

# 红壤丘陵区不同盖度生物结皮对水分入渗的影响

李雨晨, 平原, 澹腾辉, 张航宇, 郭忠录

(华中农业大学水土保持研究中心, 武汉 430070)

**摘要:** 为探究不同盖度生物结皮对入渗特征的影响, 在红壤丘陵区咸宁选取第四纪黏土发育土壤(S 型)和泥质页岩发育土壤(N 型)上的生物结皮, 设计 6 个盖度水平(裸地, 1%~20%, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80%, 80%~100%), 使用微型圆盘入渗仪(mini disk)测定土壤入渗过程, 探究入渗过程的影响因素, 同时采用 3 种常见的入渗模型对入渗过程进行拟合, 并评价模型适用性。结果表明: (1) 相对于裸地, 生物结皮发育提高土壤有机质和黏粒含量, 增加结皮厚度和生物量, 降低砂粒含量。 (2) 第四纪黏土发育土壤水分入渗特征随生物结皮盖度的增加而逐渐降低, 初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、非饱和和导水率的变化范围分别为 0.25~1.55, 0.13~0.91, 0.17~1.11, 2.04~8.48 mm/min。泥质页岩发育土壤除 40%~60% 盖度砾石含量较高, 土壤水分入渗也随盖度的增加而逐渐减小, 80%~100% 盖度的初始、平均和稳定入渗率较裸地分别降低 91.14%, 87.64% 和 91.30%, 生物结皮的存在阻碍土壤水分入渗。冗余分析表明, 对于第四纪黏土发育土壤, 生物量(54.30%) 对其入渗特征的解释度最高, 泥质页岩发育土壤则为盖度(39.30%) 和砾石含量(34.00%)。 (3) Horton 模型、Kostiakov 模型、Philip 模型 3 种主流入渗模型中 Horton 模型拟合效果最优。研究结果可为揭示湿润区生物结皮水分运移规律提供科学参考。

**关键词:** 生物结皮; 土壤水分入渗; 冗余分析; 红壤丘陵区; 入渗模型

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)05-0071-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbxb.2023.05.009

## Effects of Biocrust with Different Coverage on Water Infiltration in Red Soil Hilly Region

LI Yuchen, PING Yuan, TAN Tenghui, ZHANG Hangyu, GUO Zhonglu

(Research Centre of Water and Soil Conservation, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070)

**Abstract:** In order to explore the influence of biocrust with different coverage on infiltration process, biocrust from quaternary clay developed red soil (S type) and argillaceous shale developed soil (N type) were selected in the red soil hilly area of Xianning. And six coverage levels (bare land, 1%~20%, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80% and 80%~100%) were set. The Mini disk infiltration instrument was used to determine the soil infiltration process and explore the factors affected the infiltration process, meanwhile three common models were used to simulate the infiltration process and the suitability of the model were compared. The results showed that: (1) Compared with bare soil, the development of two types of biocrust increased soil organic carbon, clay content, crust thickness and biomass, while decreased sand content. (2) The water infiltration characteristics of S-type soil decreased gradually with the increasing of biocrust coverage. The initial infiltration rate, stable infiltration rate, average infiltration rate and unsaturated water conductivity varied from 0.25 to 1.55, 0.13 to 0.91, 0.17 to 1.11 and 2.04 to 8.48 mm/min, respectively. In N-type soil, the soil water infiltration decreased with the increasing of coverage except for 40% to 60% (high gravel content). The initial infiltration rate, average infiltration rate and stable infiltration rate of 80% to 100% coverage decreased by 91.14%, 87.64% and 91.30%, respectively, compared with the bare soil. The presence of biocrust impeded the soil water infiltration. The RDA analysis showed that for S-type soil, biomass (54.30%) had the highest interpretation for its infiltration characteristics, while for N-type soil, they were coverage (39.30%) and gravel content (34.00%). (3) Among the three mainstream infiltration

收稿日期: 2023-03-03

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077066)

第一作者: 李雨晨(1995—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事水土保持与生态恢复研究。E-mail: 625250301@qq.com

通信作者: 郭忠录(1980—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀退化与土壤质量研究。E-mail: zlguo@hau.edu.cn

models, Horton model, Kostiakov model and Philip model, Horton model had the best fitting effect. The results could provide a useful reference for the study of water transport law of biological crusts in humid areas.

