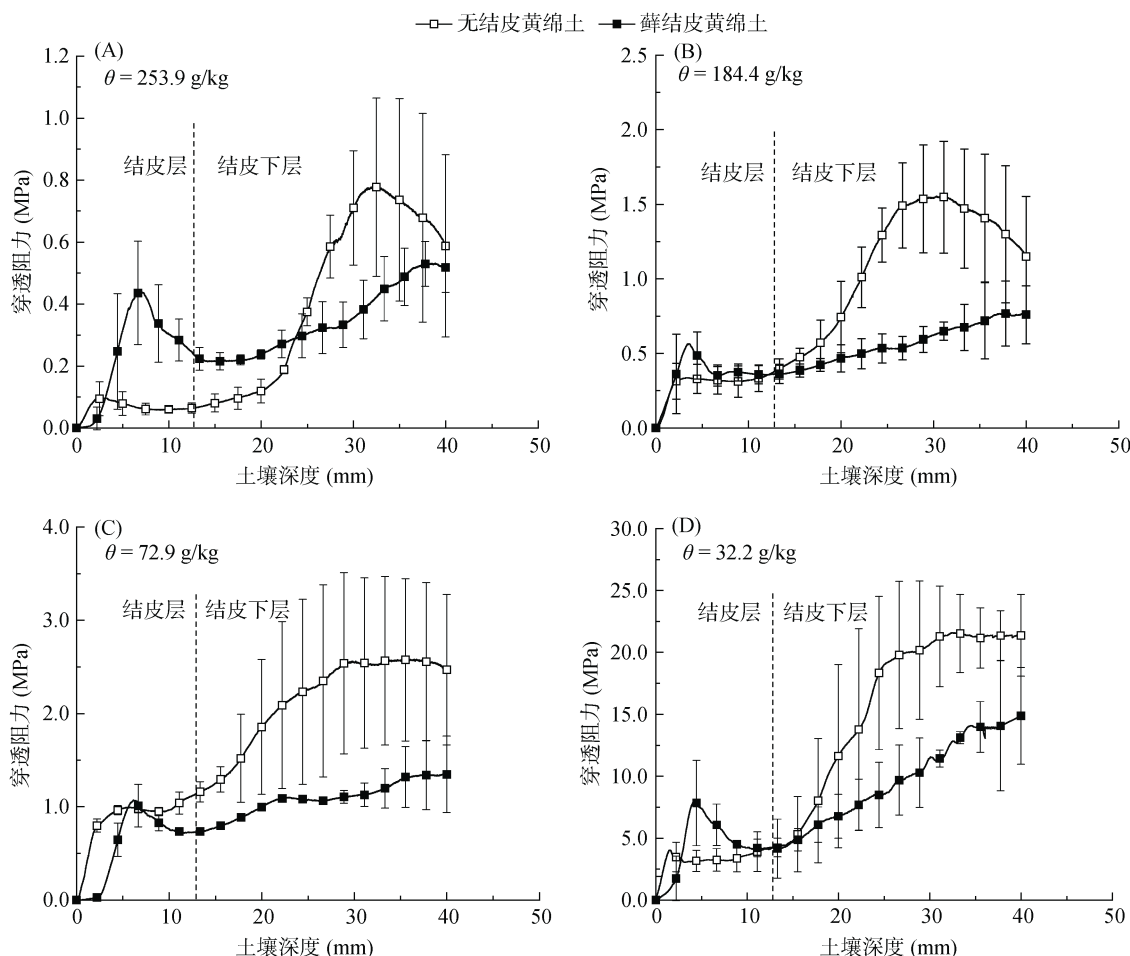


图2 不同质量含水量(θ)下藓结皮和无结皮黄绵土穿透阻力随土壤深度的变化
Fig. 2 Penetration resistances of loessal soils with or without biocrust under different water contents (θ)

穿透阻力随着含水量的变化而变化,高含水量下,土壤穿透阻力较小;随着含水量的降低,穿透阻力的增速变快。 $\theta=211.7$ g/kg 时,风沙土藓结皮层的最大穿透阻力仅为 0.38 MPa; $\theta=138.0$ g/kg 时,风沙土藓结皮层的最大穿透阻力较前者增加了 57.89%;而 $\theta=13.5$ g/kg 时,风沙土藓结皮层的最大穿透阻力是 $\theta=211.7$ g/kg 条件下的 9.95 倍。同时结果显示,穿透阻力受土壤类型影响显著。相同深度和含水量下,黄绵土的穿透阻力约为风沙土的 1.10 倍 ~ 4.50 倍(包括藓结皮和无结皮土壤)。

