

短时强降雨下黏土表层覆盖苔藓 水分入渗特征及其模型模拟

陈秋帆^{1,4}, 李成荣¹, 卢琦², 王妍^{1,3}

(1.西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224; 2.中国林业科学研究院 荒漠化研究所, 北京 100091;

3.云南省山地农村生态环境演变与污染治理重点实验室, 云南 昆明 650224; 4.云南水利水电职业学院, 云南 昆明 650499)

摘要: [目的] 探究短时强降雨条件下土壤表层覆盖苔藓植物对水分入渗产生影响的机理, 为苔藓植物在石漠化区水土流失治理中的运用提供数据支撑。[方法] 室内模拟大灰藓(*Hypnum plumaeforme*)、牛舌藓(*Anomodon viticulosus*)、小石藓(*Weisia controversa*)、蕊形真藓(*Bryum coronatum*)植物覆盖处理的一维土柱历经短时 20 mm 强降雨后土壤水分入渗过程, 运用经典入渗模型和 Singh 的嫡入渗方程模拟水分入渗过程, 对比不同苔藓植物覆盖下土壤水分入渗的差异性。[结果] ①苔藓植物覆盖处理组水分入渗特征初始、稳定、平均入渗速率和累计入渗量均大于裸土($p < 0.05$), 入渗速率最慢的蕊形真藓组 4 个入渗特征值 0.718 cm/min, 0.279 cm/min, 0.180 cm/min 和 19.575 cm 较裸土分别大 7.65%, 8.56%, 11.90% 和 3.75%; 苔藓植物覆盖处理组促进水分入渗的原因是苔藓植物阻碍土壤表层产生物理结皮促进入渗效应大于苔藓植物层截留阻碍水分入渗效应。②入渗过程中 4 种苔藓植物产生促进或阻碍水分入渗效应不同使水分入渗特征值存在显著性差异($p < 0.05$)。入渗特征与苔藓植物假根密度、假根根长、饱和吸水率呈负相关; 与糙率呈正相关, 但是相关系数不大。③表层覆盖苔藓植物土壤水分入渗过程模拟用 Horton 入渗模型更佳, 而裸土水分入渗则采用 Philip 模型效果更好; 若精度要求不高且为了简便则可以采用 Singh 的嫡入渗方程 E-Kostiakov 入渗模型。[结论] 历经短时 20 mm 强降雨后与裸土相比, 表层覆盖苔藓植物具有促进水分入渗效应。这主要与苔藓植物的存在阻碍土壤表层产生物理结皮有关。

关键词: 覆盖苔藓植物; 短时强降雨; 水分入渗; 入渗模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0001-09

中图分类号: S152.7, X37

文献参数: 陈秋帆, 李成荣, 卢琦, 等. 短时强降雨下黏土表层覆盖苔藓水分入渗特征及其模型模拟[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 1-9, 23. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.001; Chen Qiufan, Li Chengrong, Lu Qi, et al. Water infiltration characteristics and model simulation of bryophytes on surface layer of clay soil under short-term heavy rainfall [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 1-9, 23.

Water Infiltration Characteristics and Model Simulation of Bryophytes on Surface Layer of Clay Soil Under Short-term Heavy Rainfall

Chen Qiufan^{1,4}, Li Chengrong¹, Lu Qi², Wang Yan^{1,3}

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University,

Kunming, Yunnan 650224, China; 2.Institute of Desertification Research, China

Academy of Forestry Science, Beijing 100091, China; 3.Key Laboratory of Ecological Environment

Evolution and Pollution Management in Mountainous Rural Areas of Yunnan Province, Kunming, Yunnan

650224, China; 4.Yunnan Water Resources and Hydropower Vocational College, Kunming, Yunnan 650499, China)

Abstract: [Objective] The mechanism on how bryophytes influence water infiltration in the soil surface layer following a short period of heavy precipitation was studied in order to provide data support for the use of bryophytes to control soil erosion in rocky desert areas. [Methods] We measured soil water infiltration in a laboratory study using a one-dimensional soil column covered with *Hypnum plumaeforme*, *Anomodon viticulosus*,

收稿日期: 2022-07-14

修回日期: 2022-11-23

资助项目: 国家自然科学基金项目“滇东南峰丛洼地磷素“源—汇”格局演变及其与湖泊富营养化的耦合机制”(31760245); 云南省教育厅科学研究基金项目(2019Y0132, 2023J1972)

第一作者: 陈秋帆(1991—), 女(汉族), 云南省曲靖市人, 博士研究生, 主要研究方向为苔藓植物在水土保持中的作用。Email: chenhi@163.com。

通讯作者: 王妍(1980—), 女(满族), 河北省承德市人, 博士, 副教授, 主要从事脆弱生态系统关键过程与修复方面的研究。Email: wycaf@126.com。

Weisia controversa, or *Bryum coronatum* after a short period of 20 mm of precipitation. We used the classical Horton infiltration model and Singh's entropy infiltration equation to simulate water infiltration, and compared the differences in soil water infiltration. [Results] ① The initial, stable, and mean infiltration rates and the cumulative infiltration amount for the bryophyte-cover treatments were all greater than observed for the bare soil treatment ($p < 0.05$). The four infiltration characteristic values were 0.718 cm/min, 0.279 cm/min, 0.180 cm/min, and 19.575 cm, respectively, for the *Bryum coronatum* treatment, which had the slowest infiltration rate, and the respective values were 7.65%, 8.56%, 11.90% and 3.75% greater than those observed for the bare soil treatment. The reason that the bryophyte-cover treatments increased water infiltration was that the bryophytes prevented the production of a physical crust on the soil surface. This effect was greater than the effect of the bryophyte layer to intercept and prevent water infiltration. ② The four bryophytes produced different effects to promote or impede water infiltration during the infiltration process, resulting in significant differences in water infiltration eigenvalues ($p < 0.05$). Infiltration characteristics were negatively correlated with rhizoid density, rhizoid length, and saturated water absorption rate of bryophytes, and positively correlated with bryophyte roughness, but the correlation was small. ③ The classical Horton infiltration model was more suitable for simulating the soil water infiltration process of bryophyte-covered soil. The Philip model was more suitable for simulating bare soil water infiltration. If the accuracy requirement is not high and a simple model is desired, Singh's entropy infiltration equation can be used as well as the E-Kostiakov infiltration model. [Conclusion] Bryophytes covering the soil surface layer increased water infiltration following a short period of intense precipitation of 20 mm, which was mainly due to the presence of bryophytes impeding the formation of physical crusting of the soil surface layer.

