

线源入流入渗法在生物结皮渗透性研究中的应用

张子辉^{1,2}, 赵允格², 谷康民¹, 杨凯¹, 高丽倩²

(1.西北农林科技大学资源环境学院,陕西 杨凌 712100;

2.西北农林科技大学水土保持研究所,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: 土壤水分入渗的观测方法很多,但在测定坡地生物结皮土壤水分入渗时均存在一定的缺陷。线源入流入渗法是可用于无结皮的坡地土壤水分入渗较为简便快捷的观测方法。以裸土为对照,采用线源入流入渗法和模拟降雨法测定了黄土丘陵区多藻少藓、半藻半藓、多藓少藻等不同类型的生物结皮土壤水分入渗过程。结果表明:(1)线源入流入渗法可在不干扰生物结皮的情况下,快速、完整地反映土壤水分入渗过程,获取初始入渗速率、平均入渗速率及稳定入渗速率等重要参数;(2)线源入流入渗法所得研究区不同类型的生物结皮的初始入渗速率范围为3~12 mm/min,平均入渗速率范围为0.5~4.5 mm/min,稳定入渗速率范围为0.3~1.8 mm/min,随着藓盖度的增加,其初始、平均、稳定入渗速率均呈现出显著差异;(3)线源入流入渗法测定的生物结皮土壤稳定入渗速率(y , mm/min)与人工模拟降雨试验所得入渗速率(x , mm/min)呈显著的线性相关关系($y=1.73x-1.24, R^2=0.3768, \rho=0.539^*$)。研究结果为坡地生物结皮土壤水分入渗速率的测定提供一种简单易操作的测定方法。

关键词: 线源入流入渗法; 入渗速率; 模拟降雨; 藓盖度

中图分类号: S152.7; S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)01-0128-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.01.019

Application of Line Source Infiltration Method in the Study of Biological Soil Crust Permeability

ZHANG Zihui^{1,2}, ZHAO Yunge², GU Kangmin¹, YANG Kai¹, GAO Liqian²

(1.College of Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University,

Yangling, Shaanxi 712100; 2.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: There are many methods to measure soil permeability, however, each method shows some defects when used on the biocrustal (biological soil crusts) soil on slope lands. Line source infiltration method is a simple and rapid method for the measure of infiltration on slope land without biocrusts. In this study, the water infiltration processes of bare soil (control) and different types of biocrusts, including cyanobacteria dominated, cyanobacteria-moss mixed and moss dominated biocrust soil in the Hilly Loess Plateau region were tested by using line source infiltration method. Meanwhile, the simulated rainfalls were applied on the same plots to get the permeability of the soils. The results showed that: (1) The line source infiltration method can describe the water infiltration process quickly and completely without disturbing the biocrusts. Meanwhile, the parameters such as initial infiltration rate, average infiltration rate and stable infiltration rate were observed stably. (2) The initial infiltration rate range of different types of biocrust obtained by the line source infiltration method in the study area was 3 ~ 12 mm/min, the average infiltration rate range was 0.5 ~ 4.5 mm/min, and the stable infiltration rate range was 0.3 ~ 1.8 mm/min. With the increase of moss coverage, the initial, average and stable infiltration rates were significantly different. (3) There was a significant linear correlation between the stable infiltration rates of biocrusts soil measured by the line source infiltration method and those of the simulated rainfall ($y=1.73x-1.24, R^2=0.3768, \rho=0.539^*$). This study provides a simple and easy method for the determination of water infiltration rate in biological crusts soil on slope lands.

