

DOI: 10.5846/stxb202203100584

董智今, 张呈春, 展秀丽. 宁夏河东沙地生物土壤结皮对土壤性质及入渗过程的影响. 生态学报, 2022, 42(17): 7128-7136.

Dong Z J, Zhang C C, Zhan X L. Effects of biological soil crusts on soil properties and soil water infiltration process of sandy land in the east of Yellow River in Ningxia. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(17): 7128-7136.

宁夏河东沙地生物土壤结皮对土壤性质及入渗过程的影响

董智今, 张呈春, 展秀丽*

宁夏大学地理科学与规划学院, 银川 750021

摘要:为了揭示沙漠化治理过程中生物土壤结皮覆盖对土壤入渗过程的影响规律,以宁夏河东沙地人工沙漠治理区 4 种典型地表覆盖类型:裸沙(BS)、藻类结皮(AC)、藓类结皮(MC)、草本-藓类结皮(H-MC)为研究对象,基于野外双环入渗试验与室内模拟,分析了 3 种生物土壤结皮覆盖下土壤性质的变化与土壤入渗特征。结果表明:(1)与 BS 相比,3 种结皮覆盖下表层土壤砂粒含量减少 2.0%—5.1%,粉粒含量增加 3.6%—5.8%,有机质含量增加了 5—6 倍,AC 和 MC 覆盖下土壤总孔隙度与饱和含水量降低,而 H-MC 与之相反;(2)平均入渗速率表现为 BS>H-MC>AC>MC,1h 累计入渗量表现为 H-MC>BS>AC>MC,与 BS 相比,AC、MC 和 H-MC 的初渗速率依次减少了 14.3%、37.2%、11.8%,AC、MC 的稳渗速率分别降低了 14.4%和 18.3%,H-MC 的稳渗速率增加了 4.5%;(3)三种模型中,Kostiakov 模型最适用于模拟生物土壤结皮覆盖下土壤水分入渗过程。综上,研究区内不同发育程度生物土壤结皮改变了下层土壤的性质以及土壤的入渗特征,MC 与 AC 阻碍水分入渗,H-MC 促进水分入渗。

关键词:生物土壤结皮;土壤性质;土壤水分入渗;双环法;宁夏河东沙地

Effects of biological soil crusts on soil properties and soil water infiltration process of sandy land in the east of Yellow River in Ningxia

DONG Zhijin, ZHANG Chengchun, ZHAN Xiuli*

School of Geography and Planning, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: In order to reveal the influence of biological soil crusts on soil infiltration in desertification combating areas, biological soil crusts including algae crusts (AC), mosses crusts (MC) and herb-mosses crusts (H-MC) in the artificial desert control area in the east of Yellow River in Ningxia were chosen as the main subjects. Based on double ring experiments and indoor simulation experiments, the properties of soil covered by the crusts and the characteristics of its infiltration were explored separately. The results showed that: (1) compared with bare sand (BS), the sand content on the surface covered individually by 3 other types of crusts decreased by 2.0%—5.1%, the silt content increased by 3.6%—5.8%, and the organic matter content increased by 5 to 6 times. Total porosity and saturated moisture of soil covered by AC and MC declined, while that of H-MC had the opposite trend; (2) The average infiltration rate showed BS>H-MC>AC>MC, and the cumulative infiltration volume per hour showed H-MC>BS>AC>MC. Compared with BS, the initial infiltration rate of AC, MC and H-MC had a decrease of 14.3%, 37.2%, 11.8% separately, the decline in stable infiltration rate of AC and MC was 14.4% and 18.3%, and the stable infiltration rate of H-MC had a rise of 4.5%; (3) The Kostiakov model performed better than the Horton and Philip models in the simulation of biocrusts infiltration processes. In conclusion, the existence of biological soil crusts with different levels of development changed the properties and infiltration characteristics of

基金项目:国家自然科学基金项目(42161013);宁夏自然科学基金项目(2021AAC03048);宁夏大学研究生创新项目(GIP2020094)

收稿日期:2022-03-10; 采用日期:2022-07-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanxiuli@mail.bnu.edu.cn

the soil. MC and AC led to decrease in water infiltration, while H-MC gave rise to the opposite.

Key Words: biological soil crusts; soil properties; soil water infiltration; double ring; sandy land in the east of Yellow River in Ningxia

生物土壤结皮(BSCs)是细菌,真菌,地衣,藻类和苔藓等生物同表层土壤颗粒相互作用形成的复合体^[1-2],是干旱区地表主要的覆盖形式^[3-4],其存在改变了土壤理化性质^[5-7]、土壤生态^[8]及水文过程^[9],对荒漠生态系统的物质与能量流动产生重要影响。随着生物土壤结皮的发育与演替,其下伏土壤对降水的再分配和储存利用方式发生明显改变^[1,10-11],进而形成了有别于原有荒漠生态系统的独特的生态水文过程^[2-3,12]。研究沙区不同生物土壤结皮对土壤性质以及水分入渗的影响,对于干旱区生态系统修复与保护意义重大。

