

踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响

石亚芳^{1,2} 赵允格^{2*} 李晨辉^{1,2} 王闪闪^{1,2} 杨巧云^{1,2} 谢申琦^{1,2}

(¹西北农林科技大学资源与环境学院, 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)

摘要 采用人工模拟降雨试验,研究了踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响。结果表明:踩踏干扰显著增加了土壤表面粗糙度,增加幅度与干扰强度有关,50%干扰度下表面粗糙度指数较不干扰增加91%。踩踏干扰延长了坡面产流时间,20%~50%干扰度范围内,随着干扰强度的增加,初始产流时间呈线性增加趋势,50%干扰度的初始产流时间较不干扰增加了169.7%。踩踏干扰增加了土壤渗透性,降低径流系数,50%干扰度的土壤累积入渗量较不干扰增加12.6%;去除生物结皮,土壤渗透性降低,累积入渗量较不干扰降低30.2%。50%以下的干扰度未显著增加土壤侵蚀模数。去除生物结皮,土壤侵蚀模数较不干扰增加10倍。生物结皮破碎度低于50%的干扰在不明显增加土壤流失量的前提下,可增加降水入渗,减小径流风险,改善土壤水分状况。

关键词 退耕地; 生物结皮; 入渗; 表面粗糙度; 径流

Effect of trampling disturbance on soil infiltration of biological soil crusts. SHI Ya-fang^{1,2}, ZHAO Yun-ge^{2*}, LI Chen-hui^{1,2}, WANG Shan-shan^{1,2}, YANG Qiao-yun^{1,2}, XIE Shen-qi^{1,2} (¹College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²State 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 Resource, Yangling 712100, Shaanxi, China).

Abstract: The effect of trampling disturbance on soil infiltration of biological soil crusts was investigated by using simulated rainfall. The results showed that the trampling disturbance significantly increased soil surface roughness. The increasing extent depended on the disturbance intensity. Soil surface roughness values at 50% disturbance increased by 91% compared with the undisturbed treatment. The runoff was delayed by trampling disturbance. A linear increase in the time of runoff yield was observed along with the increasing disturbance intensity within 20%–50%. The time of runoff yield at 50% disturbance increased by 169.7% compared with the undisturbed treatment. Trampling disturbance increased soil infiltration and consequently decreased the runoff coefficient. The cumulative infiltration amount at 50% disturbance increased by 12.6% compared with the undisturbed treatment. Soil infiltration significant decreased when biocrusts were removed. The cumulative infiltration of the treatment of biocrusts removal decreased by 30.2% compared with the undisturbed treatment. Trampling disturbance did not significantly increase the soil loss when the disturbance intensity was lower than 50%, while the biocrusts removal resulted in 10 times higher in soil erosion modulus. The trampling disturbance of lower than 50% on biocrusts might improve soil infiltration and reduce the risk of runoff, thus might improve the soil moisture without obviously increasing the soil loss.

Key words: revegetated grassland; biological soil crust; infiltration; surface roughness; runoff.

本文由国家自然科学基金项目(41571268,41271298)资助 This work was supported by the National Natural Science Foundation (41571268, 41271298).

2016-12-23 Received, 2017-05-17 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyunge@ms.iswc.ac.cn

生物土壤结皮(生物结皮)指由生长在土壤表面及其以下的藻类、苔藓、地衣以及细菌、真菌等个体微小的生物成分与土壤相互作用形成的复杂复合土层^[1]. 在我国的黄土丘陵区, 由于退耕还林草生态工程的实施, 生物结皮盖度可达 70% 以上^[2], 显著影响土壤理化属性^[3]、表面粗糙度^[4]和土壤水分渗透性^[5-6].

降水是干旱半干旱地区土壤水分的主要来源. 增加入渗、就地拦蓄降雨是防治水土流失的基本措施^[7]. 生物结皮是干旱半干旱地区土壤水分循环过程的重要影响因子^[8], 对水分入渗的影响主要取决于土壤质地和结构、结皮盖度和组成、气候(主要是降雨)和干扰状况^[9]. 发育良好的生物结皮可在地表形成一层紧密外壳^[10]、改变表层土壤理化性质, 从而影响土壤水分入渗. 目前, 关于生物结皮对水分入渗的影响已有大量研究. 如熊好琴等^[11]发现, 生物结皮通过降低水分的入渗速率和自然降雨的下渗深度, 使下渗水分减少. 李小军等^[12]认为, 生物结皮斑块降低了水分入渗, 促进了地表径流的形成. Zhao 等^[13]在黄土丘陵区也得到了相似的结论. 张培培等^[14]发现, 生物结皮增加了土壤斥水性, 间接说明生物结皮会减小入渗. 肖波等^[15]对比不同对照和季节下土壤水分入渗特征发现, 以无结皮、物理结皮、去除生物结皮为对照, 会得出不同的结果. 在雨季和非雨季中结皮对导水率的影响也会显著不同.