**Keywords:** biological crust; soil water infiltration; RDA analysis; red soil hilly region; infiltration model

生物结皮(又称生物土壤结皮, biological soil crust, BSC),是由隐花植物如蓝藻、地衣、苔藓、土壤微生物及其次生代谢物等与土壤颗粒胶结而成的地表覆被物<sup>[1]</sup>。生物结皮广泛分布于各类气候区,作为近地表的重要组成部分,生物结皮对坡面流域水分运动与循环<sup>[2-3]</sup>、土壤理化性质<sup>[4-5]</sup>、土壤侵蚀<sup>[6-7]</sup>等都有重要影响。生物结皮对极端温度和高强度紫外线有较高的耐受性,在极端环境下能够更好地生存,可以促进区域生态环境恢复<sup>[8]</sup>。

土壤入渗作为水文循环的重要组成部分,是将地表水转化土壤水的唯一途径,土壤入渗性能影响土壤水分循环与降雨的再分配,并与土壤性质、地表覆盖、植被根系等密切相关。已有研究<sup>[9]</sup>表明,生物结皮可以通过改变表层土壤理化性质及地表生态环境等影响土壤水文过程。但是受研究区域、气候条件、土壤性质及试验方法等影响,目前对于二者的关系并没有统一定论,仍存在一些矛盾的结果。一方面,有学者<sup>[10]</sup>认为,生物结皮可以通过假根及菌丝体的锚固结构增加土壤大孔通道,促进土壤水分入渗;同时,发育良好的生物结皮具有较高的表面粗糙度,可以延长雨水在地表的停留时间,增加水分入渗<sup>[11]</sup>。另一方面,结皮土壤本身具有斥水特征,削弱土壤对水分的吸附能力,降低土壤水分入渗<sup>[12]</sup>。此外,Wang等<sup>[13]</sup>研究发现,生物结皮对降雨入渗的响应有显著差异,在大雨强下有无生物结皮对水分入渗无显著影响。可见,关于生物结皮对水分入渗的影响是促进还是阻碍,相关研究结论并不统一。因此,量化描述不同区域生物结皮对土壤入渗的影响仍然十分关键。

目前国内关于生物结皮对土壤水分入渗的影响主要集中在干旱和半干旱地区,湿润区有关生物结皮的研究相对较少。受降雨情况及土壤性质等因素影响,不同气候区生物结皮的组成及生态功能差异较大,生物结皮发育演替表现出区域异质性,其他区域的研究成果推演到湿润区显然是不合适的。南方红壤丘陵区,受立地条件及人为干扰的影响,部分地区植被生长不良,林下郁闭度低,加之侵蚀性降雨集中,林下水土流失严重<sup>[14]</sup>。生物结皮的存在能够增强地表稳定性,特别是在土地退化和植被匮乏的区域,生物结皮是影响水分入渗及土壤侵蚀的关键因子<sup>[15]</sup>。本研究以亚热带气候盛行的南方红壤丘陵区为对象,探究不同发育程度下生物结皮对土壤入渗的影响,分析影响土壤入渗的驱动因子,为揭示湿润区生物结皮水分运移规律提供理论依据,并为区域水土流失防治提供科学支持。

## 1 研究区概况

贺胜桥镇(114°21'35"E, 30°01'45"N)位于武汉市与咸宁市的交界处,地处江汉平原边缘,多丘陵,海拔 44.3 m。气候类型属于亚热带季风气候,多年平均气温为 16.8℃,多年平均降水量为 1 577.4 mm,且多集中在 3—6 月,多年平均蒸发量为 1 455 mm。土壤多为棕红壤,土地利用类型多样,以种植经济林和水稻为主。植被类型多为次生混交林,受水热条件影响,该地区生物结皮广泛发育,尤其是在林下区域,且多以藓结皮为优势种。

## 2 材料与方法

### 2.1 土样采集与样品测定

在前期野外调查的基础上,选择该区域的 2 种典型土壤类型(第四纪黏土和泥质页岩发育的红壤,以下简称红壤 S 型和红壤 N 型),选择 5 个结皮盖度(1%~20%, 20%~40%, 40%~60%, 60%~80%, 80%~100%)的藓结皮样地,并以附近无结皮发育的裸地作为对照,结皮盖度采用网格法确定。综合考虑地形、植被等因素,保证这些条件基本一致的前提下,对上述 12 种处理采用微型圆盘入渗仪(高, 32.7 cm; 直径, 4.5 cm)进行野外原位入渗试验,入渗试验前先去样点表面的枯落物等杂物,水平放置仪器。设置虹吸速度为 2 cm,每隔 30 s 记录 1 次水位变化数据,为了准确测出土壤导水率,需要保证至少 15~20 mL 的水量入渗至土壤中,整个入渗过程持续约 10 min。计算出初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率和非饱和导水率作为入渗指标<sup>[16]</sup>,每个处理进行 3 次重复,共进行 36 次入渗试验,最后取平均值。同时使用环刀采集 0—2 cm 的结皮层土壤,测量结皮容重及砾石含量(>2 mm);采集结皮层样品测量土壤的基本理化性质,包括使用吸管法测定土壤机械组成,重铬酸钾—外加热法测定土壤有机质,电位法(水土比为 2.5:1)测定土壤 pH,游标卡尺测定生物结皮厚度,干燥法测定苔藓生物量。

### 2.2 土壤水分入渗模型选取

对生物结皮覆盖土壤入渗过程进行定量描述及拟合模型至今未得到统一,因地表覆盖、土壤类型、气候条件等存在差异,不同研究区域选取的拟合模型也不尽相同,而合适的土壤入渗模型是研究区域水文过程重要手段。因此,本研究选取 3 种主流入渗模型分别对生物结皮覆盖土壤水分入渗过程进行模拟,并对 3 种模型的拟合结果和模型的适用性行评价。