近年来,众多学者开展了关于生物土壤结皮对土壤影响的研究,主要包括了不同类型(发育程度)生物土壤结皮对土壤理化性质^[5-6,13-17]、水分入渗^[10-12,18-20]、水分动力学^[18,21-22]、水汽凝结与蒸发^[23]等的影响研究,以及冻融交替^[24]、降水冲刷^[25]、踩踏^[4,20]、植物根系^[21,26-27]等干扰对生物土壤结皮渗透性影响的研究,研究区重点集中在黄土高原^[8,18,21-23]、青藏高原^[28-29]、腾格里沙漠^[13-14,30-31]、毛乌素沙地^[11,15]等生态脆弱区,其中生物土壤结皮能够显著影响土壤性质已成为研究共识^[2,13-17],但有关生物土壤结皮对土壤入渗影响的研究结果仍不尽相同,例如由于受多种气候以及微环境等因素的影响,生物土壤结皮具有发育复杂、空间异质性等特点,使得其对土壤水分入渗产生促进^[27-28,31]、阻碍^[18,30]和无显著作用^[25]这三方面的影响,因此,量化描述不同区域生物土壤结皮对水分入渗的影响仍是目前研究的重点。本研究区固沙植被主要为灌木、生物土壤结皮与一年生草本植物,其中发育晚期的藓类结皮与草本植物混生代表着沙区植被-土壤系统处于良好的恢复和相对稳定的阶段,这增加了沙区土壤生态水文过程的多样性与复杂性,因此研究草本与生物土壤结皮混生对土壤水分入渗过程的影响具有重要意义。

宁夏河东沙地一直是国家和宁夏生态治理的重点区域,近年来,该地区防沙治沙工作取得了重大效果,地表覆被面积增加显著。但是目前有关该区域生态系统的深层研究较为薄弱,特别是沙漠化治理过程中生物土壤结皮的形成及覆盖对下伏土壤性质以及对土壤水分再分配的影响研究较少。本文选择由不同类型生物土壤结皮(藻类结皮、藓类结皮和草本-藓类结皮)覆盖下的风沙土以及流动沙丘作为对照,采用双环入渗试验和模型模拟,对3种生物土壤结皮和裸沙的土壤性质和入渗特征展开研究,以期为该区域建立合理稳定的固沙植被,实现沙区生态系统的修复与重建提供基础数据与理论借鉴。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

宁夏灵武市白芨滩(37°49'05"—38°20'54"N,106°20'22"—106°37'19"E)位于毛乌素沙地西南缘,面积748.43 km²。该保护区属于中温带干旱气候区,夏季炎热干燥,冬季寒冷,年均温10.4℃,年均降水量206.2—255.2 mm,年均蒸发量1933.3 mm。研究区地带性土壤以灰钙土为主,非地带性土壤主要为风沙土,土壤结构松散。植被以一年生草本植物、沙地植被和荒漠植被为主,代表性植物群落有柠条(*Caragana korshinskii*)、猫头刺(*Oxytropis aciphylla*)、花棒(*Hedysarum scoparium*)等。生物土壤结皮是该地区固定与半固定沙丘常见的土表微景观,研究区内生物土壤结皮在固定沙丘的迎风坡上优先发育,丘间低地广泛发育斑块状藓类结皮,坡顶与迎风坡灌丛植被间有连片发育的藻类结皮。研究区藻类与藓类结皮的优势种为具鞘微鞘藻(*Microcoleus vaginatus*)、真藓(*Bryum argenteum*)^[32]。

1.2 试验方案

2021年10月,在白芨滩自然保护区选择地势较平坦、生物土壤结皮覆盖度广(>90%)的区域作为试验观

测点,分别为无结皮覆盖的裸沙(BS)、发育早期藻类结皮覆盖土壤(AC)、发育晚期藓类结皮覆盖土壤(MC)以及藓类结皮与草本植物混生覆盖土壤(H-MC),每个试验点面积为 25 m²(5 m×5 m)。其中位于固定沙丘顶的 AC 样地中藻类结皮相对盖度>85%,结皮厚度为 2.95—3.47 cm,表面较光滑,颜色为浅灰色;位于丘间平地的 MC 样地中藓类结皮相对盖度>80%,结皮层厚度为 10.08—11.48 cm,表面较粗糙,颜色较深;H-MC 样地为柠条灌丛下高盖度(>85%)的藓类结皮,地表生长一年生杂草(覆盖度为 60%)。

土壤水分入渗采用双环入渗仪(QT-IN12-W,北京渠道科学仪器有限公司,中国)测定,双环入渗仪内环直径为 20 cm,外环直径为 35 cm,高度为 35 cm。在试验点内,针对 AC、MC 和 H-MC,分别选择藻类结皮、藓类结皮和草本-藓类结皮完全覆盖的区域(结皮覆盖面直径>35 cm)作为入渗试验样点,将双环放置在样点内垂直地面下埋 15 cm,并使用大孔隙单层纱布覆盖保护表层结皮。由于本研究区沙土初始入渗过快,仪器所配马氏瓶不能满足供水需求,因此使用 2 个 1000 ml 标准量筒分别向内环和外环同时均匀供水,当内外环中的水层高度同时达到 3 cm 时^[33],开始计时并读取内环相应时间内增加的水量。记录不同时段入渗水量:0—2 min 每隔 30 s 记录 1 次,2—12 min 每隔 1 min 记录 1 次,14—22 min 每隔 2 min 记录 1 次,27—67 min 每隔 5 min 记录 1 次,试验过程中内外环水面固定保持在 3 cm 高度以此来保持水头稳定^[33]。当至少 3 次相同测定时间内供水量恒定时可视为达到稳定^[22,33],停止试验,测定入渗时间不少于 65 min。

由于本研究区沙土入渗过快,野外试验中初始入渗量存在误差,参考前人研究^[10-11,21-22],本文将入渗前 3 min 的入渗速率定义为初始入渗速率;将单位时间内的入渗量趋于稳定时的入渗速率定义为稳定入渗速率;将达到稳渗时的累积入渗量与达到稳渗所用时间的比值定义为平均入渗速率;将 60 min 内的累积入渗总量定义为累积入渗量^[22],入渗速率计算公式如下:

$$V_n = \frac{L_n \times 10}{S \times \Delta n (0.7 + 0.03T)} \quad (1)$$

式中: V_n 为一定温度下 n 时刻的土壤入渗速率(mm/min); L_n 为 n 时刻的内环供水量(cm³); S 为内环面积(cm²); 10 为 cm 与 mm 的转换系数; Δn 为观测间隔时间差(min); T 为时段内的平均水温(10 ℃)。