2.2 横向穿透阻力和纵向穿透阻力的比较

图3显示了4种土壤横向穿透阻力和纵向穿透阻力之间的关系。整体来看,横向穿透阻力和纵向穿透阻力的差异不显著($P=0.554$)。单就某一样地而言,差异较大;其中藓结皮土壤的横向穿透阻力和纵向穿透阻力差异显著($P \leq 0.003$),而无结皮土壤的横向穿透阻力和纵向穿透阻力差异不显著($P \geq 0.052$)。对于风沙土,无结皮土壤上有 57.14% 的数据显示纵向穿

透阻力和横向穿透阻力差异不显著($P=0.052$);而藓结皮土壤的数据显示纵向穿透阻力大于横向穿透阻力($P<0.001$)。对于黄绵土,无结皮土壤上有 85.71% 的数据显示纵向穿透阻力和横向穿透阻力差异不显著($P=0.684$);而藓结皮土壤的数据显示横向穿透阻力大于纵向穿透阻力($P=0.003$)。

2.3 穿透阻力与土壤性质的关系

土壤穿透阻力与质量含水量(θ)、容重、有机质含量以及砂粒含量的关系如图4和图5所示。可见,藓结皮、无结皮风沙土和黄绵土的穿透阻力均随含水量的增加而减小。当 $\theta>100$ g/kg 时,随着含水量的增大,土壤穿透阻力减小的趋势变缓,并趋于某一定值;当 $\theta<100$ g/kg 时,随着含水量的继续降低,土壤穿透阻力急剧增大。穿透阻力与土壤含水量之间呈极显著的幂函数关系($P<0.001$)。在含水量单因素影响下,土壤穿透阻力的大小表现为藓结皮黄绵土>无结皮黄绵土>藓结皮风沙土>无结皮风沙土。