Keywords: bryophytes; short time heavy precipitation; water infiltration; infiltration model

中国是全世界水土流失最为严重的国家之一。2020年,全国水土流失面积 2.69×10^6 km²,其中,水力侵蚀面积 1.120×10^6 km²,占水土流失面积的 41.59%^[1];流失区域集中在长江和黄河上中游、东北黑土区、西南石漠化地区;西南石漠化地区水土流失面积 2.45×10^5 km²。造成水土流失的主要原因是强降雨下高度集中的地表径流及其冲刷侵蚀挟带大量泥沙而引起的,降雨强度远大于土壤入渗速率,产流以超渗产流为主^[2];短时强降水将加剧水土流失,植被修复是治理水土流失有效的措施。生长在薄土表层的先锋植物苔藓逐渐被研究者所关注;苔藓植物在陆地生态系统中的积极作用,包括防止水蚀和风蚀、增加土壤碳和氮以及促进生物多样性等方面的作用得到了证实^[3-4]。但苔藓植物存在土壤表层改变了水分入渗界面的连续性影响水分穿透性和表层滞留时间,以苔藓植物为主的生物结皮存在土壤表层对水分入渗的影响,世界各地研究结论还存在 3 种不同的争议。对土壤水分入渗具有积极的作用,促进水分入渗归因于生物结皮的存在导致土壤孔隙率的增加、团聚体稳定性的增强和物理结构的改善^[5-6];对水分入渗具有消极作用的原因是苔藓在水的作用下,吸水膨胀形成水分难以渗透的密闭层或者苔藓结皮土壤存在一定拒水性阻碍水分入渗^[7];无影响观点主要认为由土壤特征决定入渗^[8]。关于苔藓植物对表层土壤入

渗影响机制存在争议是因土壤质地和结构、生物结皮类型和覆盖度、气候(主要是降雨)等因素不同而致,这些都极大可能地改变陆地生态系统的表层土壤水分入渗过程^[9]。苔藓植物生长在土壤表层主要通过苔藓植物层和苔藓植物改变了表层土壤特性二者共同影响土壤水分入渗,但目前多数研究者一般将苔藓植物结皮土壤作为一个整体研究水分入渗过程,难以阐明苔藓植物生长繁殖对水分入渗产生影响的机理,有必要将苔藓植物层和苔藓植物长时间生长发育改变下伏土壤理化性质二者对水分入渗的影响进行区分研究。鉴于苔藓植物生长发育改变表层土壤理化性质产生显著性差异时间较长,本次试验先进行土壤表层人为覆盖苔藓植物对水分入渗产生影响的研究。以苔藓植物生长广泛的石漠化为采样区,探讨苔藓植物覆盖处理下短时强降水后一维土柱水分入渗过程,旨在揭示表层覆盖不同苔藓植物土壤水分入渗特征以及表层覆盖苔藓植物的土壤水分入渗机理,同时探析水分入渗模型模拟苔藓植物的土壤水分入渗过程,为把苔藓植物运用在石漠化区水土流失治理中提供数据支撑,进一步巩固中国水土流失面积强度“双下降”态势。

1 材料和方法

1.1 试验材料

2019年12月将云南省石林县典型石漠化区(经度 $103^{\circ}20'16''$, 纬度 $24^{\circ}46'8''$)采集的优势苔藓大灰藓

(*Hypnum plumaeforme*)、牛舌藓(*Anomodon viticulosus*)、小石藓(*Weisia controversa*)、蕊形真藓(*Bryum coronatum*)在室内采用不锈钢培养盘进行培养,2020年7月测量苔藓植物的生物学特性,并将野外采集的土柱供试土壤,自然风干后剔除杂质,研磨过2 mm筛孔混合均匀备用。于2021年1月开展土柱入渗试验,测量风干后土柱供试土壤含水率为3.35%;取供试土样使用TIPSCOPE-400显微镜观察土壤表层的土颗粒结构及大小;利用吸管法测定土壤机械组成,砂粒、粉粒和黏粒的含量分别为15.9%、48.7%和35.4%,土壤质地属于粉质黏土类。

1.2 苔藓植物饱和吸水率和糙率测量

(1) 饱和吸水率(SWR, %):表示单位面积干重苔藓植物的饱和吸水重。取一定面积苔藓植物过0.2 mm分样筛清洗干净后吸水24 h,置于过滤网中,待不滴水后称其饱和吸水重,将称重后的苔藓置于烘箱中,在60℃的条件下烘48 h后测量干重,每种苔藓植物设置3个平行样。

(2) 糙率(C_r , %):采用长10 cm,宽0.5 mm的链条贴近苔藓植物表面放置,链条长度随苔藓植物表层起伏增大而减小,计算出链条长度的减小值 L_1-L_2 ,即得粗糙度指标,每种苔藓植物设置5个平行样。计算公式为:

$$C_r = (L_1 - L_2) / L_2 \times 100\% \quad (1)$$

1.3 土柱入渗试验

试验所用土柱为内径6 cm,高5 cm的透明有机玻璃柱4个组装而成,底部均匀分布圆形小孔

(图1)。土柱制作过程中注意事项有:①在土柱底部垫2层滤纸防止土颗粒流失;②在有机玻璃柱内壁涂抹一层凡士林以防止管壁效应影响水分入渗;③分层装入土壤,层与层之间刮毛防止入渗分层效应的产生;④为防止土壤不均匀分布使用圆形木头轻压土柱。将供试土样充分混匀后,分3层装入土柱,每层厚度为5 cm,之后分别将室内培养后风干一周的4种苔藓植物以盖度大于98%覆盖在土壤表层形成不同的试验处理,以裸土为对照,各处理均重复3次。

一维土柱制备完成后,试验过程分为两个阶段,第一个阶段依据短时强降雨是指1 h降水量 ≥ 20 mm的降水,本试验模拟历经短时间20 mm的强降雨。从距离苔藓植物表层5 cm的高度处一次性加入20 mm全部水量。所有样品表面均未出现积水后立即展开第二阶段的定水头入渗试验,使用内径为9 cm,高度为50 cm的马氏瓶供水;水头高度为3 cm;试验时间共计90 min。入渗开始后,连续记录马氏瓶水位下降高度,前30 min每1 min读一次数,第30—90 min每5 min记录一次。初始入渗速率为入渗后前3 min的平均速率;稳定入渗速率为前后供水量恒定或相差不大时视为入渗过程达到稳渗阶段,并通过加水量与间隔时间算出稳渗速率;平均入渗速率为试验时间内的入渗速率均值。由于试验持续时间较短,可忽略蒸发对入渗过程的影响。入渗试验结束后,保留入渗土柱中的土壤原形并使其风干,取5个不同处理的表层土壤薄层使用TIPSCOPE-400显微镜观察土壤的颗粒结构。