1.3 样品采集

采用烘干法测定土壤含水量^[23],入渗试验前在每个样地用铝盒分别采集 0—1 cm、1—10 和 10—20 cm 深处土壤样品,每个深度重复取三次,共取铝盒样品 36 个;采用环刀法测定土壤容重^[10],入渗试验前在每个样地分别取表层,10 cm 和 20 cm 处取环刀样品,每个深度重复取三次,共取环刀样品 24 个;采用游标卡尺测量生物土壤结皮厚度(取 3—5 次重复)^[21]。

入渗试验前在样地内选取 3—5 个采样点进行分层采样,分层为生物土壤结皮层(0—1 cm)和结皮覆盖下土壤(1—10 和 10—20 cm),同层样品进行混合并装袋后带回室内备用。

1.4 实验室分析

土壤饱和含水量与土壤孔隙度在室内测定^[34];采用重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量^[16];马尔文激光粒度仪(Mastersizer 3000, Malvern Instruments Ltd., UK)测定土壤机械组成。

1.5 土壤水分入渗模型

模型模拟公式选取 Philip、Kostiakov 和 Horton 3 种常用的入渗模型^[35],对入渗过程模拟并评价其适用性。

Philip 模型:

$$f(t) = 0.5s/t^{1/2} + A \quad (2)$$

Kostiakov 模型:

$$f(t) = b/t^a \quad (3)$$

Horton 模型:

$$f(t) = f_c + (f_0 + f_c) / e^{kt} \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率(mm/min); f_0 为初渗速率(mm/min); A 和 f_c 为稳渗速率(mm/min); t 为入渗时间

(min); s 为吸湿率($\text{mm}/\text{min}^{1/2}$), 表征土壤入渗能力; a, b 为常数, 分别表征第一个单位时间段内的平均入渗速率与入渗速率随时间减小的程度; k 为参数, 表征入渗速率随时间减少的程度。

1.6 数据处理

使用 Microsoft Excel 2019 对数据进行处理与分析, IBM SPSS 24.0 进行单因素方差分析 (one-way ANOVA)、Pearson 相关分析 ($\alpha=0.05$) 和逐步回归分析 ($\alpha=0.1$), 通过 Origin 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 不同生物土壤结皮对土壤性质的影响

从表 1 可知, 研究区 0—20 cm 藻类、藓类、草本-藓类 3 种类型生物土壤结皮覆盖下土壤以及裸沙的机械组成均以砂粒为主 (>90%)、粉粒含量较少 (<9%)、黏粒含量极少或无 (<0.02%)。生物土壤结皮覆盖的表层土壤与裸沙相比, 粉粒含量增多 (3.6%—5.8%); 极细砂粒含量增多 (0.4%—1.7%); 细砂含量减少 (7.8%—33.7%) 且藓类结皮的细砂粒含量显著减少; 中砂含量增多 (2.6%—20.9%); 粗砂含量增多 (1.2%—8.1%) 且草本-藓类结皮的粗砂含量显著增加。生物土壤结皮的存在, 使得土壤粒径分布更加均匀: 粉粒、极细砂、中砂和粗砂含量均有所增加, 细砂含量减少。

表 1 不同发育程度生物土壤结皮覆盖下土壤的颗粒组成

Table 1 Soil particle composition of the biocrusts in different developmental degrees

类型 Type	土层深度 Soil depth/cm	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	极细砂 Very fine sand/%	细砂 Fine sand/%	中砂 Middle sand/%	粗砂 Coarse sand/%
裸沙 (BS)	0—1	0.00	1.32±0.22a	12.58±0.38a	74.61±0.17a	9.42±0.61b	2.02±0.14c
Bare sand	1—10	0.00	1.02±0.24a	13.13±0.39b	70.35±0.26b	14.39±0.26a	1.12±0.19b
	10—20	0.00	0.51±0.30a	11.18±0.45b	76.97±0.85b	11.09±0.31a	0.25±0.03b
藻类结皮 (AC)	0—1	0.02±0.01a	4.90±0.59b	13.02±0.95a	66.82±0.36b	11.99±0.41b	3.25±0.23b
Algae crusts	1—10	0.00	2.74±0.32ab	15.36±0.61a	68.90±0.42b	12.95±0.31a	0.04±0.04b
	10—20	0.00	0.95±0.44bc	16.87±0.35a	79.96±0.61a	2.20±0.16b	0.02±0.03c
藓类结皮 (MC)	0—1	0.02±0.02a	5.28±0.47c	13.67±0.43a	40.89±0.16d	30.32±0.65a	9.82±0.15a
Mosses crusts	1—10	0.00	1.79±0.41b	14.47±0.68ab	76.34±0.36a	6.38±0.23b	1.02±0.03b
	10—20	0.00	0.56±0.21c	9.14±0.23c	80.95±0.62c	8.28±0.41a	1.08±0.23a
草本-藓类结皮 (H-MC)	0—1	0.01±0.01a	7.12±0.39d	14.28±0.30a	53.39±0.26c	15.08±0.27b	10.12±0.18a
Herb-mosses crusts	1—10	0.00	2.80±0.18c	10.35±0.21c	62.01±0.65c	10.54±0.35ab	14.30±0.23a
	10—20	0.00	1.48±0.32b	11.34±0.14b	78.49±0.43a	7.66±0.23a	1.03±0.07a