风沙土和黄绵土(包括藓结皮和无结皮)穿透阻

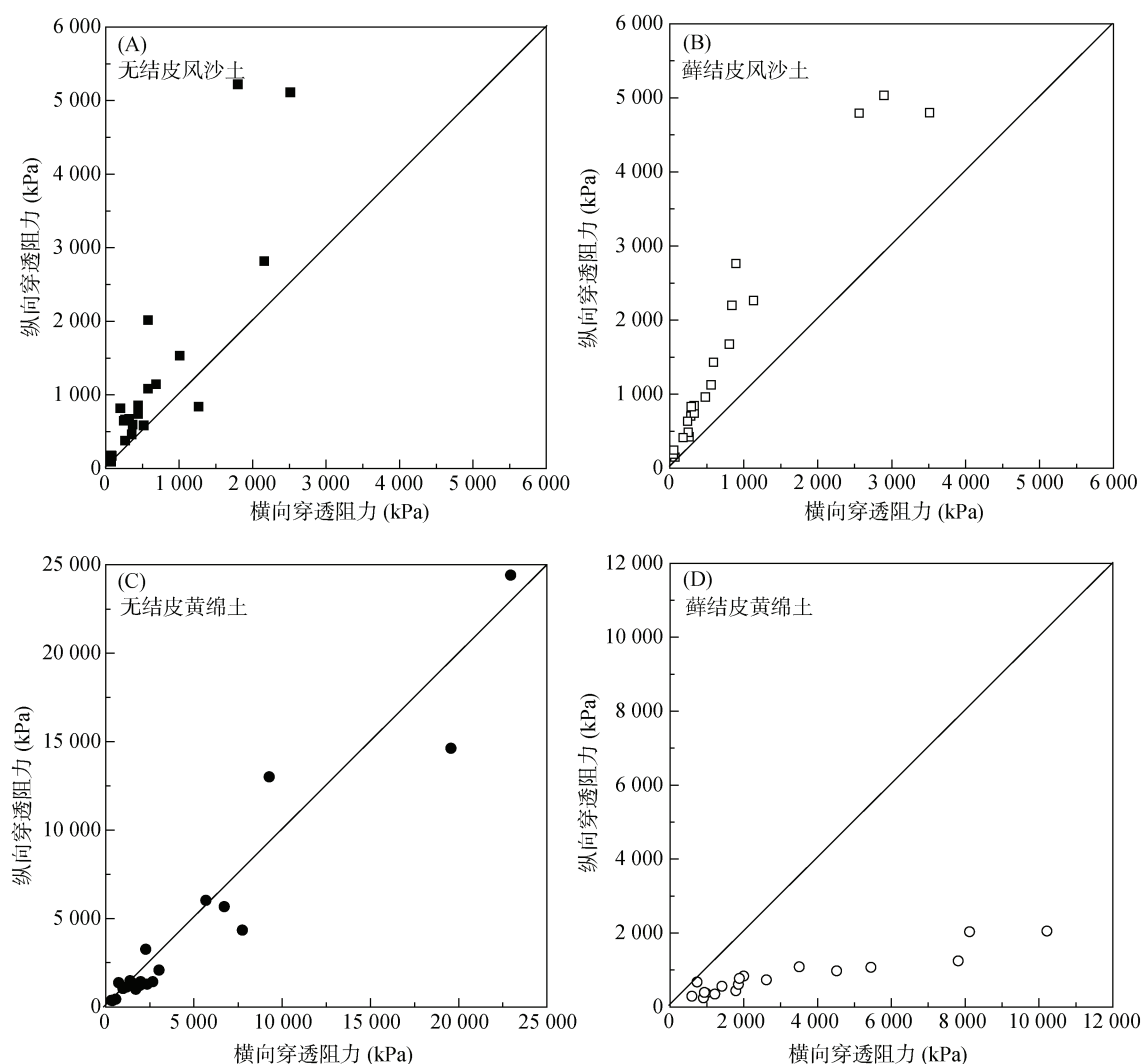


图 3 藓结皮与无结皮土壤横向和纵向穿透阻力的对比

Fig. 3 Vertical and horizontal penetration resistances of soils with or without biocrust

力与容重以及有机质含量之间的相关关系表现一致。随着容重的增加, 穿透阻力逐渐增大, 二者呈线性正相关关系, 但无结皮风沙土的穿透阻力与容重之间的线性正相关关系未达到显著水平($P=0.113$)。随着有机质含量的增加, 穿透阻力逐渐减小, 二者呈线性负相关关系, 但无结皮黄绵土穿透阻力与有机质含量之间的线性负相关关系未达到显著水平($P=0.161$)。无结皮土壤穿透阻力与容重以及有机质含量拟合曲线斜率的绝对值大于藓结皮土壤, 可见容重和有机质含量对无结皮土壤的影响更大。

在风沙土上, 随着砂粒含量的增加, 穿透阻力明显增大, 二者呈线性正相关关系($P \leq 0.004$); 而黄绵土上藓结皮和无结皮土壤的穿透阻力与砂粒含量之间均表现出了线性负相关关系($P \geq 0.106$)。

藓结皮土壤穿透阻力与含水量、容重和有机质含量以及砂粒含量的线性回归分析结果如表 2 所示, 藓

结皮风沙土和藓结皮黄绵土建立的回归方程的 R^2 、 SD 、 F 、 P 分别为 0.99、0.24、111.24、0.001 和 0.90、2.16、9.30、0.026, 回归分析效果较好。在各影响因素中, 含水量和砂粒含量的 P 值较小, 且回归系数的绝对值相对较大, 表明二者对穿透阻力的影响较大。

3 讨论

本研究表明, 藓结皮改变了表层土壤的穿透阻力, 其影响的程度和方向与土壤类型和含水量等因素紧密相关。整体来看, 藓结皮对表层土壤的穿透阻力具有一定的提升作用, 这与其他研究区的结果有一定的相似之处。例如, Kidron 等^[16]的研究表明, 随着生物结皮的发育, 其穿透阻力从 0.009 MPa 增加到 0.076 MPa; Drahorad 等^[18]的研究表明, 生物结皮显著增加了土壤的穿透阻力, 且在 0~3 cm 土层内, 相同深度生物结皮土壤的穿透阻力均大于无结皮土壤。