Kostiakov 模型的拟合公式:

$$I(t) = at^{-b} \quad (1)$$

式中:  $I(t)$  为入渗率 (mm/min);  $t$  为入渗时间

(min); $a$ 、 $b$  为模型参数。

Horton 模型的拟合公式:

$$I(t)=I_f+(I_i-I_f)e^{-kt} \tag{2}$$

式中: $I_i$ 为初始入渗率(mm/min); $I_f$ 为稳定入渗率(mm/min); $k$ 为模型参数。

Philip 模型的拟合公式:

$$I(t)=A+0.5St^{-0.5} \tag{3}$$

式中: $A$ 为稳定入渗率(mm/min); $S$ 为模型参数。

2.3 数据处理

使用 SPSS 24.0 软件进行数据分析,采用 Matlab2020b 软件拟合土壤入渗过程,Canoco 5.0 软件进行冗余分析(RDA),采用 Origin 2021b 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 生物结皮发育对土壤性质的影响

红壤(N 型)生物结皮厚度为 13.06~16.88 mm,且随着盖度的增加而显著增加(表 1);苔藓生物量、

有机质、黏粒含量也表现出同样的趋势。苔藓生物量高盖度(80%~100%)相对于低盖度(1%~20%)增加约 36.83%,80%~100%生物结皮盖度土壤黏粒含量相对于裸地增加约 4.69%。方差分析表明,60%~80%,80%~100%生物结皮盖度的有机质含量显著高于其余低盖度。结皮容重和 pH 随着结皮盖度的增加无显著变化,砂粒含量随着盖度增加表现出相反的趋势。值得注意的是,在 40%~60%生物结皮盖度下的砾石含量显著高于其他盖度( $p<0.05$ )。红壤(S 型)土壤的理化性质整体上与红壤(N 型)土壤变化趋势一致,有机质、生物量、厚度和黏粒含量随盖度的增加而增大,结皮厚度为 7.28~11.29 mm。本研究中红壤(S 型)砾石含量<0.5%,未统计该数据。从 2 种不同的土壤类型来看,红壤(N 型)土壤的结皮厚度、生物量和砂粒含量均高于红壤(S 型),根据美国农业部土壤质地分类标准,红壤(S 型)和红壤(N 型)土壤均为粉质黏土。

表 1 不同盖度下 2 种母质发育土壤上的生物结皮特征及土壤性质

土壤类型	结皮盖度/%	结皮容重/(g·cm <sup>-2</sup> )	有机质/(g·kg <sup>-1</sup> )	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	生物量/(g·dm <sup>-2</sup> )	结皮厚度/mm	砾石含量/%	pH
第四纪黏土发育土壤	0	1.29±0.01a	7.38±0.32b	4.45±0.21a	48.31±1.02b	47.24±0.87c			—	4.38±0.04a
	1~20	1.19±0.03a	7.50±1.43b	4.81±0.57a	49.86±0.58a	45.34±0.29d	1.79±0.29c	7.28±0.82c	—	4.77±0.01a
	20~40	1.19±0.1a	7.75±0.10b	4.40±0.36a	47.68±0.39bc	47.92±0.11c	2.50±0.63bc	8.87±0.39b	—	5.03±0.02a
	40~60	1.25±0.03a	7.45±0.25b	4.12±0.55a	45.82±0.84d	50.07±0.39b	2.64±0.24bc	9.61±0.50b	—	4.87±0.16a
	60~80	1.24±0.01a	9.84±0.15a	2.69±0.19b	46.20±0.80cd	51.11±0.72b	3.77±0.23ab	10.03±0.47ab	—	4.67±0.02a
	80~100	1.26±0.04a	10.32±0.19a	2.48±0.10b	45.07±0.14d	52.45±0.13a	4.86±0.96a	11.29±0.93a	—	4.57±0.05a
泥质页岩发育土壤	0	1.34±0.01a	5.68±0.22e	9.61±0.29a	49.57±0.32bc	40.82±0.27c			5.00±0.71b	6.17±0.16a
	1~20	1.31±0.01a	7.34±0.11d	8.94±0.18b	49.27±0.14bc	41.80±0.33c	3.63±0.65c	12.80±0.25b	4.37±0.82b	5.52±0.26a
	20~40	1.19±0.07b	9.41±0.60cl	6.94±0.15c	51.49±0.73a	41.58±0.88c	3.54±0.31c	13.16±0.67b	5.47±0.71b	6.12±0.11a
	40~60	1.30±0.01a	10.14±0.19b	6.30±0.03d	51.94±0.15a	41.76±0.15c	5.99±0.58bc	13.77±0.83a	9.80±0.32a	6.27±0.05a
	60~80	1.26±0.01ab	9.19±0.15c	6.33±0.02d	50.13±0.07b	43.54±0.06b	6.75±0.43b	15.63±0.95a	4.00±0.53b	5.79±0.16a
	80~100	1.20±0.04b	12.08±0.16a	6.18±0.03d	48.31±1.01c	45.51±1.03a	9.15±0.29a	16.60±0.25a	4.00±0.82b	6.08±0.03a