同列不同小写字母表示同一土层不同类型处理间存在显著差异 ($P<0.05$); 数据为平均值±标准差

如表 2 所示, 随着生物土壤结皮的发育, 结皮厚度显著增加。与裸沙相比, 藻类与藓类结皮覆盖下土壤容重变化不显著, 藓类结皮初始含水量增加了 2.4 倍, 藻类结皮初始含水量变化不显著, 土壤总孔隙度分别减少了 4.0% 和 6.5%, 饱和含水量分别减少了 6.8% 和 11.1%, 土壤有机质含量是裸沙的 5—6 倍。草本-藓类结皮覆盖下土壤与裸沙相比有机质增加了 6 倍, 总孔隙度增加了 9.1%, 饱和含水量增加了 12.6%, 初始含水量变化不显著。

2.2 不同生物土壤结皮覆盖下土壤入渗特征

由图 1 可知, 不同生物土壤结皮覆盖下土壤水分入渗速率均呈现出先降低再波动最终趋于稳定。4 种样地入渗速率之间差异显著 ($P=0.036<0.05$), 累计入渗量表现为 H-MC>BS>AC>MC, 表明发育程度更高的藓类结皮能够显著降低土壤入渗特性, 而草本与藓类结皮混生的复合表层, 由于植物根系的存在入渗速率与累计入渗量显著增加。

表 2 不同发育程度生物土壤结皮覆盖下的土壤性质

Table 2 Soil properties of the biocrusts in different developmental degrees

类型 Type	土层深度 Soil depth/cm	结皮厚度 Thickness of crusts/mm	初始含水量 Water content/%	土壤有机质 Organic matter content/ (g/kg)	土壤容重 Bulk density/ (g/cm ³)	总孔隙度 Total porosity/%	饱和含水量 Saturated moisture/%
裸沙 (BS)	0—1	—	0.22±0.01b	0.75±0.01d	1.52±0.01b	42.6±0.03b	28.0±0.13b
	1—10	—	0.47±0.13b	0.51±0.01b	1.65±0.01a	37.6±0.03b	22.8±0.08b
	10—20	—	1.89±0.02b	0.64±0.03d	1.65±0.01b	37.7±0.03c	22.9±0.01c
藻类结皮 (AC)	0—1	3.21±0.26c	0.23±0.02b	7.64±0.12c	1.57±0.04b	40.9±0.04c	26.1±0.07c
	1—10	—	0.56±0.11b	1.29±0.03a	1.69±0.04a	36.3±0.17c	21.5±0.05c
	10—20	—	3.16±0.14a	1.38±0.04c	1.61±0.01c	39.3±0.21b	24.4±0.19b
藓类结皮 (MC)	0—1	10.48±0.70a	0.53±0.01a	7.78±0.11b	1.60±0.01a	39.8±0.04d	24.9±0.12d
	1—10	—	1.09±0.06a	1.65±0.06a	1.68±0.01a	36.7±0.03c	21.8±0.06c
	10—20	—	3.29±0.24a	1.75±0.02a	1.70±0.02a	35.8±0.23d	21.0±0.10d
草本-藓类结皮 (H-MC)	0—1	6.32±0.18b	0.32±0.03b	8.49±0.21a	1.51±0.01b	42.9±0.06a	28.4±0.09a
	1—10	—	0.97±0.04b	1.57±0.04a	1.62±0.01a	40.9±0.03a	24.0±0.15a
	10—20	—	3.23±0.31a	1.51±0.05b	1.46±0.01d	44.8±0.07a	30.6±0.03a

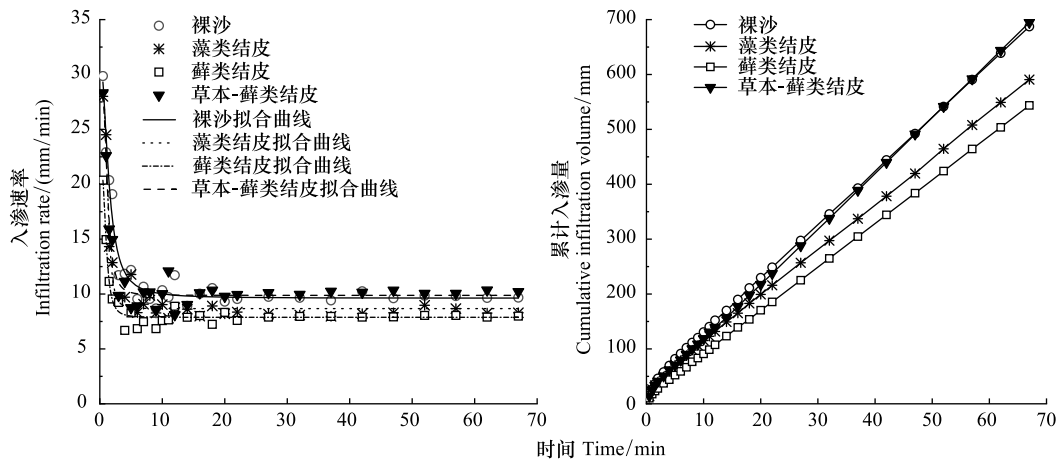


图 1 不同发育程度生物土壤结皮覆盖下土壤的水分入渗过程与累计入渗量

Fig.1 Infiltration rate /cumulative infiltration volume of the biocrusts in different developmental degrees