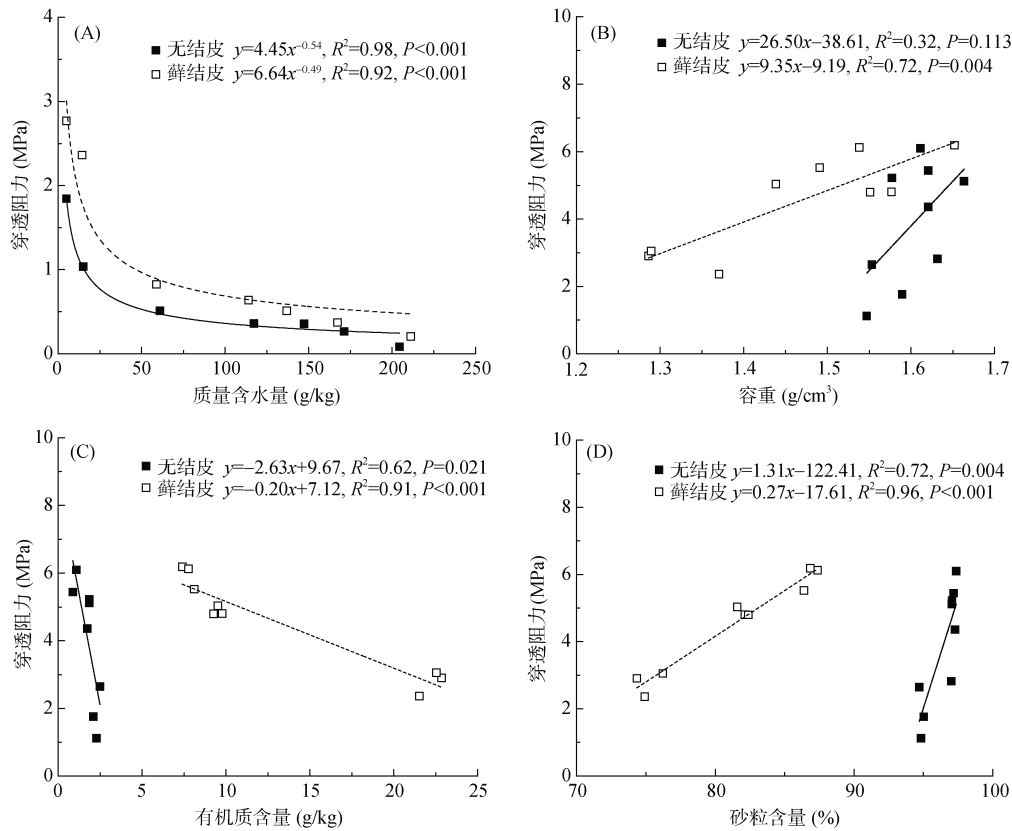


图4 藓结皮和无结皮风沙土穿透阻力与土壤性质的关系

Fig. 4 Relationship between aeolian soil properties and penetration resistances with or without biocrust