干扰是自然界普遍存在的现象. 以藻类、苔藓类及地衣类等变水植物为主要成分的地表生物结皮, 在干燥休眠状况下脆弱易碎, 对各种自然和人为干扰, 包括火烧、踩踏、机械碾压、翻耕等非常敏感^[16-17]. 有研究指出, 干扰可以显著降低生物结皮的盖度, 特别是降低苔藓、地衣类等高级演替阶段的成分的盖度, 显著降低生物结皮的水土保持等生态功能, 降低程度与干扰方式、强度、频率、季节及土壤类型等有关^[18]. 来自干旱荒漠区的研究表明, 干扰可以增加生物结皮土壤的水分渗透性^[18-19]. 但在我国黄土高原半干旱地区, 将生物结皮与干扰联系起来的研究较少, 适度干扰是否可以改善生物结皮土壤渗透性尚不明确.

鉴于此, 本文采用人工模拟降雨法, 以填装土槽上自然发育达 8 年的生物结皮为对象, 以不干扰为对照, 研究生物结皮 20%、30%、40%、50% 和 100% (去除生物结皮) 干扰度对土壤表面粗糙度、产流时间、初始入渗速率、稳定入渗速率、入渗过程、径流系数以及累积入渗量、土壤侵蚀模数等的影响, 以期揭

示干扰对生物结皮土壤入渗的影响, 为黄土高原生态恢复和退耕地科学管理提供依据.

1 材料与方法

1.1 试验条件

试验在陕西杨凌的中国科学院水土保持研究所人工模拟降雨大厅进行. 采用侧喷式人工降雨装置, 降雨高度为 16 m, 模拟降雨雨滴的分布、大小及终点速度近似天然降雨. 2008 年, 自制移动变坡式土槽 12 个, 尺寸规格为: 长×宽×高=2.0 m×1.0 m×0.5 m, 以陕西安塞县坡耕地表层(0~20 cm)土壤填装土槽, 控制土壤容重在 $1.2 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右, 分层装土, 每层厚度 10 cm, 边装边压实, 在填装下一土层之前将表土打毛, 以消除不同层次之间的垂直层理. 土槽填土结束后, 将表土面整平使之与槽底平行, 以保证试验条件的一致性. 填土总高度 40 cm. 填装完成后, 生物结皮自然发育演替, 至试验进行时生物结皮已发育 8 年. 槽子在生物结皮发育的同时也有植物及枯落物. 另外, 由于蚂蚁、昆虫等小型动物的干扰, 土槽在人为干扰前就有一定面积扰动裸土. 试验时为了排除植物的影响, 剪去植物地上部分. 模拟降雨试验前不同干扰强度下生物结皮的盖度、厚度见表 1.

1.2 试验设计

试验以不干扰生物结皮土槽为对照, 原设 6 个干扰强度, 由低到高分别为 10%、20%、30%、40%、50%、100%, 其中, 100% 干扰为去除生物结皮. 干扰强度以生物结皮的破碎度来计. 干扰以自行设计加工的羊蹄状工具进行, 干扰力度按照羊只的平均质量(30 kg 左右)计.

干扰处理: 选取结皮发育不均的 3 个土槽进行去除生物结皮处理, 3 个发育状况良好的土槽不做

表 1 不同干扰强度生物结皮基本特征

Table 1 Basic characteristics of biocrusts under different disturbance intensities

干扰强度 Disturbance intensity (%)	藻结皮盖度 Cyanobacteria coverage (%)	藓结皮盖度 Moss coverage (%)	扰动后 裸土盖度 Bare soil coverage (%)	生物结皮厚度 Biocrust thickness (mm)
0	62.8±9.9	9.4±3.9	14.7±6.1	1.76±0.12
20	52.5±15.1	23.2±15.8	18.0±1.8	1.63±0.09
30	47.9±6.8	15.7±4.6	29.7±2.0	1.64±0.16
40	50.3±3.6	5.4±3.7	41.8±1.1	1.59±0.12
50	43.2±1.8	0.5±0.4	56.3±1.8	1.51±0.12
100	-	-	100	-

0% 指不干扰, 100% 指去除生物结皮处理. 0% meant undisturbed, 100% meant removed biocrusts. 下同 The same below.

干扰使用.其余 6 个土槽干扰为 10% 和 20% ,进行降雨试验.降雨后 将以上 6 个土槽风干至初始含水量(0.13 ± 0.01) $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,干扰至更大干扰强度(30%、40%和 50%) 重复使用.试验用土槽存在小昆虫(主要是蚂蚁)的自然干扰,导致生物结皮实际破碎度超过了预设干扰度.本文根据土槽生物结皮的实际破碎度重新对各干扰度进行分组,因此,本研究中不干扰、去除生物结皮、20%和 50%干扰度各有 3 个重复,30%干扰度有 4 个重复,40%干扰度有 5 个重复.

模拟降雨试验: 模拟降雨于 2016 年 7—8 月进行.为了探明大暴雨条件下干扰对生物结皮的水流失效效应,模拟降雨雨强设为 $90 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$,降雨历时 30 min.土槽含水量根据研究区雨季平均土壤含水量控制在 (0.13 ± 0.01) $\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$,土槽坡度选取黄土高原常见的退耕坡度 15° .降雨前率定雨强至目标雨强 $\pm 5 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ 后,开始试验.降雨后将槽子风干至降雨前含水量,然后在土槽上继续干扰,破碎成较大干扰度,以排除土槽前次降雨产生的物理结皮的影响.