由图 1 可知,土壤入渗可分为初期瞬减、中期波动和后期稳定三个阶段。如表 3 所示,第一阶段,裸沙初渗速率显著高于有结皮覆盖的土壤 ($P<0.05$),表明藻类、藓类和草本-藓类结皮的存在明显降低了初渗速率,降低幅度依次为 14.3%、37.2%、11.8%;第二阶段入渗速率变化剧烈(图 1),裸沙的入渗速率仍然显著高于发育程度较高的藓类结皮;第三阶段,由于此时土壤孔隙被水分充满达到饱和进入稳渗阶段,与裸沙相比,藻类和藓类结皮覆盖下土壤达到稳定入渗的时间更长,表明藻类和藓类结皮能明显降低土壤稳渗速率,降低幅度分别为 14.4%和 18.3%,草本-藓类结皮覆盖下土壤入渗达稳定的时间则变短,稳渗速率较裸沙增加了 4.5%。表明生物土壤结皮的发育程度越高,阻止土壤水分的入渗能力越强,而草本-藓类结皮复合体则会促进土壤水分入渗。

2.3 影响土壤入渗性能的因素

如表 4 所示,土壤入渗性能与土壤理化性质的相关性表现为:初渗速率与结皮厚度和初始含水量呈显著负相关,与其余因素相关性不显著;稳渗速率、累计入渗量均与土壤容重呈现极显著负相关,与土壤总孔隙度以及饱和含水量呈极显著正相关,与结皮层厚度、土壤机械组成和有机质相关性不显著;平均入渗速率与土壤

容重呈显著负相关,与总孔隙度与饱和含水量呈显著正相关,与其他因素相关性不显著。

表 3 不同发育程度生物土壤结皮覆盖下土壤的水分入渗参数

Table 3 Infiltration parameters of the biocrusts in different developmental degrees

类型 Type	初渗速率 Initial infiltration rate/(mm/min)	稳渗速率 Stable infiltration rate/(mm/min)	达到稳渗时间 Time to stable infiltration rate/min	1h 累积入渗量 Cumulative infiltration volume per hour/mm	平均入渗速率 Average infiltration rate/(mm/min)
裸沙 (BS)	20.79±2.93a	9.74±0.10b	18—20	638.85b	11.48a
藻类结皮 (AC)	17.82±3.58c	8.34±0.13c	20—22	549.21c	9.82c
藓类结皮 (MC)	13.05±2.10d	7.96±0.03d	20—22	503.73d	8.44d
草本-藓类结皮 (H-MC)	18.34±3.22b	10.18±0.05a	16—18	643.78a	10.99b

表 4 土壤入渗性能与影响因素的相关性

Table 4 Correlation coefficients between soil infiltration properties and influencing factors

	结皮厚度 Thickness of crusts	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	初始含水量 Water content	土壤容重 Bulk density	土壤有机质 Organic matter content	总孔隙度 Total porosity	饱和含水量 Saturated moisture
初渗速率 Initial infiltration rate	-0.928 *	0.190	-0.158	-0.798	-0.925 *	-0.846	-0.641	0.857	0.848
稳渗速率 Stable infiltration rate	-0.463	0.188	-0.240	-0.811	-0.506	-0.987 **	-0.336	0.983 **	0.986 **
累计入渗量 Cumulative infiltration amount	-0.620	0.216	-0.247	-0.858	-0.646	-0.998 **	-0.452	0.998 **	0.997 **
平均入渗速率 Average infiltration rate	-0.788	0.239	-0.241	-0.875	-0.792	-0.961 *	-0.576	0.966 *	0.961 *

* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$

在此基础上分别对初渗速率与稳渗速率进行逐步回归分析可得出:

$$I_i = -2.066 \text{ TOC} + 14.197 \text{ SM} + 12.676 \text{ BD} + 17.500 \quad (R^2 = 0.999) \quad (5)$$

$$S_i = -1.202 \text{ BD} + 0.225 \text{ WC} + 0.00125 \text{ C} + 9.055 \quad (R^2 = 0.999) \quad (6)$$

式中: I_i 为初渗速率 (mm/min); S_i 为稳渗速率 (mm/min); TOC 为结皮厚度 (mm); SM 为饱和含水量 (%); BD 为土壤容重 (g/cm^3); WC 为初始含水量 (%); C 为黏粒含量 (%).

由方程 (5) 可知,初渗速率主要受结皮厚度、饱和含水量和土壤容重影响,结皮层越厚、饱和含水量越低与土壤容重越大均会阻碍土壤的初始入渗能力;由方程 (6) 可知,稳渗速率主要受土壤容重、初始含水量和黏粒含量影响,土壤容重越大、初始含水量越低、黏粒含量越少则会降低土壤的稳定入渗能力。

2.4 不同生物土壤结皮覆盖下土壤入渗过程模拟

由表 5 可以看出,不同模型对于土壤水分入渗过程的拟合效果不同。Philip 模型拟合结果显示,拟合 A (稳渗速率) 值为 4.86—6.65 mm/min 与实际的 7.96—10.18 mm/min 相差较大, R^2 均小于 0.89, 说明 Philip 模型拟合效果较差。Horton 模型拟合结果显示, f_c (稳渗速率) 值与实测值相差很小 (0.05—0.315 mm/min), k 值在 0.79—1.54 之间, 最大值出现在裸沙, 最小值在藓类结皮, 反映了入渗速率递减情况, 与实测结果基本相符, R^2 均大于 0.94, 模型拟合效果较好。Kostiakov 模型拟合结果显示, 参数 b 值在 7.74—11.72 mm/min 之间, b 值越大, 入渗曲线的斜率越大, 瞬时入渗率衰减越快, 拟合出衰减快慢顺序为: BS > H-MC > AC > MC, 与实测结果一致, R^2 均大于 0.96, 此模型拟合效果较好。