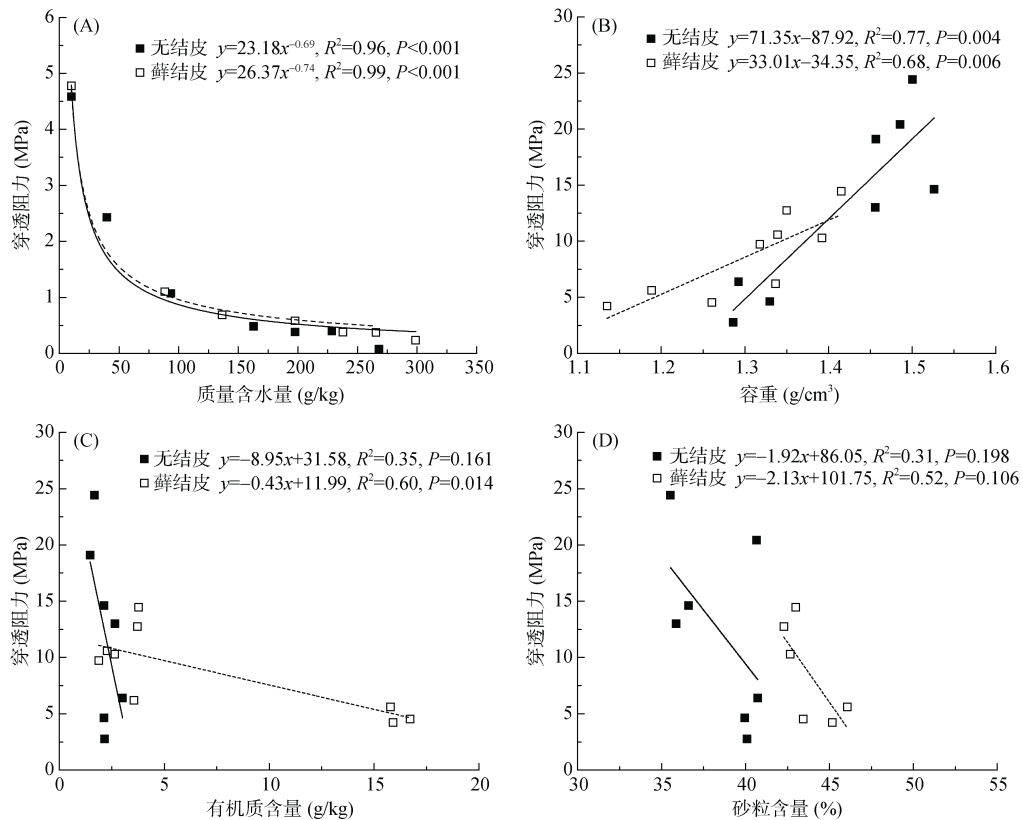


图5 藓结皮和无结皮黄绵土穿透阻力与土壤性质的关系

Fig. 5 Relationship between loessal soil properties and penetration resistances with or without biocrust

表 2 穿透阻力与土壤性质的线性回归分析
Table 2 Linear regression analysis of penetration resistance and soil properties

处理	影响因素	回归系数	标准误差	<i>t</i>	<i>P</i>
藓结皮风沙土	含水量	-0.341	0.061	-5.830	0.004
	容重	0.027	1.653	0.242	0.821
	有机质含量	-0.221	0.048	-1.241	0.282
	砂粒含量	0.527	0.055	3.452	0.026
藓结皮黄绵土	含水量	-0.32	0.239	-1.406	0.232
	容重	0.233	34.24	0.372	0.729
	有机质含量	-0.566	0.535	-0.786	0.476
	砂粒含量	-0.336	0.079	-1.212	0.292

尽管研究区不同,但这些研究均一致表明,生物结皮在一定程度上提高了土壤穿透阻力。藓结皮对土壤穿透阻力的提升作用主要受其致密结构的影响,其原因可能有以下几个方面:①藓结皮可通过生物体的黏质外壁、黏性分泌物、地下菌丝以及假根构建网状结构黏结土壤颗粒,进而固定土壤^[23-24]。②生物体代谢过程中产生的无机盐可加速黏性分泌物的产生,同时无机盐可直接起到稳定土壤的作用^[18]。③生物体对无机碳的主动吸收可导致胞外多糖类物质的钙化^[18]。同时,藓结皮处于结皮发育的高级阶段^[25],发育时间较长,这又为上述过程提供了保障。然而,生物结皮对土壤穿透阻力的影响程度和方向在各研究区有所不同,可能因为:①土壤类型不同,不同类型的土壤因质地、容重以及有机质含量等理化性质不同而影响穿透阻力。②生物结皮的种类不同,不同类型的生物结皮在厚度、容重以及植株密度等多个方面具有很大差异。同时,试验的方法和条件等因素也会对结果产生一定的影响。横向穿透阻力和纵向穿透阻力是两个不同方向的力,反映了根系在横向伸展和下插时的受力情况。本研究显示,藓结皮土壤的横向穿透阻力和纵向穿透阻力差异显著,但在无结皮土壤上差异不显著,这可能是受结皮和无结皮土壤不同性质的影响。Whalley 等^[26]的研究表明,相同含水量和深度下,不同性质的土壤会表现出不同的穿透阻力。同时,土壤层次之间的异质性也可能是导致这种结果的重要原因。

土壤穿透阻力受多种因素影响,这些因素共同对土壤穿透阻力产生影响,且他们之间也相互影响^[3]。土壤深度是影响穿透阻力的重要因素^[27],随着土壤深度的增加,无结皮风沙土和黄绵土的穿透阻力呈现线性增加的趋势,尤其是无结皮风沙土的线性增长规律十分显著。受生物结皮层致密结构的影响,结皮层会出现穿透阻力的突增;当到达结皮下层时,穿透阻