1.3 测定项目与方法

自模拟降雨试验开始每 2 min 接一次径流至降雨结束,称量径流和泥沙.入渗率计算以水量平衡为基础,即:

$$P = R_t + I \quad (1)$$

式中: P 为降雨量 (mL); R_t 为径流量 (mL); I 为入渗量 (mL).

根据一定时间内降雨量 (P) 和径流量 (R_s) 可以算出入渗率 (i , $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$):

$$P = R(t_{i+1} - t_i) S \cos \alpha \quad (2)$$

$$i = \frac{P - R_s}{S(t_{i+1} - t_i)} \quad (3)$$

式中: R 为降雨强度 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); t_i 、 t_{i+1} 为各时段始末时间 (min); S 为土槽坡面面积 (mm^2); α 为土槽坡度; R_s 为各时段对应的地表径流量 (mL).

土槽径流系数 (a) 和土壤侵蚀模数 (e , $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 的计算公式如下:

$$a = R_t / P \quad (4)$$

$$e = m / (s \cdot t \times 10^{-6}) \quad (5)$$

式中: R_t 为径流总量 (mL); P 为降雨总量 (mL); m 为泥沙总量 (g); S 为土槽坡面面积 (mm^2); t 为降雨历时 (h).

供试土槽表面特征指标及测定: 1) 生物结皮盖

度: 在土槽中随机选取 10 个点布设 $25 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$ 样方,记录样方中藻、藓、裸土、植物根基、枯落物出现的频次,以各类物种在调查总点数的百分数计算其相应的覆盖度^[20]. 2) 生物结皮的厚度: 用小刀分离生物结皮,用游标卡尺测量 4 个方向的厚度,取平均值.每干扰度重复 3 次. 3) 供试土槽地表糙度: 采用链条法^[4].其原理是: 当给定长度 (L_1 , mm) 的链条置于地表时,其水平长度 (L_2 , mm) 随着结皮表面糙度的增加而减小,根据链条长度的减小值即可计算出表面糙度指数 (Cr): $Cr = (1 - L_2 / L_1) \times 100\%$. 本研究中选用 L_1 为 200 mm、链条直径 0.91 mm、链节长 1.12 mm 的链条.

1.4 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件进行数据统计分析.对不同处理土槽的粗糙度指数、坡面产流时间、初始入渗速率、稳定入渗速率、径流系数、累积入渗量进行单因素方差分析和 LSD 多重比较.由于生物结皮空间变异较大,如果显著水平设置为 $\alpha = 0.05$,则很难区分干扰强度间的差异.为较好地反映处理间的差异,使得研究结果更明了,将显著性水平设定为 $\alpha = 0.1$.用 Origin 7.5 软件作图,图中数据为平均值 \pm 标准误.

2 结果与分析

2.1 干扰对生物结皮表面粗糙度的影响

干扰显著增加了土壤表面粗糙度,影响程度与干扰强度有关(图 1).不同干扰度处理下粗糙度指数在 4.0%~7.7%.其中,不干扰下粗糙度指数为 4.0%,20%、30%、40%、50%和 100%干扰度处理下粗糙度指数较不干扰均有不同程度的增加,增幅分别为 48.4%、62.7%、62.1%、90.6%和 45.9%.去除生

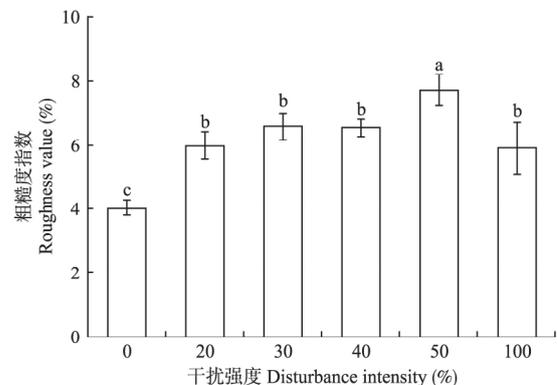


图 1 不同干扰强度下表面粗糙度

Fig.1 Roughness of different disturbance intensities.

不同小写字母表示不同干扰强度间差异显著 ($P < 0.1$). Different small letters indicated significant difference among different disturbance intensities at 0.1 level. 下同 The same below.