3 讨论

3.1 生物土壤结皮覆盖对土壤性质的影响

生物土壤结皮通过改变地表微形态使其下伏土壤的性质发生变化^[5]。首先, 不同发育程度的生物土壤

结皮对下伏土壤机械组成影响不同。本研究发现,与藻类结皮相比,藓类结皮表层土壤砂粒含量降低,粉粒含量增加,土壤结构细化,颗粒物分布更均匀,这是因为在藓类结皮以及草本-藓类结皮混生覆盖下,藓类与草本使得土壤表面粗糙度加大,对于细颗粒物的拦截作用明显提高,这与高广磊等^[15]在宁夏盐池县以及孙福海等^[18]在黄土高原的研究结果一致。

表 5 不同发育程度生物土壤结皮覆盖下土壤入渗过程的模型模拟结果

Table 5 Fitting results of soil water infiltration process of the biocrusts in different developmental degrees using different infiltration models

类型 Type	Philip 模型 Philip model			Horton 模型 Horton model				Kostiakov 模型 Kostiakov model		
	$A/$ (mm/min)	$s/$ (mm/min ^{1/2})	R^2	$f_c/$ (mm/min)	$f_0/$ (mm/min)	k	R^2	b	a	R^2
裸沙 (BS)	6.11±0.50	15.72±1.06	0.89	9.80±0.19	37.08±1.58	1.54±0.13	0.97	11.72±0.70	0.05±0.02	0.99
藻类结皮 (AC)	4.86±0.59	14.70±1.23	0.84	8.56±0.24	41.66±2.92	1.04±0.11	0.95	10.57±0.67	0.07±0.02	0.99
藓类结皮 (MC)	5.80±0.43	8.07±0.91	0.74	7.88±0.14	31.60±2.47	0.79±0.09	0.94	7.74±2.38	0.04±0.11	0.96
草本-藓类结皮 (H-MC)	6.65±0.63	12.91±1.32	0.78	9.87±0.19	41.13±2.50	1.00±0.09	0.97	10.80±0.72	0.03±0.02	0.99

A 和 f_c 为稳渗速率 (mm/min); f_0 为初渗速率 (mm/min); s 为吸湿率 (mm/min^{1/2}); a , b 为常数; k 为参数; 数据为平均值±标准差

其次,不同发育程度的生物土壤结皮对下伏土壤总孔隙度和土壤含水量影响不同。本研究发现草本-藓类结皮覆盖下土壤总孔隙度较高,说明草本植物根系对结皮下伏土壤的影响显著。藓类结皮覆盖下土壤表层含水量最高,这是因为在本研究区藓类结皮广泛分布于丘间低地,灰黑色藻类结皮分布于固定沙丘坡面-丘顶,蒸发较强,而草本-藓类结皮则是由于生长季植物需水,使得下伏土壤表层含水量与裸沙相比差异较小。

最后,不同发育程度的生物土壤结皮对下伏土壤有机质影响不同。本研究发现藻类和藓类结皮的覆盖使得表层土壤的有机质含量增加,一方面归因于生物土壤结皮的覆盖使表层土壤结构优化,利于土壤团聚体形成,增加有机质含量^[5];另一方面则由于生物土壤结皮可以为微生物的生长提供环境,进而提升下伏土壤的有机质含量^[13]。

此外,生物土壤结皮对土壤性质的影响还具有“表层性”^[36],即生物土壤结皮和下伏土壤的双层结构,使得结皮对土壤性质的影响主要集中在表层^[17,21],这在本研究中也得到了证实。

3.2 生物土壤结皮覆盖对土壤水分入渗的影响

本研究发现藻类和藓类结皮明显阻碍了土壤水分入渗过程,且生物土壤结皮发育程度越高,土壤渗透性能越低。这是因为,第一,生物土壤结皮截留的细粒物质填充土壤孔隙,降低了孔隙间的连通性^[37-38];第二,本研究区内高盖度藻类和藓类结皮中的藻丝体、真菌菌丝、藓类假根与砂粒缠绕胶结增加了结皮层厚度^[22],结皮层吸水性增强进而阻碍水分的入渗^[21],这与 Xiao 等^[37]研究结论一致,并且与裸沙相比,藓类结皮覆盖下表层土壤初始含水量明显增加,降低了沙土的土壤水力梯度,进而减缓了初渗速率^[19];第三,生物土壤结皮覆盖增加了表层土壤有机质,且藓类植物体分泌的胞外多糖等化学物质堵塞土壤孔隙进而降低入渗速率^[11]。最后,本研究中藓类较藻类结皮表现出更高的阻渗能力,这与 Zhang 等^[14]研究结果不同,因为本研究选取地势平坦区域作为观测试验点,无地形因素对结皮层的影响,而且本研究发现藓类结皮能够完全覆盖表土层孔隙,藓类植物的毛尖、茎叶微结构使得土壤更封闭疏水性更强,这对入渗的阻碍作用更显著^[26]。

本研究中还发现草本-藓类结皮复合体能够有效的促进土壤水分入渗,这是因为,草本植物为发育在柠条灌丛下一年生的杂草,受到杂草和柠条根系的影响,表层结皮层被破坏,水分运移方式被改变^[39],同时,植物根系在土壤中交错生长分布,形成土壤大孔隙,提高了土壤的渗透性能^[40]。李渊博等^[21]在黄土高原的研究也表明草本植物和藓类结皮混生覆盖下会对水分入渗有一定的促进作用,与本研究结果一致。

3.3 土壤入渗性能差异的因素分析

本研究发现,不同发育程度的生物土壤结皮入渗性能的差异与土壤性质密切相关,并且在不同的入渗阶段,土壤性质对其影响也各不相同。在入渗的初始阶段,结皮层越厚,其吸水性越强,入渗速率也越低,而且初