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同字母表示不同处理间差异显著( $p<0.05$ )。下同。

3.2 不同生物结皮盖度对土壤入渗特征的影响

不同土壤中生物结皮的发育均显著影响土壤水分入渗速率,入渗速率随着生物结皮盖度的增加而逐渐减小(图 1),说明生物结皮的存在阻碍土壤水分的入渗。土壤水分入渗过程均表现为初期入渗速率较大,随着入渗时间的增加而入渗速率减小,最终逐渐趋于稳定阶段,整个入渗过程呈“L”形。

由表 2 可以看出,对于红壤(S 型)而言,较低盖度(<40%)的初始入渗速率显著高于高盖度(>60%)。稳定入渗率、平均入渗率和非饱和导水率虽然随着结皮盖度的增加逐渐降低,但未达到显著水平( $p>0.05$ )。裸地的初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率分别为 1.55,

0.91,1.11,8.25 mm/min,是 80%~100%生物结皮盖度的 4.04~7.00 倍。对于红壤(N 型)而言,除 40%~60%生物结皮盖度,初始入渗速率、稳定入渗速率和平均入渗速率均随着生物结皮盖度的增加而逐渐减小,且达到显著水平( $p<0.05$ )。非饱和导水率变化趋势相同,但未达到显著水平。裸地的入渗特性显著高于结皮覆盖土壤,初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率和非饱和导水率分别为 1.92,0.89,1.38,11.73 mm/min,为 80%~100%生物结皮盖度的 6.85~11.5 倍。总体来看,研究区内 2 种不同母质发育土壤均表现出生物结皮发育阻碍土壤水分的入渗,且随着盖度的增加入渗速率大体上呈现降低的趋势。



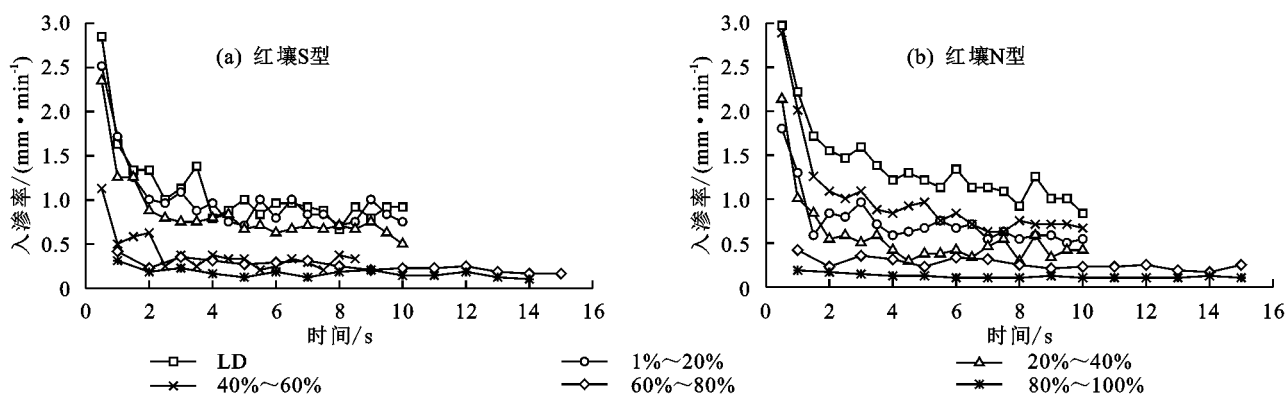


图 1 不同盖度下 2 种生物结皮土壤的水分入渗过程

表 2 2 种生物结皮土壤不同处理下的入渗特征

土壤类型	结皮盖度/%	初始入渗率/( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	稳定入渗率/( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	平均入渗率/( $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )	非饱和导水率/( $10^{-2} \text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ )
第四纪黏土发育土壤	0	$1.55 \pm 0.21\text{a}$	$0.91 \pm 0.27\text{a}$	$1.11 \pm 0.21\text{a}$	$8.25 \pm 3.99\text{a}$
	1~20	$1.42 \pm 0.26\text{a}$	$0.87 \pm 0.10\text{a}$	$1.02 \pm 0.17\text{a}$	$8.48 \pm 1.36\text{a}$
	20~40	$1.15 \pm 0.49\text{a}$	$0.63 \pm 0.59\text{a}$	$0.85 \pm 0.78\text{a}$	$6.37 \pm 0.65\text{a}$
	40~60	$0.58 \pm 0.19\text{b}$	$0.31 \pm 0.20\text{a}$	$0.40 \pm 0.18\text{a}$	$4.09 \pm 1.99\text{a}$
	60~80	$0.33 \pm 0.15\text{b}$	$0.17 \pm 0.06\text{a}$	$0.26 \pm 0.10\text{a}$	$3.15 \pm 0.87\text{a}$
	80~100	$0.25 \pm 0.07\text{b}$	$0.13 \pm 0.02\text{a}$	$0.17 \pm 0.04\text{a}$	$2.04 \pm 0.21\text{a}$
泥质页岩发育土壤	0	$1.92 \pm 0.48\text{a}$	$0.89 \pm 0.35\text{a}$	$1.38 \pm 0.43\text{a}$	$11.73 \pm 7.43\text{a}$
	1~20	$1.05 \pm 0.16\text{b}$	$0.55 \pm 0.12\text{abc}$	$0.75 \pm 0.12\text{bc}$	$4.93 \pm 1.50\text{a}$
	20~40	$0.94 \pm 0.27\text{b}$	$0.39 \pm 0.09\text{bc}$	$0.58 \pm 0.11\text{bcd}$	$1.42 \pm 1.41\text{a}$
	40~60	$1.56 \pm 0.17\text{ab}$	$0.70 \pm 0.08\text{ab}$	$1.00 \pm 0.01\text{ab}$	$4.98 \pm 2.67\text{a}$
	60~80	$0.33 \pm 0.15\text{c}$	$0.21 \pm 0.07\text{c}$	$0.27 \pm 0.1\text{cd}$	$2.40 \pm 0.68\text{a}$
	80~100	$0.17 \pm 0.02\text{c}$	$0.11 \pm 0.02\text{c}$	$0.12 \pm 0.02\text{d}$	$1.71 \pm 0.69\text{a}$