物结皮、20%、30%、40%干扰度处理之间差异不显著。50%干扰度下表面粗糙度指数显著大于其他处理。

2.2 干扰对生物结皮入渗过程的影响

干扰显著增加了瞬时入渗速率(图2)。不干扰、20%、30%、40%、50%干扰度土壤入渗速率过程曲线初始数值(2 min时的入渗速率)分别为1.48、1.47、1.48、1.49、1.49 mm·min⁻¹。不干扰、20%、30%干扰度6 min内入渗速率降幅分别为11.5%、11.3%和8.1%;40%、50%干扰的入渗速率稳定4 min之后平稳降低,前6 min入渗速率降幅为7.6%、1.5%,随后平稳降低;去除生物结皮2 min时入渗速率为1.39 mm·min⁻¹,6 min内迅速降低至0.81 mm·min⁻¹,降幅达41.9%。这与雨滴击打产生的物理结皮有关。降雨6 min之后,20%~50%干扰的瞬时入渗速率大于不干扰和去除生物结皮。

2.3 干扰对生物结皮坡面产流时间的影响

干扰延长了坡面产流时间,增加程度与干扰强度有关(图3)。20%~50%干扰强度范围内,随着干扰度的增加,产流时间呈线性增加趋势。不干扰产流时间为1.54 min,20%干扰产流时间(1.34 min)与不干扰差异不显著,30%、40%、50%干扰下的产流时间分别为1.96、2.94、4.15 min,较不干扰分别增加了27.3%、90.9%和169.7%,差异显著。去除生物结皮的初始产流时间(1.12 min)与不干扰差异不显著,这可能与去除生物结皮后形成的物理结皮有关。

2.4 干扰对生物结皮土壤初始入渗速率和稳定入渗速率的影响

20%~50%干扰度下初始入渗速率在1.43~1.49 mm·min⁻¹(图4),与不干扰(1.46 mm·min⁻¹)

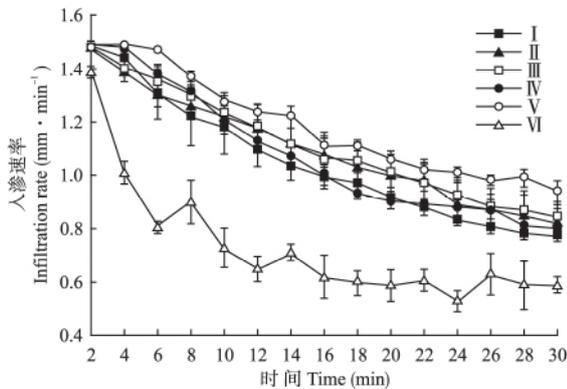


图2 不同干扰强度下入渗过程曲线
Fig.2 Infiltration process curves under different disturbance intensities.

I: 不干扰 No disturbance; II: 20%干扰 20% disturbance; III: 30%干扰 30% disturbance; IV: 40%干扰 40% disturbance; V: 50%干扰 50% disturbance; VI: 去除生物结皮 Removed biocrust.

差异不显著。去除生物结皮的初始入渗速率(1.20 mm·min⁻¹)显著低于其他处理。去除生物结皮,初始入渗速率较不干扰显著降低了17.4%。

不干扰的稳定入渗速率为0.79 mm·min⁻¹,20%、30%、40%干扰的稳定入渗速率分别为0.85、0.87、0.82 mm·min⁻¹,较不干扰有增加趋势,未达到显著水平。50%干扰的稳定入渗速率(0.97 mm·min⁻¹)较不干扰显著增加了22.6%。去除生物结皮的稳定入渗速率(0.60 mm·min⁻¹)显著低于其

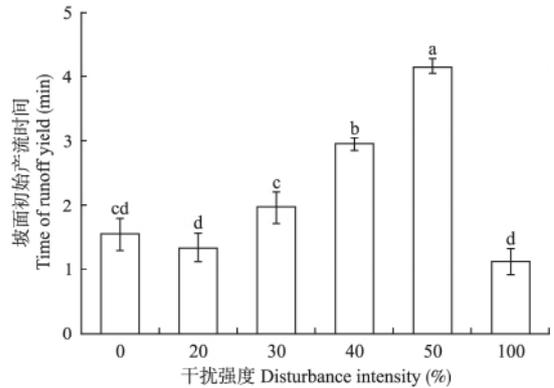


图3 不同干扰强度下坡面初始产流时间
Fig.3 Time of runoff yield under different disturbance intensities.

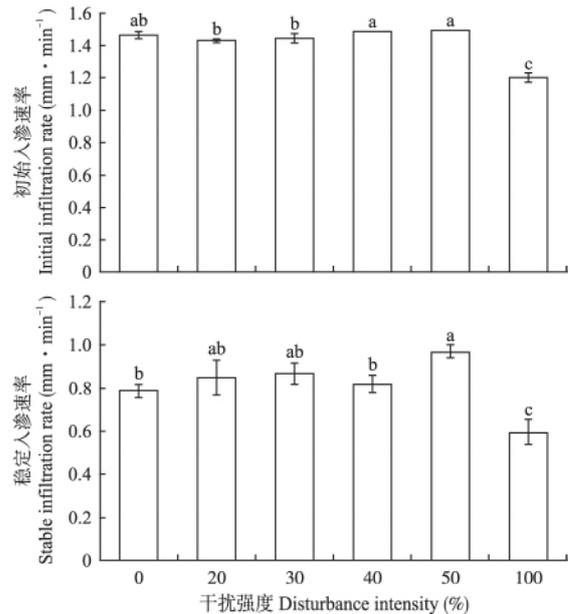


图4 不同干扰强度的初始入渗速率和稳定入渗速率
Fig.4 Initial infiltration rate and stable infiltration rate under different disturbance intensities.