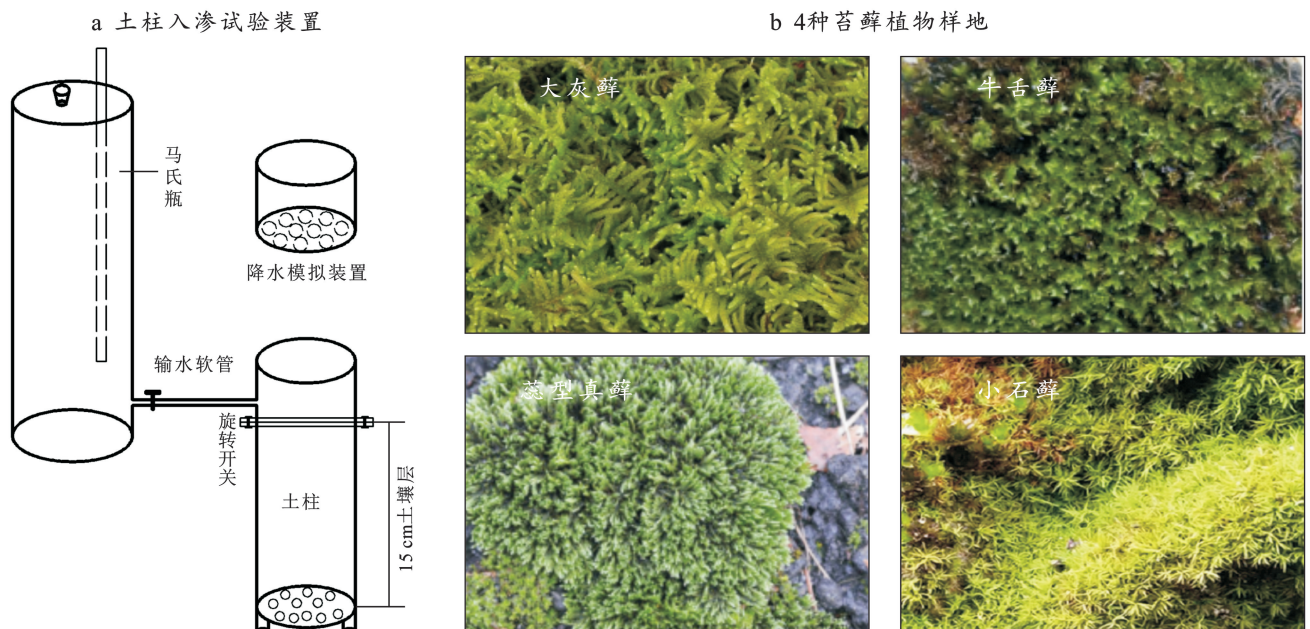


图1 土柱装置设计及试验样地

Fig.1 Design diagram of soil column installation and experimental sample plots

1.4 苔藓植物效应

将土壤表层是否人为覆盖苔藓植物在短时强降雨后水分入渗能力所表现出来的差异定义为该条件下的苔藓植物效应。其中,由覆盖苔藓植物的土柱入渗速率减去裸土土柱入渗速率的差值称为苔藓植物效应值;效应值 Y 大于 0 则苔藓植物促进土壤水分入渗,小于 0 则阻碍土壤水分入渗。另外,苔藓植物效应值大于 0 或小于 0 的维持时间 T 也是反映苔藓植物效应的重要参数。

$$Y = E_b - E_s \quad (2)$$

式中: Y 为苔藓植物效应值 (cm/min); E_b, E_s 分别为覆盖苔藓植物入渗速率 (cm/min) 和裸土入渗速率 (cm/min)。

1.5 土壤水分入渗模型

本次选取需要标定参数的经典入渗模型 3 个和简单无需标定参数的 Singh 的嫡入渗方程模拟苔藓植物覆盖后的土壤水分入渗过程。

1.5.1 经典入渗模型:

(1) Horton 入渗模型:

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率 (cm/min); f_0 为初始入渗率 (cm/min); f_c 为稳定入渗率 (cm/min); k 为经验常数,表征入渗速率随时间减少的程度; t 为入渗时间 (min)。

(2) Philip 入渗模型:

$$f(t) = \frac{1}{2}St^{-0.5} + A \quad (4)$$

式中: $f(t)$ 是入渗速率 (cm/min); S 为吸渗率 (cm/min^{0.5}),表征土壤入渗能力; t 为入渗时间 (min); A 为稳定入渗率 (cm/min)。

(3) Kostiakov 入渗模型:

$$f(t) = at^{-b} \quad (5)$$

式中: $f(t)$ 为入渗速率 (cm/min); a, b 均为模型参数。

1.5.2 Singh 的嫡入渗方程

(1) E-Horton 入渗模型:

$$I(t) = I_c + (I_0 - I_c) \exp\left[-\frac{(I_0 - I_c)}{S}t\right] \quad (6)$$

(2) E-Philip 入渗模型:

$$I(t) = 0.5 \times (2 \times I_c \times S)^{0.5} \times t^{-0.5} + I_c \quad (7)$$

(3) E-Kostiakov 入渗模型:

$$I(t) = 0.5 \times (2 \times I_c \times S)^{0.5} \times t^{-0.5} + I_c \quad (8)$$

式中: $I(t)$ 为入渗率 (cm/min); I_0 为初始入渗率 (cm/min); t 为入渗时间 (min); I_c 为稳定渗率 (cm/min); S 为土壤最大持水量,在本试验中等同于累积入渗量 (cm)。

1.6 数据处理

试验数据处理及单因素方差分析使用 Microsoft Excel 2016; Horton 模型、Philip 模型、Kostiakov 模型模拟使用 1stOpt 5.0 软件;图形绘制使用 Origin 95。

2 结果与分析

2.1 不同苔藓植物生物学特性

4 种苔藓植物的假根密度、假根根长、饱和吸水率、糙率生物学特性指标部分差异性显著 ($p < 0.05$) (表 1),这些指标可以反映 4 种苔藓植物覆盖层的差异性。蕊型真藓的饱和吸水率和假根密度值最大,分别为 1 384.93% 和 169.83 株/cm²;大灰藓的饱和吸水率次之值为 1 112.78% 且假根根长最长为 264.78 cm/cm³,但该苔藓植物假根密度最小值为 29.33 株/cm²;饱和吸水率最小和假根根长最短的是小石藓,值分别为 602.74% 和 30.46 cm/cm³。4 种苔藓植物中大灰藓的糙率值最大为 31.37%,其次是小石藓,蕊型真藓和牛舌藓糙率差异不显著。