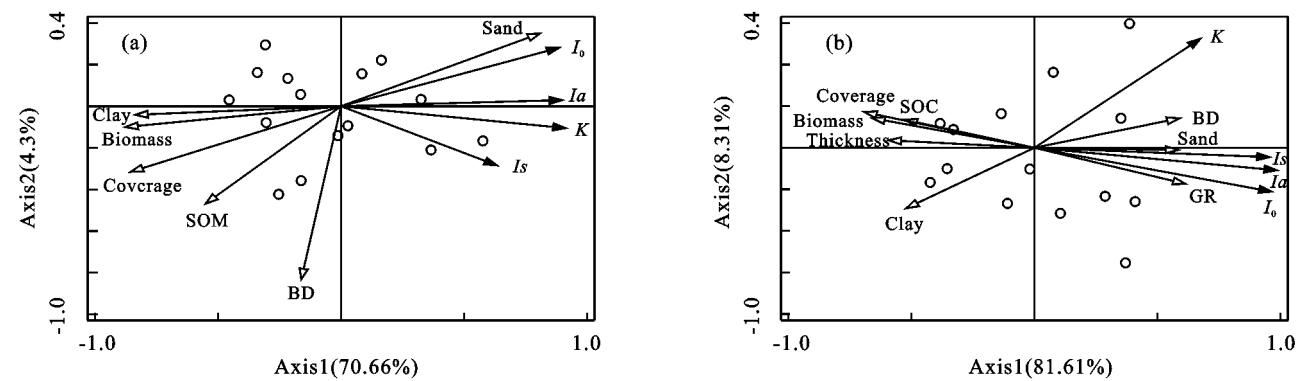
### 3.3 入渗特征的影响因素

为探明土壤性质、结皮特征与生物结皮土壤入渗性能之间的关系,采用 RDA 对参数进行分析。结果表明,对于红壤(S 型),第 1 排序轴和第 2 排序轴分别解释总方差的 70.66%和 4.30%,前 2 轴累积解释量达 74.96%(图 2a),表明第 1 轴和第 2 轴能充分反映入渗特征与结皮土壤性质之间的关系,且主要由第 1 轴决定。偏蒙特卡罗置换检验结果表明,苔藓生物量(54.3%)的解释度较高,是影响土壤入渗的主要因素(表 3);砂粒含量与入渗特征呈正相关,除容重外,其余指标与入渗特征均呈负相关;于红壤(N 型),RDA 前 2 个轴分别解释总方差 81.61%和 8.31%,共解释 89.92%(图 2b)。偏蒙特卡罗置换检验结果表明,结皮盖度( $p=0.014$ )和砾石含量( $p=0.016$ )是影响土壤入渗特征的主要因素,解释度分别为 39.30%和 34.00%。从表 3 可以看出,结皮容重、砂粒含量和砾石含量与土壤入渗特征呈正相关,其余指标均呈负相关。结皮容重与土壤入渗特征呈正相关,这可能与砾石含量增加导致结皮容重增大有关。冗余分析结果表明,不同土壤下生物结皮发育的入渗特征与土壤理化性质的响应结果和敏感程度不同。