初始入渗速率为降雨自开始至4 min内的平均入渗速率,稳定入渗速率为降雨第26~30 min的平均入渗速率。The initial infiltration rate was the average infiltration rate within the first 4 min at the beginning of the rainfall, and the stable infiltration rate was the average infiltration rate within the last 26-30 min at the end of the rainfall.

他干扰强度.去除生物结皮的稳定入渗速率较不干扰减少 23.4%.

2.5 干扰对生物结皮土壤径流系数和累积入渗量的影响

干扰显著影响生物结皮土壤的径流系数(图5) 影响程度与干扰强度有关.不干扰的径流系数为 0.30, 20%、30%、40% 干扰的径流系数分别为 0.27、0.26、0.28, 较不干扰有降低趋势, 但差异不显著. 50% 干扰的径流系数(0.21) 较不干扰显著降低 30.1%. 去除生物结皮径流系数(0.51) 显著高于其他处理. 去除生物结皮的径流系数较不干扰增加 70.9%.

干扰显著影响生物结皮土壤的累积入渗量(图5). 不干扰的累积入渗量为 31.5 mm, 20%、30%、40% 干扰的累积入渗量分别为 32.9、33.4、32.3, 与不干扰差异不显著. 50% 干扰的累积入渗量(35.4 mm) 较不干扰显著增加 12.6%. 去除生物结皮的累积入渗量(22.0 mm) 显著高于其他各处理. 去除生物结皮的累积入渗量较不干扰显著降低 30.2%.

2.6 干扰对生物结皮土壤侵蚀模数的影响

由图6可以看出, 去除生物结皮的土壤侵蚀模数达 $4960 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 较不干扰增加了 10 倍. 不同干扰度处理下土壤侵蚀模数在 $350 \sim 730 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 处理之间差异不显著.

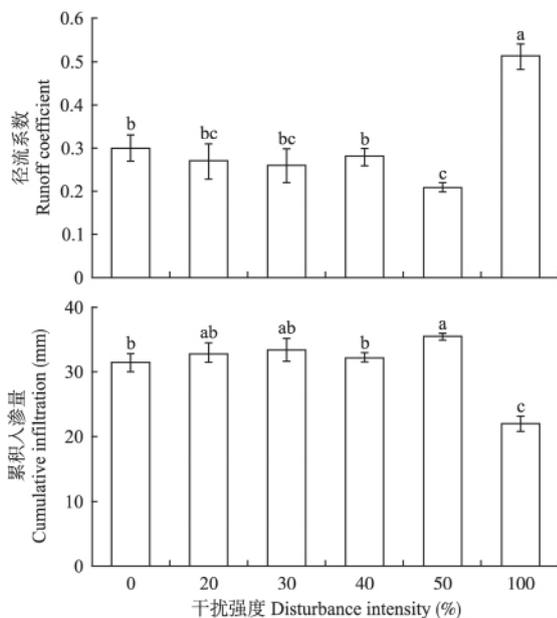


图5 不同干扰强度下径流系数和累积入渗量

Fig. 5 Runoff coefficient and cumulative infiltration under different disturbance intensities.

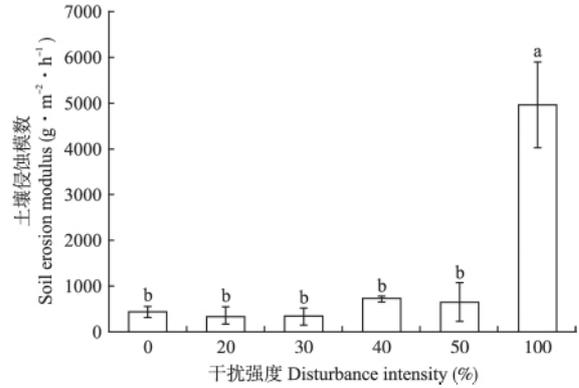


图6 不同干扰强度下土壤侵蚀模数

Fig. 6 Soil erosion modulus under different disturbance intensities.

3 讨 论

土壤渗透性是多因子综合作用的结果, 表层土壤是土壤水分入渗的重要介质^[21]. 生物结皮在土壤表层形成特殊的结构, 改变土壤表层特征, 造成了土壤物理性质在土壤剖面上的不连续性^[6], 改变了土壤水文过程. 有研究表明, 生物结皮是在干旱半干旱地区阻碍降雨入渗速率的主要因子^[22], 这与生物结皮本身的致密程度有关^[23]. 生物结皮的发育条件、发育过程和发育特征不同, 其本身的致密程度不同, 对降水入渗的影响亦不同. 其原因可能是微生物体所分泌的胞外多糖等化学物质吸水膨胀^[24], 填充土壤孔隙, 或者在地表形成一层疏水性膜, 堵塞结皮中的孔隙结构, 阻碍水分入渗^[25].