收稿日期:2019-07-19

资助项目:国家自然科学基金项目(41830758,41571268)

第一作者:张子辉(1995-),男,硕士研究生,主要从事生物结皮入渗的线源入流入渗法测定研究。E-mail:18220597828@163.com

通信作者:赵允格(1971-),女,研究员,主要从事生物土壤结皮及其生态功能研究。E-mail:zyunge@ms.iswc.ac.cn

Keywords: line source infiltration method; infiltration rate; simulated rainfall; moss coverage

生物土壤结皮(生物结皮, biological soil crusts), 是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]。黄土丘陵区退耕还林还草工程实施后, 生物结皮广泛发育, 平均盖度达 60%~70%, 具有重要的生态功能, 显著地影响了土壤理化性状^[2-3]、降水入渗、径流^[4-5]以及土壤水分、养分循环等诸多生态过程^[6-8]。准确观测生物结皮土壤水分入渗过程, 明确生物结皮的生态功能及其对区域水文过程的影响具有重要理论意义和实际价值。

水分入渗是土壤物理学重要的研究内容。迄今, 有关土壤水分入渗的测定方法有很多, 如环刀法、渗透筒法、单环法、水文法、双环法、人工降雨法、示踪法以及各种精密入渗仪法(如 Hood 入渗仪、Guelph 入渗仪)等。然而, 生物结皮常分布于坡度较大的地表, 且脆弱、易碎, 已有测定土壤水分入渗的方法在观测生物结皮土壤的水分入渗时均存在一定缺陷。如双环法, 该方法携带方便、结构简单、造价低、适于野外使用, 易于对比不同土壤渗透性能, 但在双环放置过程中, 对地表有较大干扰, 同时该方法要求地面坡度较小, 坡面测定时误差较大^[9]。单环法简便易行, 但测定过程中存在着明显的侧渗现象^[10]。圆盘入渗仪是一种省时、省力、省水的测定方法, 在测定平整的农田土壤水分渗透性上具有很大优势, 但在生物结皮土壤水分渗透性测定时, 由于生物结皮表层一般不平整, 需要铺垫细沙层, 可能会改变生物结皮原入渗速率, 导致较大的测定误差。人工降雨法不受地形因素的影响与制约^[11], 可运用于生物结皮土壤入渗速率的测定, 但人工降雨仪器大、过程繁琐, 对人力、物力要求较高^[12]。因此, 当前仍有必要探索便捷、可准确测定生物结皮土壤水分入渗速率及过程的方法。

线源入流入渗法是雷廷武等^[13]根据水量平衡原理, 定性描述在供水流量恒定条件下相应地表湿润面积推进的完整过程建立的土壤入渗能力的测定方法。该方法操作简单、方便的同时, 对试验样地的要求较低, 可以在野外满足多种条件下土壤水分入渗的准确测定。石亚芳等^[14]曾尝试将该方法运用于生物结皮土壤水分入渗的测定, 认为该方法在生物结皮土壤水分入渗测定中具有可行性。然而, 迄今为止, 尚未见到将该方法用于野外自然坡地生物结皮土壤渗透性测定的研究, 有关该方法实际应用中的可靠性、便捷性等尚不清楚^[15-16]。

退耕还草工程实施后, 生物结皮在黄土丘陵区退

耕地表面广泛发育, 平均盖度可达 60%~70%^[3], 甚至更高, 显著影响退耕地土壤水分入渗及坡面产流, 明确该区生物结皮对退耕地水分渗透性的影响, 对明确该区退耕还林的水文效应具有重要意义^[17]。为此, 本文采用线源入流入渗法, 测定了多藓少藻、半藓半藻、多藻少藓等不同发育程度的生物结皮土壤水分入渗速率及过程, 对比了不同类型生物结皮对土壤水分入渗速率的影响, 并和同期、同小区的人工模拟降雨试验所得土壤水分入渗速率相对比, 以验证线源入流入渗法在测定生物结皮土壤水分渗透性的可行性, 为坡地生物结皮水分渗透性的研究提供一项便捷、准确的观测方法。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于陕西省定边县退耕封禁区, 该区位于陕西省西北部, 东经 107°91'70"~107°93'16", 北纬 37°29'32"~37°38'61", 海拔 1 303~1 507 m, 地域辽阔。在地貌特征上有两大分水岭: 一是位于县境中部的白于山。横亘东西, 辐射南北, 为内流区与外流区及无定河与洛河的分水岭。二是位于县境西南—东北走向的子午岭北段, 为洛河泾河流域的分水岭。两大分水岭呈“T”字形隆起, 将山区分为西南部泾河、南部洛河、东南部无定河三大外流河的河源区及北部内流区。南部为白于山丘陵沟壑区, 占总面积的 52.78%; 北部为毛乌素沙漠南缘风沙滩区, 占总面积的 47.22%。属于典型的黄土丘陵区^[18-19]。