### 3.4 入渗模型拟合效果

为了进一步研究经典入渗模型对不同盖度下 2 种母质发育土壤上的生物结皮土壤水分入渗的适用性,使用 3 种经典入渗模型对其入渗过程进行拟合(表 4)。Kostiakov 模型中, $a$ 、 $b$  均为经验入渗常数, $a$  表示第 1 个时间单位的平均入渗率,可以用来表征初始入渗率的大小; $b$  值代表入渗速率随时间衰减速度的快慢, $b$  值越大,入渗速率降低得越快。由表 4 可知,红壤(S 型)Kostiakov 模型中  $a$  值为  $1.89 \sim 0.28$ ,其中裸地最大,80%~100%生物结皮盖度  $a$  值最小,总体表现为随盖度增加逐渐减小。对于红壤(N 型),除 40%~60%生物结皮盖度, $a$  值变化规律与红壤(S 型)一致。2 种土壤的  $b$  值则均表现为先增大后减小的趋势,符合图 2 中入渗变化规律。在 Horton 模型中, $I_f$  和  $I_i$  分别代表稳定入渗速率和初始入渗速率,将模型拟合值与 2 种土壤实测值进行对比分析,红壤(S 型)和红壤(N 型)2 种土壤平均误差分别为 0.50, 2.07 和 0.46, 2.16,说明 Horton 模型对该区域初始入渗速率拟合效果高于稳定入渗速率。Philip 模型中  $S$  值在一定程度上代表初始入渗率的大小,红壤(S 型)土壤中拟合值  $S$  为  $0.21 \sim 1.61$ ,且随着结皮盖度增加而降低。

红壤(N 型)除 40%~60%生物结皮盖度,也表现为随着结皮盖度的增加而逐渐降低。



注:SOM 为有机质;BD 为容重;GR 为砾石含量;Biomass 为生物量;Coverage 为结皮盖度;Thickness 为结皮厚度;Clay 为黏粒含量;Sand 为砂粒含量; $I_s$  为稳定入渗率; $I_0$  为平均入渗率; $I_a$  为平均入渗率; $K$  为非饱和导水率。

图 2 2 种生物结皮土壤性质与入渗特征的 RDA 排序图

表 3 冗余分析统计结果

土壤理化性质	第四纪黏土发育土壤		土壤理化性质	泥质页岩发育土壤	
	解释度/%	$p$		解释度/%	$p$
生物量	54.3	0.002	砾石含量	34.0	0.016
砂粒	4.8	0.360	结皮厚度	0.9	0.752
有机质	13.2	0.050	容重	6.3	0.236
容重	2.0	0.634	有机质	2.5	0.378
盖度	1.3	0.726	黏粒	2.2	0.478
结皮厚度	—	—	苔藓生物量	4.6	0.206
黏粒	0.5	0.94	盖度	39.3	0.014
			砂粒	2.1	0.466

不同模型对入渗过程拟合效果可以用决定系数( $R^2$ )表示, $R^2$ 越大,拟合效果越好,对于红壤(S 型) Kostiakov 模型、Horton 模型和 Philip 模型 3 种入渗模型的  $R^2$  均值分别为 0.76,0.81 和 0.76;红壤(N 型) 3 种入渗模型的  $R^2$  均值则分别为 0.80,0.83 和 0.73。总体而言,3 种入渗模型都能较好地拟合研究区域的入渗过程,其中 Horton 模型拟合效果最优,其次为 Kostiakov 模型,最后为 Philip 模型。

表 4 入渗模型拟合参数

土壤类型	结皮盖度/%	Kostiakov 模型			Horton 模型				Philip 模型		
		$a$	$b$	$R^2$	$I_f$	$I_i$	$k$	$R^2$	$A$	$S$	$R^2$
第四纪黏土发育土壤	0	1.89	0.42	0.85	0.93	4.70	1.42	0.90	0.24	1.61	0.87
	1~20	1.71	0.41	0.85	0.85	4.10	1.34	0.94	0.25	1.43	0.87
	20~40	1.51	0.46	0.88	0.69	3.99	1.44	0.95	0.11	1.37	0.89
	40~60	0.71	0.53	0.79	0.31	1.78	1.32	0.81	0.06	0.70	0.78
	60~80	0.40	0.24	0.62	0.22	0.36	1.01	0.66	0.14	0.27	0.58
泥质页岩发育土壤	80~100	0.28	0.28	0.58	0.16	0.51	0.84	0.61	0.08	0.21	0.59
	0	2.21	0.37	0.95	1.10	3.71	0.79	0.92	0.43	1.75	0.95
	1~20	1.24	0.39	0.79	0.64	3.15	1.53	0.84	0.20	1.02	0.82
	20~40	1.22	0.67	0.87	0.43	4.38	1.72	0.95	0.11	1.35	0.69
	40~60	1.74	0.46	0.87	0.75	3.92	1.01	0.89	0.11	1.62	0.87
	60~80	0.39	0.22	0.51	0.17	0.38	0.12	0.50	0.16	0.24	0.20
	80~100	0.18	0.23	0.83	0.11	0.24	0.45	0.90	0.07	0.12	0.85

注: $a$ 、 $b$  为模型参数; $I_i$  为初始入渗率(mm/min); $I_f$  为稳定入渗率(mm/min); $k$  为模型参数; $A$  为稳定入渗率(mm/min); $S$  为模型参数。

4 讨论

生物结皮是土壤表层由隐花植物如蓝藻、地衣、苔藓、土壤微生物及其次生代谢物等与土壤颗粒胶结而成的复杂有机体<sup>[17]</sup>。生物结皮发育改变土壤地表特征及土壤理化性质,导致整个土壤剖面的不连续性,进而影响土壤水分入渗过程。本研究表明,大体