干扰打破生物结皮的完整性, 可能增加土壤水分入渗. 本研究利用人工模拟降雨法, 研究了干扰对生物结皮渗透性的影响. 结果表明, 干扰有增加入渗、降低径流系数的趋势, 在生物结皮破碎一半(50%干扰度)时才有显著变化(图5). 土壤渗透性的增加, 主要通过增加稳定入渗速率来实现. 本研究表明, 50%干扰度显著增加了生物结皮土壤的稳定入渗速率(图4), 一方面, 可能是因为干扰打破了生物结皮的致密结构, 增加了土壤的通气性和透水性^[26], 增加了土壤渗透性; 另一方面, 也与踩踏干扰显著增大了生物结皮土壤表面粗糙度(图1), 延长了坡面产流时间(图3)有关. 土壤表面粗糙度扩大了地表的表面积, 改变了地表的微地形和坡面径流的路径, 对降雨的阻截作用增强, 延长了水分在结皮层中的保持时间^[27-28], 进而增加了水分入渗. 黄土区的研究结果同样表明, 较大的地表粗糙度可以减少或延缓降雨前期的径流损失, 增加蓄水量^[29].

有研究表明,在干旱半干旱地区,雨季前的适当人为活动(割草、放牧或者火灾等),可以破坏地表的生物结皮,有利于土壤水分的入渗^[30]; Zaady 等^[31]研究发现,车辆碾压破坏生物结皮,能够增大土壤渗透性、减少径流;在以物理结皮、光滑的藻结皮或者斥水性地衣分布的地区,放牧干扰通过破坏这些疏水性界面,可以增加水分渗透性^[32-34],这与本研究结果一致。

虽然,干扰能够增加水分渗透性、降低径流系数,但并非强度越大越好。本研究中,当强度达到 100% 即去除生物结皮,反倒降低土壤渗透性,增加径流(图 5),同时又显著增加了土壤侵蚀模数,增幅达 10 倍(图 6)。一方面是因为去除生物结皮以后,土壤表面直接遭受雨滴的打击冲刷,产生了非生物结皮(物理结皮、结构结皮等)^[31],表层土壤结构因湿水而被破坏,黏粒矿物重组,堵塞基质孔隙^[35],导致土壤渗透性降低;另一方面与黄土的点棱接触支架式多孔结构有关,中孔隙和小孔隙等主要粒间孔隙充水以后,由于单个土粒间摩擦减少,支架滑落,变点棱接触为面面接触、层层叠加或粗细相互填充紧密镶嵌,孔隙骤减,土壤渗透性降低,诱发超渗径流并导致坡面侵蚀^[36]。Eldridge 等^[37-38]则认为,去除生物结皮不会影响水分渗透性,这可能与其试验地特殊性有关,其试验地基本为偏壤质、黏质的红土和富钙干旱土,与表层的生物结皮相比,其下层土壤的团聚性、孔隙度等物理性质较差。如果生物结皮的水分渗透性等于或超过下层土壤的渗透性,下层土壤比表层生物结皮对降雨入渗所起的控制作用更强。考虑到去除生物结皮,土壤侵蚀模数较不干扰增加了 10 倍,可能会影响不同干扰度之间的方差分析结果。因此,将不干扰至 50% 干扰度处理下的土壤侵蚀模数进行单因素方差分析和 LSD 多重比较,处理之间差异不显著($P>0.1$),即干扰强度在 20%~50% 范围内,踩踏干扰生物结皮较不干扰未显著增加土壤侵蚀模数(图 6),一方面可能是由于生物结皮的假根系对土壤颗粒的捆绑作用,以及生物结皮胞外分泌物对土壤颗粒的粘结团聚作用^[39],有效地抵御降雨过程中雨滴的打击和冲刷,使土壤颗粒不易被径流携走,减少土壤表层沉积的损失^[40];另一方面,因为干扰改变了表面粗糙度(图 1),微地形的改变可能造成泥沙搬运过程中的沉积。以上结果说明,生物结皮破碎度低于 50% 的干扰在不明显增加土壤流失量的前提下,可以增加水分渗透性,降低径流系数。

影响生物结皮土壤渗透性的因素很多,入渗是由多因素控制的过程,如果雨强、坡度、前期含水量、土壤质地等改变,得出的结果可能会发生改变,不同的测定方法得出的结果也可能不同,有关不同雨强、坡度、前期含水量下不同干扰强度对生物结皮土壤渗透性的影响尚需进一步试验研究。本研究是在室内条件下进行的人工模拟降雨试验,由于设备的限制,移动变坡式土槽的尺寸规格较小,结果相对于野外自然坡面存在局限性。本文的模拟降雨试验对雨季中干扰对生物结皮土壤渗透性的影响进行研究,在时间上,结皮中的生物成分随季节的干、湿、冷、暖交替会有灵敏的反应,随年际的变化结皮中的生物群落会有更新和演替,这都必然引起生物结皮土壤的渗透性存在季节间和年际间的变化^[6,41],以上不足之处,需进一步完善。

4 结 论

干扰显著增加了土壤表面粗糙度,延长了坡面产流时间。粗糙度指数在 50% 干扰强度时较不干扰增加了 91%。20%~50% 干扰度范围内,随着干扰强度的增加,产流时间呈线性增加的趋势。50% 干扰度处理下产流时间较不干扰增加了 169.7%。去除生物结皮初始产流时间与不干扰差异不显著。