表 1 不同苔藓植物生物学特性

Table 1 Biological characteristics of different bryophytes

采样生境	苔藓种类	假根密度/(株·cm ⁻²)	假根根长(cm·cm ⁻³)	饱和吸水率/%	糙率/%
云南松纯林地	大灰藓	29.33±4.51 ^c	264.78±4.64 ^a	1 112.78±40.56 ^b	31.37±4.20 ^a
灌丛地	小石藓	53.44±3.00 ^b	30.46±3.05 ^d	602.74±34.78 ^d	17.25±2.49 ^b
耕地	蕊型真藓	169.83±8.44 ^a	133.60±14.85 ^b	1 384.93±80.77 ^a	10.81±2.01 ^c
裸岩地	牛舌藓	66.61±8.15 ^b	63.19±8.23 ^c	782.25±2.43 ^c	12.74±2.48 ^c

注:①表中数据为平均值±标准差;②不同小写字母表示不同苔藓植物生物学特性在 0.05 水平下差异性显著。下同。

2.2 表层覆盖苔藓植物对黏土水分入渗的影响

2.2.1 不同苔藓植物覆盖下土壤水分入渗曲线及累计入渗量分析 表层覆盖不同苔藓植物土壤水分入渗过程和裸土一样可划分为 3 个阶段(图 2)。由图 2 可以看出,第 I 阶段为入渗速率快速下降阶段,各类处理入渗速率差异性不显著;第 II 阶段为入渗速率缓

慢下降阶段,各类处理入渗速率开始呈现出显著性差异,入渗速率从大到小依次为:小石藓、大灰藓、牛舌藓和蕊型真藓;第 III 阶段为入渗速率相对稳定阶段,各类处理入渗速率波动范围差距较小,大灰藓和小石藓的稳定入渗速率均大于蕊型真藓、牛舌藓和裸土。另外,不同处理累计入渗量随着入渗时间的推移均呈

增加趋势。在入渗的Ⅰ阶段,裸土与4种不同苔藓植物覆盖处理的累计入渗量差异性不显著(图2)。随着入渗时间推进,在Ⅱ阶段累计入渗量逐渐呈现出显著性差异。

Ⅲ阶段结束后,不同处理累计入渗量从大到小排

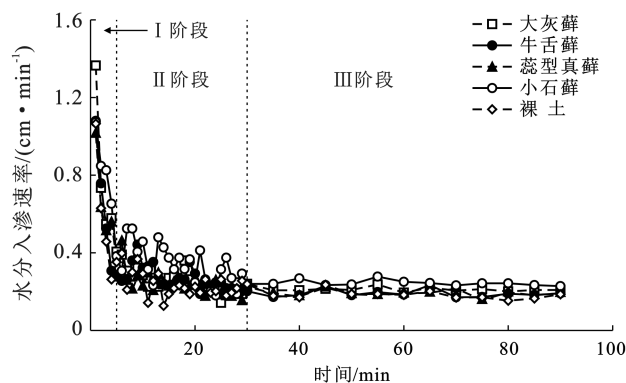


图2 不同苔藓植物影响下水分入渗速率及累计入渗量曲线

Fig.2 Curve of water infiltration rate and cumulative infiltration affected by different bryophytes

2.2.2 不同苔藓植物影响下土壤水分入渗特征 4种苔藓植物影响下土壤水分入渗特征与裸土具有显著性差异($p < 0.05$);它们的初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率均大于裸土,入渗特征值最小的蕊型真藓较裸土的3个入渗特征值0.667 cm/min, 0.168 cm/min, 0.257 cm/min分别高出7.65%, 8.56%, 11.90%。另外,4种苔藓植物影响下土壤水分入渗特征部分呈现出差异性($p < 0.05$)(表2)。小石藓和大灰藓的初始入渗速率值最大分别为0.915和0.883 cm/min,二者无显著性差异;其次是入渗速率分别为0.787和0.718 cm/min的牛舌藓和蕊型真藓,二者无显著性差异。稳定入渗速率最大的是小石藓,值为0.242 cm/min;其次是入渗速率值为0.207 cm/min的大灰藓;牛舌藓和蕊型真藓的稳定入渗速率值分别为0.190和0.188 cm/min,二者无显著性差异。平均入渗速率值最大的是小石藓为0.392 cm/min,其次是大灰藓为0.312 cm/min;牛舌藓和蕊型真藓平均入渗速率值分别为0.297和0.279 cm/min。

表2 不同苔藓植物影响下土壤水分入渗特征

Table 2 Soil water infiltration characteristics affected by different bryophytes

名称	初始入渗速率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	平均入渗速率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)	稳定入渗速率/ ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
大灰藓	0.883±0.019 ^a	0.312±0.018 ^b	0.207±0.007 ^b
牛舌藓	0.787±0.042 ^b	0.297±0.024 ^c	0.190±0.002 ^c
蕊型真藓	0.718±0.021 ^b	0.279±0.009 ^c	0.188±0.004 ^c
小石藓	0.915±0.097 ^a	0.392±0.033 ^a	0.242±0.022 ^a
裸土	0.667±0.019 ^c	0.257±0.012 ^d	0.168±0.011 ^d

序为:小石藓>大灰藓>牛舌藓>蕊型真藓>裸土,累计入渗量分别为26.85, 22.59, 21.04, 20.31和19.575 cm。与裸土相比,小石藓、大灰藓、牛舌藓和蕊型真藓在整个入渗过程中累计入渗量分别大于裸土组37.16%, 15.40%, 7.48%, 3.75%。

2.2.3 苔藓植物效应分析 苔藓植物效应值Y在整个入渗过程中并非都是促进或阻碍水分入渗效应,而是随着入渗时间的推进呈现出阶段性的变化(图3);另外,促进或阻碍水分入渗效应维持时间T因苔藓植物不同而异。水分入渗推进30 min内,不同苔藓植物促进或阻碍水分入渗的效应及维持时间T具有差异性;小石藓促进水分效应值最大且维持时间T为30 min,大灰藓和牛舌藓第0—20 min以促进效应为主且促进效应值较小石藓小,20—30 min以阻碍水分入渗为主;牛舌藓、大灰藓和小石藓整个入渗过程中促进入渗效应维持时间T大于阻碍效应维持时间,说明表层覆盖此3种苔藓植物历经短时20 mm强降水后对水分入渗具有促进作用。与其他3种苔藓植物相比,蕊型真藓促进效应值最小,阻碍效应值最大,且2种效应维持时间差异性不显著,说明蕊型真藓覆盖在土壤表层产生阻碍水分入渗的效应较其他3种苔藓更明显。土壤水分入渗推进至30—90 min过程中,小石藓、大灰藓和牛舌藓苔藓植物效应值为接近0的促进水分入渗效应,反映出此3种苔藓植物覆盖在土壤表层对水分入渗促进作用的影响更大;而蕊型真藓的效应值接近0,反映出该苔藓植物覆盖在土壤表层产生促进水分入渗效应和阻碍水分入渗效应差异不大。