上 2 种母质发育土壤的入渗率随生物结皮盖度的增加而逐渐降低,生物结皮的存在阻碍土壤水分入渗,具体表现为与裸地相比,降低初始入渗率、平均入渗率、稳定入渗率及非饱和导水率。试验结果与其他使用盘式入渗仪进行试验<sup>[18-19]</sup>的结果一致。由图 2 和表 1 可知,对于红壤(S 型),除砂粒含量与土壤入渗特征呈正相关外,有机质等其余指标均呈负相关;对于红壤(N 型),容重、砂粒和砾石含量与入渗特征呈正比,有机质、盖度、厚度和生物量等其余指标与其呈反比。不难发现,生物结皮可以通过其发育程度直接影响土壤入渗,同时通过改变土壤性质间接影响入渗。因此生物结皮发育阻碍土壤水分入渗可合理地归因于细颗粒含量的增加、结皮厚度的增大以及苔藓植物本身具有吸水性。供试土壤为粉黏土,质地黏重,黏粒含量较高(40%~50%)。有研究<sup>[20]</sup>表明,黏性土壤具有胀缩性,吸水后体积膨胀导致入渗降低,同时生物结皮可以通过捕获大气降尘物质,以及微生物群落的生物化学风化作用增加土壤中细颗粒的含量<sup>[21]</sup>,结皮层细颗粒含量越高,预计对水分入渗阻碍越大。虽然本研究中供试土壤细颗粒(<0.05 mm)含量较高,生物结皮对土壤细颗粒含量增幅总量较小,但是相对于裸地,红壤(S 型)和红壤(N 型)80%~100%盖度的生物结皮土壤中砂粒含量分别减少 44.27%和 35.69%,生物结皮能富集细粒物质仍是不可忽略的重要因素。结皮盖度和结皮厚度、生物量具有显著相关性,盖度的增加往往伴随着厚度和生物量的增大,结皮层越厚对水分入渗的阻碍越大<sup>[22]</sup>。有研究<sup>[23]</sup>指出,生物结皮能分泌大量的胞外聚合物(EPS),其在吸水后急剧膨胀(最多增大 50 倍),进而堵塞孔隙阻碍水分入渗。苔藓植物自身疏松多孔有类似海绵弹力性状的特征,具有强大的吸水和持水能力,能够延缓土壤水分入渗<sup>[24]</sup>。同时,值得注意的是,砾石等大颗粒的存在对土壤水分入渗具有一定的促进作用,吕刚等<sup>[25]</sup>研究表明,当砾石含量为 5%~10%时,累积入渗量较大,与本研究结果相似。红壤(N 型)中,40%~60%盖度下砾石含量高于其他盖度,相应的入渗特征也表现出同样的趋势。冗余分析结果显示,砾石含量对入渗特征的解釋度达到 34%。此外,本研究中水分入渗的降低并不能用土壤有机质含量的增加来解释,普遍认为土壤有机质可以促进土壤团粒结构形成,增加团聚体的稳定性,改善土壤孔隙结构,促进土壤水分入渗<sup>[26]</sup>。但在本研究中情况并非如此,尽管不同盖度下生物结皮具有较高的有机质含量,但仍阻碍土壤水分的入渗。

本文采用 3 种常见的入渗模型对 2 种母质(第四纪黏土和泥质页岩)发育土壤上的生物结皮和裸地的入渗过程进行拟合,结果表明,不同土壤类型下 Horton 模型的拟合效果最优,其次为 Kostiakov 模型,Philip 模型拟合效果较差,这与郝文静等<sup>[27]</sup>的研究结果一致。Horton 模型虽然是通过大量数据得出的经验公式,但是可以用来描述长时间尺度下的入渗过程,且模型中常数项  $b$  可以反映长时间在重力作用下达到稳定入渗,对长时间入渗过程拟合效果较好。对于 Kostiakov 模型,入渗刚开始进行时入渗速率表现为无限大,但是随着时间的无限增大,入渗速率逐渐趋近于 0。在本试验中,时间是从非 0 开始的,当入渗时间足够长时,入渗速率逐渐趋于一个定值且达到稳定状态,因此拟合效果不理想<sup>[28]</sup>。Philip 模型为半理论半经验模型的物理模型,是在非饱和半无限入渗条件下求得的,仅适用于一维垂直入渗的土壤条件,对于原位自然土壤条件下的三维入渗过程拟合具有一定的局限性,且生物结皮的存在影响土壤水分水平扩散。同时,Philip 模型中时间( $t$ )的指数为固定常数 -0.5,对于在各种不同前期含水量土壤条件的入渗曲线变化难以精确表述,因此拟合效果不够理想<sup>[29]</sup>。综上,Horton 模型对不同盖度下结皮土壤入渗过程拟合最优,适用性最强。

## 5 结论

(1)相对于裸地,2 种母质发育土壤上的生物结皮提高了土壤有机质和黏粒含量,增加结皮厚度和生物量,降低土壤砂粒含量。

(2)第四纪黏土发育土壤水分入渗特征随生物结皮盖度的增加而逐渐降低,初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率的变化范围分别为 0.25~1.55, 0.13~0.91, 0.17~1.11 mm/min;泥质页岩发育土壤除 40%~60%盖度(砾石含量较高),土壤水分入渗也随盖度的增加而逐渐减小,生物结皮的存在阻碍土壤水分的入渗。