力又开始继续保持线性增长。这种线性增长可通过上覆压力以及土壤颗粒之间摩擦力的增加来解释^[18,26]。本研究显示,藓结皮在结皮层中部 5 mm 左右具有最大穿透阻力。Hu 等^[28]的研究表明,藻类结皮的中部蓝藻细菌密度最高,且可通过大量分泌胞外多糖等黏合剂形成网状结构固定土壤。同样,藓类生物结皮也可能具备同样的特点而在结皮层的中部形成更坚硬的层次。同时,有研究表明,结皮表层的碳酸钙等盐分可在雨水等淋溶作用下沉^[29],这也可能是导致结皮层中部穿透阻力较大的重要原因。土壤穿透阻力随含水量降低而增大已被广泛证实,本研究的结果与其一致^[5]。含水量降低,毛管水张力增加,土壤穿透阻力增大。本研究借鉴前人的研究成果,通过幂函数的形式拟合土壤穿透阻力与含水量的关系,效果非常显著。在含水量单因素影响下,土壤穿透阻力的大小表现为无结皮黄绵土>藓结皮黄绵土>藓结皮风沙土>无结皮风沙土,而含水量和土壤深度共同作用下,情况则发生改变。不同质地的土壤具有不同的穿透阻力。风沙土属砂土,土壤颗粒粗且流动性强,颗粒间黏结性弱;与之相比,黄绵土的结构性好,土壤颗粒较细,颗粒间黏结性更强,这可能是黄绵土的穿透阻力大于风沙土(包括结皮和无结皮)的主要原因。容重与土壤穿透阻力之间呈线性正相关关系,这与 Aggarwal 等^[30]的研究结果一致。对于同种质地的土壤,容重增加意味着单位体积内土壤颗粒的增加,有效孔隙的减少,土壤紧实度增加,即穿透阻力增加^[31]。有机质含量与土壤穿透阻力之间呈线性负相关关系,有机质可改变土壤颗粒接触面的属性来影响土壤的黏结性,同时有机质可通过改变土壤的持水性间接影响土壤穿透阻力^[32]。在风沙土上,穿透阻力与砂粒含量呈线性负相关关系,而在黄绵土上穿透阻力与砂粒含量之间表现线性正相关关系。砂粒含量与土壤穿透阻力之间的相关关系在两种土壤上表现不同是

多种因素间相互作用的结果, 颗粒组成差异可能是产生这种结果的重要原因。

研究表明, 由于探针与土壤颗粒之间存在摩擦力, 穿透阻力的数值约为根系实际所受阻力的 5.5 倍 ~ 8.5 倍^[3,27]。本研究采用自然风干的方式控制土壤含水量, 受环刀密封性的影响, 可能会导致中部含水量略大于两端, 但环刀的高度较低, 同时有水分扩散作用存在, 误差应处在可接受的范围; 本研究中, 4 种含水量下藓结皮和无结皮土壤的穿透阻力随深度的变化趋势基本相似, 同样可反映数据的可靠性。目前来看, 土壤穿透阻力模型的开发和应用是一个热点, 通过模型模拟可实现对土壤穿透阻力的预测, 对于宏观把握土壤穿透阻力的动态变化有重要意义^[26,33]。关于生物结皮对土壤穿透阻力的影响, 后期可借助相关模型模拟进行深入研究探讨。

4 结论

藓结皮的发育对两种土壤的穿透阻力均产生了显著影响, 但影响的程度不同, 且受土壤含水量影响。藓结皮对风沙土穿透阻力的影响深度为表层 2 ~ 12 mm($P=0.028$), 而对黄绵土的影响深度为 3 ~ 24 mm(随含水量变异较大)。风沙土和黄绵土藓结皮层最大穿透阻力的变化范围为 0.38 ~ 3.74 MPa 和 0.43 ~ 8.01 MPa, 为同等深度下无结皮风沙土和黄绵土的 2.14 倍 ~ 9.45 倍($P=0.001$)和 1.38 倍 ~ 6.27 倍($P=0.051$)。无结皮土壤穿透阻力随深度的增加呈线性增长; 藓结皮土壤穿透阻力随深度的增加可分为两段, 结皮层呈先增后减的趋势, 而结皮下层随深度的增加呈线性增长。整体来看, 横向穿透阻力和纵向穿透阻力的差异不显著($P=0.554$)。藓结皮和无结皮土壤的穿透阻力与含水量均呈显著的幂函数关系($P<0.001$), 而与容重、有机质含量以及砂粒含量均呈线性关系。

参考文献:

[1] 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.
[2] 刘晚苟, 山仑. 不同土壤水分条件下容重对玉米生长的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1906–1910.
[3] Bengough A G, Mullins C E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses[J]. Journal of Soil Science, 1990, 41(3): 341–358.
[4] 尚庆文, 孔祥波, 王玉霞, 等. 土壤紧实度对生姜植株衰老的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4): 782–786.