该区气候属于温带半干旱大陆性季风气候, 主要特点是春多风、夏干旱、秋阴雨、冬严寒, 日照充足, 雨季迟且雨量年际变化大, 年均气温 7~9℃, 降水量 250~450 mm, 年日照时间 2 743.3 h, 年平均无霜期 141 d, 绝对无霜期 110 d, $\geq 0^\circ\text{C}$ 的积温 3 575.6℃。土壤为黄土母质上发育而成的黄绵土, 研究小区的基本理化属性见表 1。该区植被覆盖率低, 自然植被主要以胡枝子(*Lespedeza davurica*)、早熟禾(*Poa annua*)、百里香(*Thymus mongolicus*)、茵陈蒿(*Artemisia capillaries*)、滨草(*Marram grass*)等类型为主^[20]。

1.2 试验设计

为了明确线源入流入渗法对坡地生物结皮土壤渗透性测定的可靠性, 于 2018 年 7 月以裸地为对照, 选多藓少藻、半藓半藻、多藻少藓结皮类型发育程度的试验样地, 采用该方法和人工模拟降雨法, 分别测定计算土壤水分的初始、平均、稳定入渗速率。

表 1 样地基础理化性质

样地 编号	有机质/(g·kg ⁻¹)		全 N/(g·kg ⁻¹)		全 P/(g·kg ⁻¹)		黏粒/%		粉粒/%		砂粒/%	
	结皮层	0-2 cm	结皮层	0-2 cm	结皮层	0-2 cm	结皮层	0-2 cm	结皮层	0-2 cm	结皮层	0-2 cm
1-1	18.97	9.27	1.06	0.61	0.53	0.52	17.71	14.60	23.02	15.31	59.27	70.09
1-2	18.07	12.38	0.85	0.55	0.54	0.55	12.18	12.60	16.20	13.83	71.62	73.57
1-3	14.24	9.59	0.75	0.42	0.52	0.47	12.56	12.71	16.46	14.37	70.99	72.92
2-1	18.18	7.78	0.45	0.53	0.48	0.44	11.52	13.87	14.81	13.71	73.67	72.42
2-2	12.40	8.36	0.76	0.43	0.49	0.48	11.67	12.06	14.62	12.84	73.71	75.11
2-3	12.05	8.36	0.71	0.70	0.49	0.51	14.25	12.94	18.64	13.97	67.11	73.09
3-1	15.50	8.80	0.57	0.67	0.53	0.50	12.35	12.51	16.32	13.82	71.33	73.67
3-2	16.42	9.04	0.43	0.45	0.57	0.41	11.45	13.92	14.69	14.35	73.86	71.73
3-3	17.47	9.58	0.59	0.44	0.47	0.45	9.05	12.55	12.04	12.74	78.90	74.71
4-1	20.15	8.21	1.01	0.56	0.28	0.47	9.97	13.46	13.38	13.02	76.66	73.52
4-2	22.98	7.94	0.79	0.56	0.55	0.50	11.28	13.23	15.37	14.45	73.35	72.32
4-3	16.18	23.32	0.43	0.65	0.58	0.54	12.16	12.40	16.16	13.02	71.68	74.58
5-1	27.48	12.25	1.17	0.64	0.55	0.54	12.29	13.77	18.22	15.62	69.49	70.62
5-2	22.30	9.27	1.10	0.57	0.54	0.50	14.87	14.11	21.41	14.07	63.72	71.82
5-3	21.42	9.97	1.16	0.56	0.54	0.56	10.45	12.68	15.36	13.39	74.19	73.93