干扰强度低于 50% 时,初始入渗速率差异不显著。去除生物结皮显著降低了土壤初始入渗速率,去除生物结皮较不干扰降低 17.4%。50% 干扰度土壤的稳定入渗速率较不干扰增加了 22.6%。去除生物结皮的稳定入渗速率较不干扰降低 23.4%。

干扰显著影响生物结皮土壤的径流系数和累积入渗量。当干扰强度达到 50% 时,径流系数较不干扰降低了 30.1%,累积入渗量增加了 12.6%。去除生物结皮的径流系数较不干扰增加了 70.9%,累积入渗量降低了 30.2%。

干扰强度在 50% 范围内,干扰未显著增加土壤侵蚀模数。去除生物结皮的土壤侵蚀模数 ($4960 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 较不干扰增加了 10 倍。

参考文献

- [1] Belnap J, Lange OL. Biological soil crusts: Structure, function, and management. Berlin: Springer, 2003
- [2] Zhao Y-G (赵允格), Xu M-X (许明祥), Wang Q-J (王全九), et al. Impact of biological soil crust on soil physical and chemical properties of rehabilitated grassland in Hilly Loess Plateau, China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2006, 21(3): 441-448 (in Chinese)

- [3] Gao L-Q (高丽倩), Zhao Y-G (赵允格), Qin N-Q (秦宁强), *et al.* Impact of biological soil crust on soil physical properties in the Hilly Loess Plateau region, China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2012, **27**(8): 1316-1326 (in Chinese)
- [4] Wang Y (王媛), Zhao Y-G (赵允格), Yao C-Z (姚春竹), *et al.* Surface roughness characteristics of biological soil crusts and its influencing factors in the Hilly Loess Plateau region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(3): 647-656 (in Chinese)
- [5] Li X-R (李新荣), Zhang J-G (张景光), Liu L-C (刘立超), *et al.* Plant diversity in the process of succession of artificial vegetation types and environment in an arid desert region of China. *Acta Phytocologica Sinica* (植物生态学报), 2000, **24**(3): 257-261 (in Chinese)
- [6] Li S-Z (李守中), Xiao H-L (肖洪浪), Song Y-X (宋耀选), *et al.* Impact of microbiotic soil crusts on rainfall interception in artificial vegetation area of Tengger Desert. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2002, **22**(6): 612-616 (in Chinese)
- [7] Zhu X-M (朱显谟). More on land management measures of Loess Plateau. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 1995, **14**(1): 4-11 (in Chinese)
- [8] Li X-R (李新荣), Zhang Z-S (张志山), Huang L (黄磊), *et al.* A review of studies on eco-hydrological process and reciprocal mechanism of artificial vegetation systems in sand regions of China. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2013, **58**(5): 397-410 (in Chinese)
- [9] Belnap J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles. *Hydrological Processes*, 2006, **20**: 3159-3178
- [10] Mehta VB, Vaidya BS. Cellular and extracellular polysaccharides of the blue green alga nostoc. *Journal of Experimental Botany*, 1978, **29**: 1423-1430
- [11] Xiong H-Q (熊好琴), Duan J-Y (段金跃), Wang Y (王妍), *et al.* Effects of biological soil crust on water infiltration and redistribution in the Mu Us Sandland, Inner Mongolia, Northern China. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2011, **18**(4): 82-87 (in Chinese)
- [12] Li X-J (李小军), Wang J (汪君), Gao Y-P (高永平). Effects of vegetation patchy distribution on runoff, erosion and nutrients loss in Desertified Steppe Area. *Journal of Desert Research* (中国沙漠), 2011, **31**(5): 1112-1118 (in Chinese)
- [13] Zhao YG, Xu MX. Runoff and soil loss from revegetated grasslands in the Hilly Loess Plateau Region, China: Influence of biocrust patches and plant canopies. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2013, **18**: 387-393
- [14] Zhang P-P (张培培), Zhao Y-G (赵允格), Wang Y (王媛), *et al.* Impact of biological soil crusts on soil water repellence in the Hilly Loess Plateau region, China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(3): 657-663 (in Chinese)
- [15] Xiao B (肖波), Zhao Y-G (赵允格), Shao M-A (邵明安), *et al.* Effects of biological soil crust on saturated hydraulic conductivity in water-wind erosion criss-cross region, North of Shanxi Province, China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2007, **23**(12): 35-40 (in Chinese)
- [16] Lalley JS, Viles HA. Do vehicle track disturbances affect the productivity of soil-growing lichens in a fog desert? *Functional Ecology*, 2006, **20**: 548-556
- [17] Cortina J, Martín N, Maestre FT, *et al.* Disturbance of the biological soil crusts and performance of *Stipa tenacissima* in a semi-arid Mediterranean steppe. *Plant and Soil*, 2010, **334**: 311-322
- [18] Belnap J, Eldridge DJ. Disturbance and recovery of biological soil crusts// Belnap J, Lange OL, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer, 2003: 363-383
- [19] Graetz RD, Tongway DJ. Influence of grazing management on vegetation, soil structure and nutrient distribution and the infiltration of applied rainfall in a semi-arid chenopod shrubland. *Austral Ecology*, 1986, **11**: 347-360
- [20] Belnap J, Rosentreter R, Leonard S, *et al.* *Biological Soil Crusts: Ecology and Management*. Denver, CO: United States Department of the Interior Bureau of Land Management Printed Materials Distribution, 2001
- [21] Lei Z-D (雷志栋), Yang S-X (杨诗秀), Xie S-C (谢森传). *Soil Water Dynamics*. Beijing: Tsinghua University Press, 1988 (in Chinese)
- [22] Coppola A, Basile A, Wang X, *et al.* Hydrological behaviour of microbiotic crusts on sand dunes: Example from NW China comparing infiltration in crusted and crust-removed soil. *Soil & Tillage Research*, 2011, **117**: 34-43
- [23] Xu J-H (徐敬华), Wang G-L (王国梁), Chen Y-M (陈云明), *et al.* Infiltration characteristics of soil and its influencing factors in abandoned farmland in the hilly-gully region of Loess Plateau. *Science of Soil and Water Conservation* (中国水土保持科学), 2008, **6**(2): 19-25 (in Chinese)
- [24] Eldridge DJ. Biological soil crusts and water relations in Australian Deserts// Belnap J, Lange OL, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Function, and Management*. Berlin: Springer, 2003: 315-325
- [25] Fischer T, Veste M, Wiehe W, *et al.* Water repellency and pore clogging at early successional stages of microbiotic crusts on inland dunes, Brandenburg, NE Germany. *Catena*, 2010, **80**: 47-52
- [26] Feng W (冯伟), Ye J (叶菁). Effects of biological soil crusts on infiltration and soil and water conservation under trample disturbance. *Research of Soil and Water Conservation* (水土保持研究), 2016, **23**(1): 34-43 (in Chinese)
- [27] Warren SD. Synopsis: Influence of biological soil crusts on arid land hydrology and soil stability// Belnap J, Lange OL, eds. *Biological Soil Crusts: Structure, Func-*