(3)冗余分析表明,第四纪黏土发育土壤,生物量(54.30%)对其入渗特征的解釋度最高,泥质页岩发育土壤则为盖度(39.30%)和砾石含量(34.00%)。

(4)Horton 模型、Kostiakov 模型、Philip 模型均能较好地拟合研究区土壤水分入渗过程,Horton 模型模拟效果最好,其次是 Kostiakov 模型和 Philip 模型。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in

- dryland hydrologic cycles [J]. *Hydrological Processes*, 2006, 20(15): 3159-3178.
- [3] 李新荣, 谭会娟, 回嵘, 等. 中国荒漠与沙地生物土壤结皮研究[J]. *科学通报*, 2018, 63(23): 2320-2334.
- [4] 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.
- [5] 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): 4662-4670.
- [6] 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.
- [7] 冉茂勇, 赵允格, 陈彦芹. 黄土丘陵区水蚀区生物结皮土壤抗冲性试验研究[J]. *西北林学院学报*, 2009, 24(3): 37-40, 62.
- [8] Kakeh J, Gorji M, Sohrabi M, et al. Effects of biological soil crusts on some physicochemical characteristics of rangeland soils of Alagol, Turkmen Sahra, NE Iran[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 181: 152-159.
- [9] Guan H J, Liu X Y. Biocrust effects on soil infiltrability in the Mu Us Desert: Soil hydraulic properties analysis and modeling[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2021, 69(4): 378-386.
- [10] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(1): 148-161.
- [11] Kakeh J, Gorji M, Mohammadi M H, et al. Biological soil crusts determine soil properties and salt dynamics under arid climatic condition in Qara Qir, Iran[J]. *The Science of the Total Environment*, 2020, 732: e139168.
- [12] 孙福海, 肖波, 姚小萌, 等. 黄土高原生物结皮斥水性及其沿降水梯度变化特征研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(7): 304-312.
- [13] Wang X P, Li X R, Xiao H L, et al. Effects of surface characteristics on infiltration patterns in an arid shrub desert[J]. *Hydrological Processes*, 2007, 21(1): 72-79.
- [14] 袁再健, 马东方, 聂小东, 等. 南方红壤丘陵区林下水土流失防治研究进展[J]. *土壤学报*, 2020, 57(1): 12-21.
- [15] Chamizo S, Cantón Y, Miralles I, et al. Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 49: 96-105.
- [16] 张轩铭, 戴翠婷, 李朝霞, 等. 三峡库区紫色砂岩不同发育程度土壤入渗特征及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 92-98.
- [17] Bowker M A, Reed S C, Maestre F T, et al. Biocrusts: The living skin of the earth[J]. *Plant and Soil*, 2018, 429(1): 1-7.
- [18] 王浩, 张光辉, 刘法, 等. 黄土丘陵区生物结皮对土壤入渗的影响[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 117-123.
- [19] Jiang Z Y, Li X Y, Wei J Q, et al. Contrasting surface soil hydrology regulated by biological and physical soil crusts for patchy grass in the high-altitude alpine steppe ecosystem[J]. *Geoderma*, 2018, 326: 201-209.
- [20] Chamizo S, Belnap J, Eldridge D J, et al. The role of biocrusts in arid land hydrology[M]. // *Biological Soil Crusts: An Organizing Principle in Drylands* Cham: Springer, 2016: 321-346.
- [21] Ortega-Morales B O, Narváez Zapata J, Reyes Estebanez M, et al. Bioweathering potential of cultivable fungi associated with semi-arid surface microhabitats of Mayan buildings[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7: 201.
- [22] 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.
- [23] Raddadi N, Giacomucci L, Marasco R, et al. Bacterial polyextremotolerant bioemulsifiers from arid soils improve water retention capacity and humidity uptake in sandy soil[J]. *Microbial Cell Factories*, 2018, 17(1): 83-94.
- [24] Li S L, Bowker M A, Xiao B. Impacts of moss-dominated biocrusts on rainwater infiltration, vertical water flow, and surface soil evaporation in drylands[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 612: e128176.
- [25] 吕刚, 王婷, 王韞策, 等. 辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 86-92.
- [26] 张冠华, 易亮, 丁文峰, 等. 三峡库区苔藓生物结皮对土壤水分入渗的影响[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(7): 1835-1842.
- [27] 郝文静, 陈晓燕, 胡建新, 等. 紫色土区林地土壤入渗性能试验研究[J]. *中国农学通报*, 2015, 31(24): 204-209.
- [28] 刘洁, 李贤伟, 纪中华, 等. 元谋干热河谷三种植被恢复模式土壤贮水及入渗特性[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 2331-2340.
- [29] 闫建梅, 何丙辉, 田太强, 等. 川中丘陵区不同土地利用方式土壤入渗与贮水特征[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 53-57.