2.3 不同处理土壤表层结构特征分析

短时20 mm强降水后不同处理土壤表层显微镜观测图像具有显著性差异。由图4a为未经过试验处理的土壤表层结构特征,土壤颗粒外形较图4b更圆润且土壤颗粒较大;覆盖苔藓植物后土壤表层显示土

壤的结构已经被破坏(图 4b),土壤颗粒变小,但是较裸土表层土壤成像图 4c 显示的土壤颗粒较大;通过比较得到表层覆盖苔藓植物在一定程度上可以缓解土壤表层被强降水破坏导致土壤颗粒粒径变小减小

水分入渗,说明苔藓植物存在土壤表层具有阻碍土壤表层产生物理结皮促进水分入渗的效应;同时也说明表层覆盖物影响下土壤性质的改变与否对水分入渗过程具有重要的影响。

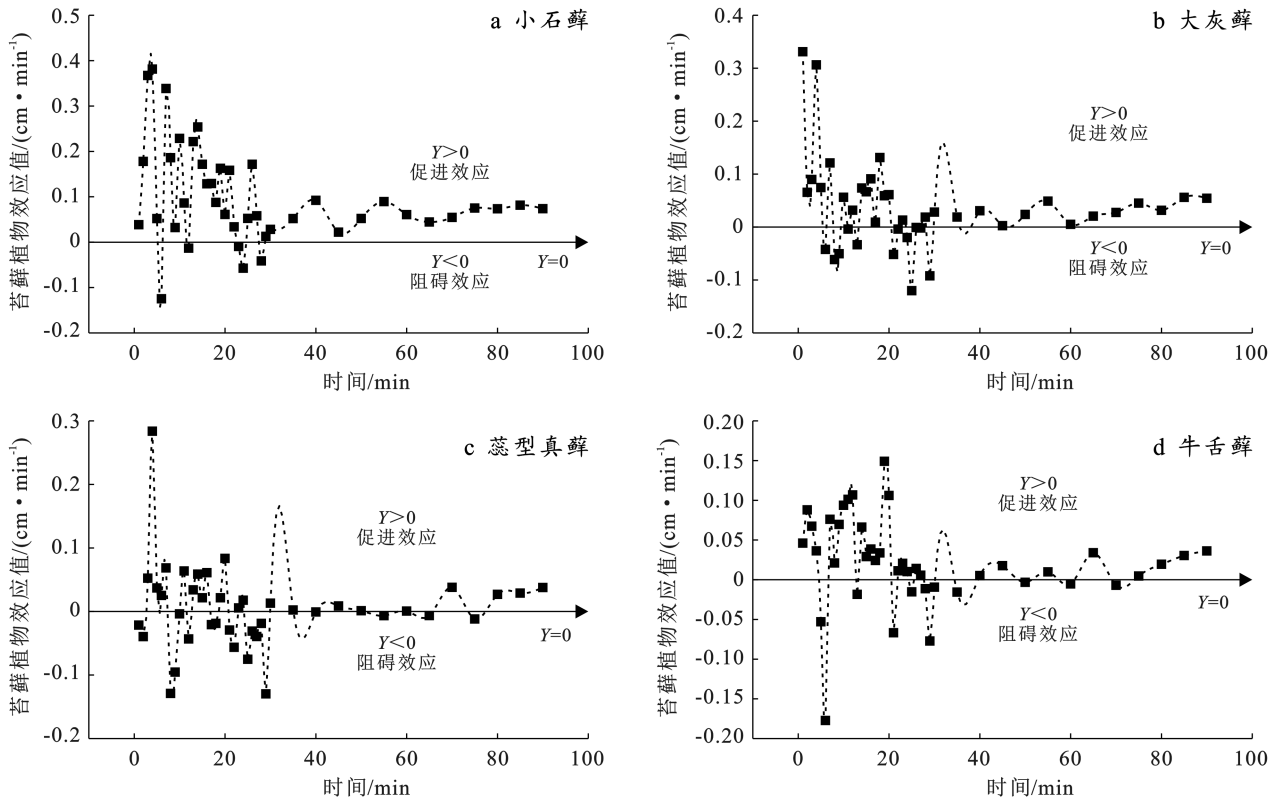


图 3 苔藓植物效应随时间变化曲线

Fig.3 Bryophyte effect change curve over time



a 土柱试验前土壤表层

b 苔藓植物覆盖处理后土壤表层

c 裸土土壤表层

注:因为 4 种苔藓植物覆盖处理后土壤表层观测图差异性不显著,所以图 4b 中选择大灰藓植物覆盖处理的观测图为代表。

图 4 短时 20 mm 强降水后不同处理土壤表层显微镜观测图

Fig.4 Microscopic observation photos of soil surface under different treatments after short time with 20 mm heavy rainfall

2.4 苔藓植物生物学特性对入渗特征的影响

历经短时 20 mm 强降水后苔藓植物入渗特征指标初始入渗速率、稳定入渗速率、平均入渗速率、累计入渗量两两之间相互呈正相关。入渗特征指标与苔藓植物假根密度、假根根长、饱和吸水率呈负相关;与苔藓植物糙率呈正相关,但是相关系数不大(图 5)。

2.5 表层覆盖苔藓植物土壤水分入渗模型模拟

采用 Kostikov, Philip 和 Horton 入渗模型模拟表层覆盖苔藓植物土壤水分入渗过程,模型拟合参数结果详见表 3。Horton, Philip, Kostikov 模型模拟的 R^2 值范围分别为 0.832~0.942, 0.838~0.889 和 0.824~0.885。Horton 入渗模型 R^2 值较大,且该模

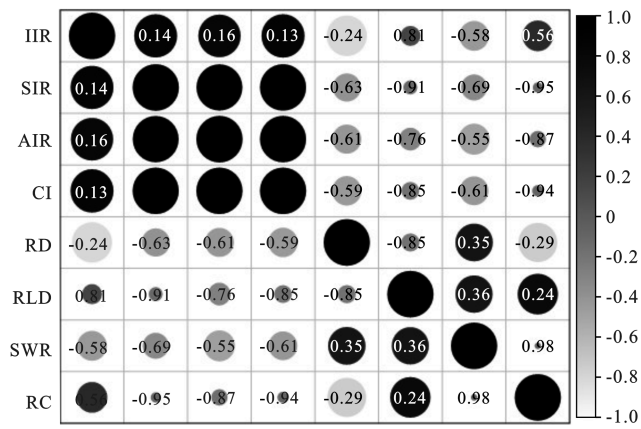
型计算入渗率与实测入渗率之间的相对误差为 12.758%~18.528%较其他两个模型小,所以 Horton 入渗模型更合适模拟表层覆盖苔藓植物的土壤水分入渗过程。而裸土 Horton, Philip, Kostiakov 入渗模

型的 R^2 值分别为 0.866, 0.833 和 0.811, 入渗速率计算相对误差分别为 34.411%, 29.986%, 30.641%, 所以裸土水分入渗过程模拟采用 Philip 入渗模型更合适。