- tion, and Management. Berlin: Springer, 2000: 349–360
- [28] Belnap J, Ludwig JA. Linkages between microbial and hydrologic processes in arid and semiarid watersheds. *Ecology*, 2005, **86**: 298–307
- [29] Niu Y-N (牛伊宁), Nan Z-B (南志标), Shen Y-Y (沈禹颖). Effect of surface roughness on runoff over cultivated soil in the Longdong Loess Plateau. *Arid Zone Research (干旱区研究)*, 2011, **28**(3): 389–393 (in Chinese)
- [30] Li P (李鹏), Li Z-B (李占斌), Zheng L-Y (郑良勇). Effect of vegetation at preliminary succession stages on soil infiltration and runoff under simulating rainfall. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 2004, **18**(1): 54–57 (in Chinese)
- [31] Zaady E, Arbel S, Barkai D, et al. Long-term impact of agricultural practices on biological soil crusts and their hydrological processes in a semiarid landscape. *Journal of Arid Environments*, 2013, **90**: 5–11
- [32] Bowker MA, Mau RL, Maestre FT, et al. Functional profiles reveal unique ecological roles of various biological soil crust organisms. *Functional Ecology*, 2011, **25**: 787–795
- [33] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems. *Ecosystems*, 2012, **15**: 148–161
- [34] Bowker MA, Eldridge DJ, Val J, et al. Hydrology in a patterned landscape is co-engineered by soil-disturbing animals and biological crusts. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, **61**: 14–22
- [35] Danin A. Vegetation of Israel and Sinai. Jerusalem: Cana Publishing House, 1983
- [36] Zhu X-M (朱显谟). The formation and significance of Loess-soil structure profile. *Journal of Soil and Water Conservation (水土保持学报)*, 1994, **8**(2): 1–9 (in Chinese)
- [37] Eldridge DJ. Cryptogam cover and soil surface condition: Effects on hydrology on a semiarid woodland soil. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1993, **7**: 203–217
- [38] Eldridge DJ, Greene RSB. Microbiotic soil crusts: A review of their roles in soil and ecological processes in the rangelands of Australia. *Soil Research*, 1994, **32**: 389–415
- [39] Gao L-Q (高丽倩), Zhao Y-G (赵允格), Qin N-Q (秦宁强), et al. Effects of biological soil crust on soil erodibility in Hilly Loess Plateau region of Northwest China. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2013, **24**(1): 105–112 (in Chinese)
- [40] Qin N-Q (秦宁强), Zhao Y-G (赵允格). Responses of biological soil crust to and its relief effect on raindrop kinetic energy. *Chinese Journal of Applied Ecology (应用生态学报)*, 2011, **22**(9): 2259–2264 (in Chinese)
- [41] Williams JD, Dobrowolski JP, West NE. Microbiotic crust influence on unsaturated hydraulic conductivity. *Arid Land Research and Management*, 1999, **13**: 145–154

作者简介 石亚芳,女,1991年生,硕士研究生.主要从事生物结皮生态功能研究. E-mail: shiyafang0903@163.com

责任编辑 杨弘

石亚芳,赵允格,李晨辉,等. 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

Shi Y-F, Zhao Y-G, Li C-H, et al. Effect of trampling disturbance on soil infiltration of biological soil crusts. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, **28**(10): 3227–3234 (in Chinese)