始阶段土壤初始含水量越多,水力梯度越小入渗速率也越低^[19]。在本研究中藓类结皮的覆盖,明显提升了结皮层厚度与土壤初始含水量,从而减小初渗速率,这与王闪闪等^[41]研究结果一致。达到稳渗阶段时,入渗速率与土壤容重、总孔隙度与饱和含水量呈现极显著相关性,在该阶段,生物土壤结皮对入渗的影响减弱,而下伏风沙土的性质以及植物根系产生的裂隙则成为影响入渗的主要因素^[39,42]。

本研究进行逐步回归分析后发现,结皮层厚度是影响初渗速率最重要因素,而土壤容重则是影响稳渗速率最重要因素,这进一步说明,入渗时间越长,生物土壤结皮对入渗的影响越小,而土壤性质以及植物生长产生的土壤裂隙对入渗的影响越大。

3.4 入渗模型适用性评价

本研究中采用了三种经典的入渗模型来模拟生物土壤结皮覆盖下水分入渗规律,结果发现,Kostiakov 模型对不同样地入渗过程的模拟效果最好($R^2 > 0.96$),拟合出入渗速率的快慢为:BS>H-MC>AC>MC,与实测结果一致。而 Philip 模型是物理模型,与有结皮覆盖的土壤相比,裸沙的水分入渗过程拟合效果更好($R^2 = 0.89$),说明该模型不适用于模拟生物土壤结皮覆盖下的非均质土壤,更适用于均质土壤的一维入渗^[10]。Horton 模型属于纯经验公式^[15],对 4 种样地类型拟合效果均较好($R^2 > 0.94$),对初始入渗速率值拟合精度高,但是对稳定入渗速率的拟合精度不够。

综上所述,研究区内生物土壤结皮覆盖改变了下伏土壤的性质,进而影响了土壤水分入渗过程。在对该区域生物土壤结皮的研究中,未来还需要深入探讨固沙植物根系对水分入渗过程的影响,进一步开展生物土壤结皮对该区域土壤水文过程的研究。

4 结论

(1)生物土壤结皮对浅层土壤性质影响明显。相较裸沙,生物土壤结皮覆盖下的土壤砂粒含量减少,粉粒含量增加,土壤有机质含量增加;藓类结皮土壤初始含水量最高;藻类和藓类结皮覆盖下土壤总孔隙度与饱和含水量降低,草本-藓类结皮其下伏土壤总孔隙度与饱和含水量增加。

(2)生物土壤结皮改变下伏土壤性质进而对风沙土的入渗性能够产生显著影响。生物土壤结皮发育程度越高,阻止土壤水分的入渗能力越强,而草本-藓类结皮复合体则促进土壤水分入渗;在入渗初期,结皮层厚度、土壤初始含水量是影响入渗的主要因素,而在稳渗阶段,土壤容重则是影响入渗特征的主要因素,且植物根系的存在减小了生物土壤结皮的阻渗作用。

(3)Kostiakov 模型最适用于模拟本研究区不同发育程度生物土壤结皮覆盖下土壤水分入渗过程,Horton 模型次之,Philip 模型较差。

参考文献 (References):

- [1] 魏江春. 沙漠生物地毯工程——干旱沙漠治理的新途径. 干旱区研究, 2005, 22(3): 287-288.
- [2] 李新荣, 张元明, 赵允格. 生物土壤结皮研究: 进展、前沿与展望. 地球科学进展, 2009, 24(1): 11-24.
- [3] 李小雁. 干旱地区土壤-植被-水文耦合、响应与适应机制. 中国科学: 地球科学, 2011, 41(12): 1721-1730.
- [4] 石亚芳, 赵允格, 李晨辉, 王闪闪, 杨巧云, 谢申琦. 踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响. 应用生态学报, 2017, 28(10): 3227-3234.
- [5] 杨巧云, 赵允格, 包天莉, 丁倩, 刘广亮. 黄土丘陵区不同类型生物结皮下的土壤生态化学计量特征. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2699-2706.
- [6] 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. 生态学报, 2007, 27(11): 4662-4670.
- [7] Zhang Y M. The microstructure and formation of biological soil crusts in their early developmental stage. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(2): 117-121.
- [8] 王芳芳, 肖波, 孙福海, 李胜龙. 黄土高原生物结皮覆盖对风沙土和黄绵土溶质运移的影响. 应用生态学报, 2020, 31(10): 3404-3412.
- [9] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述. 科学通报, 2001, 46(22): 1851-1857.
- [10] 刘翔, 周宏飞, 刘昊, 朱海. 不同类型生物土壤结皮覆盖下风沙土的入渗特征及模拟. 生态学报, 2016, 36(18): 5820-5826.
- [11] 吴永胜, 尹瑞平, 何京丽, 田秀民, 刘静, 李泽坤. 毛乌素沙地南缘沙区水分入渗特征及其影响因素. 干旱区研究, 2016, 33(6): 1318-1324.