表 3 覆盖不同苔藓植物土壤水分入渗经典模型模拟

Table 3 Classical model simulation of soil water infiltration under different bryophytes

处 理	Horton 入渗模型				Philip 入渗模型			Kostiakov 入渗模型		
	F_0 初始入渗率	F_c 稳定入渗率	K 经验常数	R^2	S 为吸渗率	A 为稳定入渗率	R^2	a 为模型参数	b 为模型参数	R^2
大灰藓	1.968	0.233	0.497	0.942	2.175	0.009	0.868	1.186	0.543	0.885
牛舌藓	1.750	0.236	0.572	0.871	1.740	0.052	0.838	0.939	0.456	0.824
蕊型真藓	1.243	0.206	0.341	0.923	1.712	0.039	0.889	0.916	0.471	0.880
小石藓	1.218	0.273	0.229	0.832	1.996	0.095	0.847	1.061	0.401	0.837
裸土	1.279	0.208	0.451	0.866	1.466	0.058	0.833	0.796	0.433	0.811



注:① IIR 为初始入渗速率, SIR 为稳定入渗速率, AIR 为平均入渗速率, CI 为累计入渗量, RD 为假根密度, RLD 为假根根长, SWR 为饱和吸水率, R 为糙率; ② 灰度越深表示正相关性, 越浅表示负相关性; ③ 圆圈越大表示相关性越大, 圆越小表示相关性越小; 如果相关性 p 值大于 0.05, 则无圆圈展示。

土壤水分入渗参数得到(表 4), 避免了测量诸多水力学参数。3 个人渗模型模拟表层覆盖苔藓植物及裸土土壤水分入渗过程得到的相对误差范围分别为 90.886%~108.903%, 108.558%~119.552%, 35.511%~48.754%(表 5)。

其中, E-Kostiakov 入渗模型相对误差值较小, 精度要求不高的情况下为了简便采用 E-Kostiakov 入渗模型模拟土壤水分入渗过程是可行的。但是 Singh 的熵入渗方程模拟土壤水分入渗的相对误差总体大于 3 个经典入渗模型。总之, 模拟苔藓土壤水分入渗过程精度要求较高的情况下采用经典入渗模型 Horton 更佳, 精度要求不高且为了简便则可以采用 E-Kostiakov 入渗模型。

为了筛选出最优的土壤水分入渗模型, 引入相对误差来反映模型计算入渗率与实测入渗率之间的离散程度, 计算公式为:

$$\delta = \frac{|f_m - f_r|}{f_r} \times 100\% \quad (9)$$

式中: δ 为入渗率相对误差(%); f_m 为模型计算的入渗率(cm/min); f_r 为实测入渗率(cm/min)。

表 4 覆盖不同苔藓植物土壤水分入渗 Singh 的熵入渗模型模拟

Table 4 Singh's entropy infiltration model simulation of water infiltration in soil covering with different bryophytes

处 理	E-Horton 入渗模型	E-Philip 入渗模型	E-Kostiakov 入渗模型
大灰藓	$I(t) = 0.207 + 0.675 \text{EXP}(-0.0298t)$	$I(t) = 1.530t^{(-0.5)} + 0.207$	$I(t) = 1.530t^{(-0.5)}$
牛舌藓	$I(t) = 0.190 + 0.597 \text{EXP}(-0.0284t)$	$I(t) = 1.414t^{(-0.5)} + 0.190$	$I(t) = 1.414t^{(-0.5)}$
蕊型真藓	$I(t) = 0.188 + 0.529 \text{EXP}(-0.0260t)$	$I(t) = 1.383t^{(-0.5)} + 0.188$	$I(t) = 1.383t^{(-0.5)}$
小石藓	$I(t) = 0.242 + 0.673 \text{EXP}(-0.0250t)$	$I(t) = 1.804t^{(-0.5)} + 0.242$	$I(t) = 1.804t^{(-0.5)}$
裸土	$I(t) = 0.168 + 0.498 \text{EXP}(-0.0259t)$	$I(t) = 1.124t^{(-0.5)} + 0.168$	$I(t) = 1.273t^{(-0.5)}$

表 5 模型模拟入渗速率与实测入渗速率的相对误差

Table 5 Relative error between simulated infiltration rate and measured infiltration rate

处 理	入渗速率相对误差/%					
	Horton 模型	Philip 模型	Kostiakov 模型	E-Horton 模型	E-Philip 模型	E-Kostiakov 模型
大灰藓	12.758	20.528	21.716	108.903	119.552	41.955
牛舌藓	16.816	18.151	19.623	94.072	108.558	35.511
蕊型真藓	13.193	17.495	19.623	100.119	118.888	41.293
小石藓	18.528	18.151	19.896	90.886	111.077	36.794
裸 土	34.411	29.986	30.641	101.844	113.062	48.754

3 讨论

3.1 覆盖苔藓植物对黏土水分入渗的影响

由研究可得历经短时 20 mm 强降水后表层覆盖苔藓植物水分入渗特征和裸土明显不同,苔藓植物的存在增加了入渗量(表 2,图 2)。前人^[10] 报道,在强烈事件期间,被物理地壳覆盖的裸露土壤的产沙量比发育良好的生物地壳增加了 60 倍;苔藓具有高渗透性,具有更大的生物量和表面粗糙度,减缓了径流量,延长径流的开始时间;这些研究证明了苔藓植物覆盖在土壤表层能增加入渗速率。一方面,苔藓植物覆盖在土壤表层可阻碍强降水直接冲击土壤表层改变土壤颗粒结构;本次研究结果得到裸土历经强降水后表层土壤颗粒粒径变小,可促使裸土表层产生物理结皮阻塞土壤基质孔隙而导致入渗减少(图 4),与前人研究得到的结论保持一致,物理结皮的特征是土壤的细结构填充小而圆的孔隙成致密的低孔隙层,限制了渗透;1 cm 厚藓结皮可承受的雨滴动能为 62.03 J,是裸土的 344 倍,表明生物结皮的形成、发育增强了土壤的抗侵蚀能力^[11-12]。另一方面,苔藓植物覆盖在土壤表层对水分入渗产生阻碍作用,但是该阻碍作用小于强降水下苔藓植物阻碍土壤表层产生物理结皮促进水分入渗效应。Warren 研究表明生物结皮的存在改变土壤空隙促进水分入渗的影响大于生物结皮阻塞土壤孔隙的影响^[13-15]。苔藓植物虽然可以通过吸水膨胀阻止水分进入土壤孔隙来减少渗透^[11],但苔藓植物层犹如一层薄海绵,保护表层土壤物理性质维持原状,土壤颗粒粒径和空隙不被减小而增加水分入渗。粗颗粒中土壤孔隙大、入渗快,而裸土细结构土壤的特点是孔隙窄,减少了水的流动^[13-14]。所以,苔藓植物通过影响水分入渗的界面而使入渗特征发生变化;表层人为覆盖苔藓对入渗的影响划分为苔藓植物层对入渗的影响和苔藓植物的存在阻碍表层土壤性质的改变两类。历经短时 20 mm 强降水后表层覆盖苔藓植物在入渗过程中产生的效应为阻碍土壤表层产生物理结皮促进水分入渗效应