[5] 罗敏, 邓才富, 陈家宙, 等. 鄂南红壤穿透阻力的时空变化研究[J]. 土壤, 2016, 48(5): 1055–1061.
[6] Bengough A G, McKenzie B M, Hallett P D, et al. Root elongation, water stress, and mechanical impedance: a review of limiting stresses and beneficial root tip traits[J]. Journal of Experimental Botany, 2011, 62(1): 59–68.
[7] 赵占军, 韩长杰, 郭辉, 等. 土壤机械阻力测量方法研究现状及趋势[J]. 农业工程, 2014, 4(4): 10–13.
[8] 冯竞祥, 赵新, 马健军. 土壤机械阻力测定研究进展[J]. 农业工程, 2013, 3(2): 1–4.
[9] 罗敏, 邓才富, 陈家宙, 等. 红壤区夏玉米生长对土壤穿透阻力的响应[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(1): 56–60.
[10] 王丽丽, 周通, 李柱, 等. 土壤紧实度对伴矿景天生长及镉吸收性的影响研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 951–957.
[11] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望[J]. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11–24.
[12] Rodriguez-Caballero E, Belnap J, Büdel B, et al. Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change[J]. Nature Geoscience, 2018, 11(3): 185.
[13] 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.
[14] 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.
[15] Xiao B, Hu K L, Ren T S, et al. Moss-dominated biological soil crusts significantly influence soil moisture and temperature regimes in semiarid ecosystems[J]. Geoderma, 2016, 263: 35–46.
[16] Kidron G J, Vonshak A, Dor I, et al. Properties and spatial distribution of microbiotic crusts in the Negev Desert, Israel[J]. CATENA, 2010, 82(2): 92–101.
[17] Guo Y R, Zhao H L, Zuo X A, et al. Biological soil crust development and its topsoil properties in the process of dune stabilization, Inner Mongolia, China[J]. Environmental Geology, 2008, 54(3): 653–662.
[18] 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.
[19] 王蕊, 朱清科, 赵磊磊, 等. 黄土高原土壤生物结皮对植物种子出苗和生长的影响[J]. 干旱区研究, 2011, 28(5): 800–807.
[20] Chamizo S, Rodríguez-Caballero E, Cantón Y, et al. Penetration resistance of biological soil crusts and its dynamics after crust removal: Relationships with runoff and soil detachment[J]. CATENA, 2015, 126: 164–172.
[21] 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

- [22] 卜崇峰, 张朋, 叶菁, 等. 陕北水蚀风蚀交错区小流域苔藓结皮的空间特征及其影响因子[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 490–499.
- [23] 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.
- [24] 张元明. 荒漠地表生物土壤结皮的微结构及其早期发育特征[J]. 科学通报, 2005, 50(1): 42–47.
- [25] 卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J]. 土壤学报, 2009, 46(1): 16–23.
- [26] Whalley W R, To J, Kay B D, et al. Prediction of the penetrometer resistance of soils with models with few parameters[J]. Geoderma, 2007, 137(3/4): 370–377.
- [27] Gao W D, Whalley W R, Tian Z C, et al. A simple model to predict soil penetrometer resistance as a function of density, drying and depth in the field[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 190–198.
- [28] Hu C X, Zhang D L, Huang Z B, et al. The vertical microdistribution of cyanobacteria and green algae within desert crusts and the development of the algal crusts[J]. Plant and Soil, 2003, 257(1): 97–111.
- [29] Mager D M. Carbohydrates in cyanobacterial soil crusts as a source of carbon in the southwest Kalahari, Botswana[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(2): 313–318.
- [30] Aggarwal P, Choudhary K K, Singh A K, et al. Variation in soil strength and rooting characteristics of wheat in relation to soil management[J]. Geoderma, 2006, 136(1/2): 353–363.
- [31] 黄细喜. 土壤紧实度及层次对小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 1988, 25(1): 59–65.
- [32] Watts C W, Clark L J, Poulton P R, et al. The role of clay, organic carbon and long-term management on mouldboard plough draught measured on the Broadbalk wheat experiment at Rothamsted[J]. Soil Use and Management, 2006, 22(4): 334–341.
- [33] Felde, Vincent J M N L, Drahorad, Sylvie L, Felix-Henningsen, Peter, Hoon, Stephen R. 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.