- [12] 李新荣, 张志山, 王新平, 刘立超, 黄磊. 干旱区土壤-植被系统恢复的生态水文学研究进展. 中国沙漠, 2009, 29(5): 845-852.
- [13] 何芳兰, 郭春秀, 吴昊, 刘左军, 徐文, 金红喜. 民勤绿洲边缘沙丘生物土壤结皮发育对浅层土壤质地、养分含量及微生物数量的影响. 生态学报, 2017, 37(18): 6064-6073.
- [14] Zhang Z S, Chen Y L, Xu B X, Huang L, Tan H J, Dong X J. Topographic differentiations of biological soil crusts and hydraulic properties in fixed sand dunes, Tengger Desert. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(2): 205-215.
- [15] 高广磊, 丁国栋, 赵媛媛, 冯薇, 包岩峰, 刘紫葳. 生物结皮发育对毛乌素沙地土壤粒度特征的影响. 农业机械学报, 2014, 45(1): 115-120.
- [16] 张元明, 杨维康, 王雪芹, 张道远. 生物结皮影响下的土壤有机质分异特征. 生态学报, 2005, 25(12): 3420-3425.
- [17] 赵允格, 许明祥, 王全九, 邵明安. 黄土丘陵区退耕地生物结皮对土壤理化性状的影响. 自然资源学报, 2006, 21(3): 441-448.
- [18] 孙福海, 肖波, 李胜龙, 王芳芳. 黄土高原藓类生物结皮对表层土壤水分运动参数的影响. 农业工程学报, 2021, 37(14): 79-88.
- [19] 王浩, 张光辉, 刘法, 耿韧, 栾莉莉. 黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响. 水土保持学报, 2015, 29(5): 117-123.
- [20] Chamizo S, Cantón Y, Lúzar R, Solé-Benet A, Domingo F. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. *Ecosystems*, 2012, 15(1): 148-161.
- [21] 李渊博, 李胜龙, 肖波, 张鑫鑫, 姚小萌, 王国鹏. 黄土高原藓结皮覆盖土壤导水性能和水流特征. 干旱区研究, 2020, 37(2): 390-399.
- [22] 孙福海, 肖波, 张鑫鑫, 王国鹏, 李胜龙, 姚小萌. 黄土高原生物结皮覆盖对土壤积水入渗特征的影响及其模型模拟. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2020, 48(10): 82-91.
- [23] 李胜龙, 肖波, 孙福海. 黄土高原干旱半干旱区生物结皮覆盖土壤水汽吸附与凝结特征. 农业工程学报, 2020, 36(15): 111-119.
- [24] 曾建辉, 马波, 郭迎春, 张泽宇, 李桂, 李占斌, 刘晨光. 冻融条件下生物结皮覆盖对土壤饱和导水率的影响. 生态学报, 2022, 42(1): 348-358.
- [25] Wang X P, Li X R, Xiao H L, Berndtsson R, Pan Y X. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert. *Hydrological Processes*, 2007, 21(1): 72-79.
- [26] 张侃侃, 卜崇峰, 高国雄. 黄土高原生物结皮对土壤水分入渗的影响. 干旱区研究, 2011, 28(5): 808-812.
- [27] Bu C, Wu S, Zhang K, Yang Y, Gao G. Biological soil crusts: an eco-adaptive biological conservative mechanism and implications for ecological restoration. *Plant Biosystems-An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2015, 149(2): 364-373.
- [28] Jiang Z Y, Li X Y, Wei J Q, Chen H Y, Li Z C, Liu L, Hu X. Contrasting surface soil hydrology regulated by biological and physical soil crusts for patchy grass in the high-altitude alpine steppe ecosystem. *Geoderma*, 2018, 326: 201-209.
- [29] 明姣, 孔令阳, 赵允格, 杜玉霞. 青藏高原高寒冻土区生物结皮对浅层土壤水热过程的影响. 生态学报, 2020, 40(18): 6385-6395.
- [30] 李新荣, 张志山, 黄磊, 王新平. 我国沙区人工植被系统生态-水文过程和互馈机理研究评述. 科学通报, 2013, 58(S1): 397-410.
- [31] Zhang J G, Wang X P, Liu L C, Xiao H L. Study on soil microbiotic crust and its influences on sand-fixing vegetation in arid desert region. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2000, 42(9): 965-970.
- [32] 孙永琦, 冯薇, 张宇清, 秦树高, 毛赫楠. 毛乌素沙地生物土壤结皮对油蒿群落土壤酶活性的影响. 北京林业大学学报, 2020, 42(11): 82-90.
- [33] 任宗萍, 张光辉, 王兵, 师阳阳. 双环直径对土壤入渗速率的影响. 水土保持学报, 2012, 26(4): 94-97, 103-103.
- [34] 孙福海, 肖波, 李胜龙, 王芳芳. 黄土高原不同发育阶段生物结皮的导水和持水特征. 草业学报, 2021, 30(6): 54-63.
- [35] Dashtaki S G, Homae M, Mahdian M H, Kouchakzadeh M. Site-dependence performance of infiltration models. *Water Resources Management*, 2009, 23(13): 2777-2790.
- [36] Chen N, Wang X P, Zhang Y F, Yu K L, Zhao C M. Ecohydrological effects of biological soil crust on the vegetation dynamics of restoration in a dryland ecosystem. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 1068-1077.
- [37] Xiao B, Sun F H, Hu K L, Kidron G J. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem. *Journal of Hydrology*, 2019, 568: 792-802.
- [38] 张润霞, 赵学勇, 李晶, 吕文强, 柴媛媛, 岳红琴. 干旱荒漠区土地利用方式快速转变对土壤入渗性能的影响. 中国沙漠, 2020, 40(4): 146-153.
- [39] 李建兴, 何丙辉, 谌芸. 不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响. 生态学报, 2013, 33(5): 1535-1544.
- [40] 王鑫皓, 王云琦, 马超, 王玉杰. 根系构型对土壤渗透性能的影响. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 73-82.
- [41] 王闪闪, 赵允格, 明姣, 张子辉, 郭雅丽. 黄土丘陵区生物结皮群落组成与水分入渗的关系. 应用生态学报, 2022, 33(07): 1819-1826.
- [42] 淡晨希, 张琼, 刘畅, 郭珍, 刘刚. 生物结皮与草本植物共生坡面的产流-入渗过程特征. 应用生态学报, 2022, 33(07): 1853-1860.