大于苔藓植物层截留阻碍土壤水分入渗效应,与 Eigel, Moore 等人的研究结论得到土壤物理结皮对裸地入渗的影响大大超过其他因素的影响,其减少入渗量可达 80% 左右保持一致^[16]。

苔藓植物覆盖下水分入渗特征因苔藓植物生物学特征不同而具有显著性差异。历经短时 20 mm 强降水后 4 种苔藓植物对水分入渗产生促进或阻碍效应具有差别。一方面,不同苔藓植物在短时强降水下维持表层土壤的原状特征阻碍产生物理结皮的效应具有差异性,但是本次研究中大灰藓、牛舌藓、蕊型真藓和小石藓 4 种苔藓覆盖下土壤表层显微镜成像差异性不显著(图 4),有必要进一步采用更精密的仪器研究短时强降水下不同苔藓植物覆盖的土壤表层结构特征。另一方面,与不同苔藓植物层截留阻碍土壤水分入渗有关。小石藓水分入渗以促进效应为主,该苔藓假根密度较牛舌藓和蕊型真藓低且糙率较大,植株体之间较大的空隙为水分入渗提供通道,且小石藓饱和吸水率低不易形成密闭的水层阻碍水分入渗;前人研究苔藓植物较大的糙率可以延长产生径流的时间,使入渗速率增加^[17]。大灰藓和牛舌藓入渗开始 0—20 min 以促进效应为主,20—30 min 以阻碍水分入渗为主;因为入渗初期大灰藓和牛舌藓植株体之间的空隙为水分入渗提供通道,随着入渗的进行,大灰藓较大的饱和吸水率和较长的假根等因素影响可能导致土壤水分入渗受阻,而牛舌藓较大的假根密度和饱和吸水率等因素的影响使其表层形成较为密闭的水层阻碍土壤水分入渗。蕊型真藓促进水分入渗效应和阻碍效应差异不显著,因为该苔藓植物假根密度和饱和吸水率值最大使其作为覆盖层阻碍水分入渗的效应更显著(图 5)。这些研究结论与前人研究得到不同植被覆盖下,土壤的孔性及渗透性有明显差别,进而影响到土壤水分入渗的结论保持一致^[18]。

3.2 水分入渗模型分析

通过模型模拟表层覆盖苔藓植物的土壤水分入渗过程得到需要标定参数的经典模型组效果优于 Singh 的嫡入渗模型组(表 5),但对水分入渗模拟精

度要求不高的情况下,为了简便则可以采用 E-Kostiakov 入渗模型。与丰雪等人利用土柱试验,对比研究一般入渗方程和嫡入渗方程对沙壤土、黏壤土 2 种均质土壤条件下水分入渗过程的模拟,得到在黏壤土中需要标定参数的一般入渗方程的相对误差较嫡入渗方程小的研究结论保持一致^[19]。因为 Singh 的嫡入渗方程假设土壤是干燥的,在不限制供水的情况下向干燥的土壤提供水分,将入渗量作为随机变量,用面积的函数表示入渗量的累积概率分布,是一个概率密度函数,利用嫡理论推导渗透速率作为时间的函数,将相关参数由入渗实测值进行表示^[20];且 Burgy 和 Luthin 研究发现即使在相对均匀的土壤(均匀的粉砂壤土)和小面积(12.19 m×6.10 m)上,入渗能力也有很大的变化^[21],所以用现场或试验测量校准的入渗参数来模拟整个入渗过程比直接由实测值标定的入渗方程的模拟值相对误差更大。经典方程中 Horton 入渗模型对表层覆盖苔藓植物的土壤水分入渗过程的模拟效果最佳,因为 Horton 模型为半经验模型,可以描述水分入渗特征,且模型参数具有物理意义^[22];此研究结论和王翠萍、张侃侃等人^[23]研究结论表明生物结皮土壤水分入渗过程模拟使用 Horton 入渗模型效果较好保持一致。而 Kostiakov 模型为纯经验模型,由试验或实测资料拟合得出,本身并无物理意义,参数较少,虽然该模型在生产与实践中应用较广但在该研究中并不是最优模型^[24]。Philip 模型对裸土水分入渗过程模拟效果较好,因为 Philip 模型是在半无限均质土壤并有积水条件下求得的物理模型,只适用于均质土壤一维入渗,而本次试验裸土是均值土壤,所以该模型模拟效果较好^[25]。综上所述,用 Horton 模型模拟苔藓植物覆盖下土壤水分入渗过程效果更佳,用 Philip 模型模拟裸土入渗效果较好;在精度要求不高情况下,为了简便可以采用 E-Kostiakov 入渗模型。

4 结论

(1) 与裸土相比,历经短时 20 mm 强降水后土壤表层覆盖苔藓植物,入渗特征初始、稳定、平均入渗速率和累计入渗量均大于裸土($p < 0.05$),入渗速率最慢的蕊型真藓组 4 个入渗特征较裸土分别增加了 7.65%, 8.56%, 11.90% 和 3.75%; 表面表层覆盖苔藓植物有利于土壤水土入渗对减少径流侵蚀重要意义。

(2) 表层覆盖苔藓植物促进水分入渗主要通过保护土壤表层孔隙率不被减小而增强水分渗透,这种效应大于苔藓植物层截留阻碍水分入渗效应; 4 种苔藓植物对水分入渗产生促进或阻碍效应因苔藓植物

生理特性不同而具有差异性;与苔藓植物假根密度、假根根长、饱和吸水率呈负相关,与苔藓植物糙率呈正相关,但是相关系数不大。

(3) 表层覆盖苔藓植物土壤水分入渗过程采用经典入渗模型 Horton 更佳,而裸土水分入渗则采用 Philip 模型效果更好;若精度要求不高且为了简便则可以采用 Singh 的嫡入渗方程 E-Kostiakov 入渗模型。

[参 考 文 献]

- [1] 水利部. 2020 年全国水土流失动态监测成果显示: 我国生态环境状况持续向好 [EB/OL] (2021-06-08) [2022-04-04]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-06/08/content_5616233.htm 水利部网站, 2021.
- [2] 水利部. 水利部办公厅关于进一步加强生产建设项目水土保持监测工作的通知 [R]. 中华人民共和国水利部公报, 2020(3): 30-32.
- [3] 张显强, 曾建军, 湛金吾, 等. 石漠化干旱环境中石生藓类水分吸收特征及其结构适应性 [J]. 生态学报, 2012, 32(12): 3902-3911.
- [4] 龙朝波, 张朝晖. 喀斯特石漠化山区苔藓植物水分吸收特征 [J]. 水土保持通报, 2015, 35(2): 350-355.
- [5] 张思琪, 张科利, 曹梓豪, 等. 喀斯特坡面生物结皮发育特征及其对土壤水分入渗的影响 [J]. 应用生态学报, 2021, 32(8): 2875-2885.
- [6] Williams J D, Dobrowolski J P, West N E. Microbiotic crust influence on unsaturated hydraulic conductivity [J]. Arid Soil Research and Rehabilitation, 1999, 13(2): 145-154.
- [7] Chen Ning, Wang Xinping, Zhang Yafeng, et al. Ecohydrological effects of biological soil crust on the vegetation dynamics of restoration in a dryland ecosystem [J]. Journal of Hydrology, 2018, 563: 1068-1077.
- [8] Eldridge. New frontiers in bryology and lichenology-ecology and management of biological soil crusts: Recent developments and future challenges [J]. Bryologist, 2000, 103(4): 742-747.
- [9] 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.
- [10] Carvalho R C, Bernardes da Silva, Branquinho C, et al. Influence of dehydration rate on cell sucrose and water relations parameters in an inducible desiccation tolerant aquatic bryophyte [J]. Environmental & Experimental Botany, 2015, 120: 18-22.
- [11] Brunialti G, Ravera S. Lichens and bryophytes as indicators of old-growth features in Mediterranean forests [J]. Plant Biosystems, 2010, 144(1): 221-233.
- [12] 李鑫浩, 曹文华, 牛勇, 等. 黄泛平原区风沙土物理结皮硬度和厚度特征及其影响因素 [J]. 水土保持通报, 2022, 42(1): 63-68, 76.

- 植被恢复模式研究[J].公路,2013,58(11):237-240.
- [9] 张党正,张志强,姚嘉林,等.内蒙古经乌高速公路绿色公路建设探索与实践[J].公路,2021,66(7):176-183.
- [10] 李生字,范敬龙,王海峰,等.蒙古高原交通干线风沙(雪)危害防治技术方案[J].干旱区研究,2021,38(6):1760-1770.
- [11] 董治宝,陈渭南,李振山,等.植被对土壤风蚀影响作用的实验研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1996,2(2):1-8.
- [12] 黄富祥,王明星,王跃思.植被覆盖对风蚀地表保护作用研究的某些新进展[J].植物生态学报,2002,26(5):627-633.
- [13] 吴晓光,姚云峰,迟文峰,等.1990—2015年内蒙古高原土壤风蚀时空差异特征[J].中国农业大学学报,2020,25(3):117-127.
- [14] 王强强,唐进年,杨自辉,等.不同配置固沙林的防风阻沙效果[J].西北林学院学报,2020,35(3):177-184.
- [15] 张奕,肖辉杰,辛智鸣,等.乌兰布和沙区典型灌木防风阻沙效益[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(1):87-96.
- [16] 余沛东,陈银萍,李玉强,等.植被盖度对沙丘风沙流结构及风蚀量的影响[J].中国沙漠,2019,39(5):29-36.
- [17] 刘艳萍,刘铁军,蒙仲举.草原区植被对土壤风蚀影响的风洞模拟试验研究[J].中国沙漠,2013,33(3):668-672.
- [18] 邢恩德,马少薇,郭建英,等.植被盖度对典型草原区地表风沙流结构及风蚀量影响[J].水土保持研究,2015,22(6):331-334.
- [19] 潘高娃.正确认识沙地和沙漠:浑善达克沙地桑根达来地段植被调查[J].环境与发展,2015,27(1):5-12.
- [20] 范贵生.可移动式风蚀风洞设计及其空气动力学性能研究[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2005.
- [21] 白红梅,李钢铁,马骏骥,等.浑善达克沙地微地形植被特征分析[J].北方园艺,2015(17):53-57.
- [22] 麻硕士,陈智.土壤风蚀测试与控制技术[M].北京:科学出版社,2010.
- [23] 陈智,麻硕士,赵永来,等.保护性耕作农田地表风沙流特性[J].农业工程学报,2010,26(1):118-122.
- [24] 朱朝云,丁国栋,杨明远.风沙物理学[M].北京:中国林业出版社,1992.
- [25] 王仁德,李庆,常春平,等.土壤风蚀野外测量技术研究进展[J].中国沙漠,2019,39(4):113-128.
- [26] 孙悦超,麻硕士,陈智,等.植被盖度和残茬高度对保护性耕作农田防风蚀效果的影响[J].农业工程学报,2010,26(8):156-159.

(上接第9页)

- [13] Chamizo S, Yolanda Cantón, 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.
- [14] 吴佩瑶,秦富仓,董晓宇,等.坡度影响下的砒砂岩区裸露坡面水分入渗特征及模拟[J].水土保持学报,2022,36(2):64-69.
- [15] Warren S D, Stark L R, Lewis L A, et al. Reproduction and dispersal of biological soil crust organisms [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2019,7:344.
- [16] Sloan P G, Moore I D, Coltharp G B, et al. Modeling surface and subsurface stormflow on steeply-sloping forested watersheds [J]. Water Resources Research, 1984,20(12):1851-1862.
- [17] Li Bai, Gao Jiarong, Wang Xiuru, et al. Effects of biological soil crusts on water infiltration and evaporation Yanchi Ningxia, Maowusu Desert, China [J]. International Journal of Sediment Research, 2016,31(4):311-323.
- [18] 刘焕焕,王改玲,殷海善,等.红枣经济林不同植被覆盖土壤水分入渗特征[J].灌溉排水学报,2020,39(4):52-58.
- [19] 丰雪,张阒,李波,等.基于信息熵方法的土壤水分入渗方程试验研究[J].水土保持学报,2017,31(2):57-61.
- [20] Singh V P. Entropy theory for derivation of infiltration equations [J]. Transactions of the Asabe, 2012,46(3):374-381.
- [21] Burgy R H, Luthin J N. Discussion of "A Test of the single-and double-ring types of infiltrometers" [J]. Transactions American Geophysical Union, 1957,38(2):260-261.
- [22] 雷文娟,唐翔宇.土壤水分入渗和再分布过程的信息熵演变特征[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(1):39-45.
- [23] 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[J].干旱区研究,2011,28(5):808-812.
- [24] 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.
- [25] 范严伟,赵文举,王昱.入渗水头对垂直一维入渗 Philip 模型参数的影响[J].兰州理工大学学报,2015,41(1):65-70.