1.2.1 小区布设 在研究区退耕封禁地的自然撂荒坡地上,选取生物结皮发育良好、有代表性的退耕地为研究对象,通过对样地的观测及初步的盖度调查,选取坡度在 20°~25°范围内的研究样地。样地概况见表 2,按藓盖度差异选择 5 个样地。在选择样地之后,用 25 点样方法调查选定小区的生物结皮盖度,以藓盖度表征发育程度。选定藓盖度为 <15%,15%~30%,30%~45%,45%~60%,>60%,按藓盖度由低到高共计 5 个生物结皮发育程度,分别用 1,2,3,4,5 表示 5 个生物结皮不同发育程度的样地。选取面积为 2.1 m×10.0 m 的试验小区,以裸土作对照,圈建并剪除地表植被,每个藓盖度处理设置 3 个重复小区,进行试验。值得说明的是,自然情况下,生物结皮的盖度很难做到一致,因此,本文的 5 个藓盖度小区的 3 个重复,其藓结皮盖度不尽相同,为此,本文列出了全部小区的地表盖度情况(表 1 和表 2)。

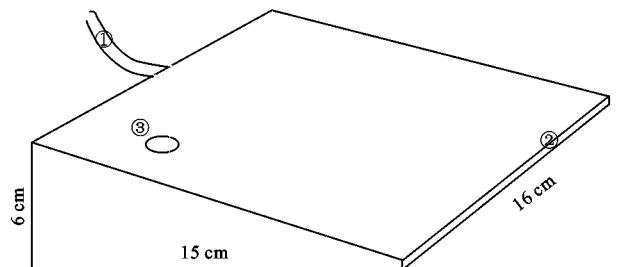
表 2 样地基本概况

样地编号	藓盖度/%	藻盖度/%	结皮盖度/%	结皮厚度/mm
1-1	7.73	48.80	61.07	8.46
1-2	9.47	44.00	69.60	8.40
1-3	16.42	46.67	69.87	8.00
2-1	22.37	22.93	68.80	4.52
2-2	30.59	50.13	85.87	9.14
2-3	32.34	37.07	81.60	10.87
3-1	32.34	35.60	80.61	9.56
3-2	33.12	11.47	57.07	5.60
3-3	35.93	20.80	63.47	5.41
4-1	38.03	27.20	62.93	5.89
4-2	44.59	23.20	68.80	4.67
4-3	45.40	24.53	69.60	5.10
5-1	52.09	8.27	79.06	9.75
5-2	55.32	11.20	80.00	12.05
5-3	55.71	7.73	78.40	14.07

1.2.2 线源入流渗入法 线源入流试验装置由供水装

置、薄层水流发生器、数码相机和参照物组成。马氏瓶作为供水器,其内径 18 cm,高 45 cm,容积 11.451 L。通过薄层水流发生器向坡地土壤进行供水,薄层水流发生器由供水软管、有机玻璃加工而成的盒子、纱布等作为主要材料。在一块尺寸为 16 cm×15 cm×6 cm 的有机玻璃盒子上(图 1),将宽 1 cm、长 18 cm、厚度 0.8 cm 的纱布粘到有机玻璃盒子的长边,供水管流出的水流通过出水口的纱布渗流出来,进入土表,使得水流缓慢均匀分布在地表。参照物为 10 cm×10 cm 的正方形 PVC 板,用以校对影像面积;相机为 Sony ILCE-5100 套机,1 min 自动拍摄 1 次。

测定过程:在试验小区平整出 30 cm×30 cm 地块,放置马氏瓶,保证马氏瓶垂直。为了不对所测定区域的地质及周围地质环境造成破坏,同时有利于对湿润面积的拍摄观察,测定中使湿润锋的运动方向与坡面方向保持一致。试验前测定水温,放置参照物,架设相机并调整相机高度,使其可清晰拍摄地表欲测定的范围。测定开始前,调节马氏瓶进气口与供水管出水口的高差为 8 cm,率定出水流量至设定的值 18 L/h^[21]。开始测定,用相机 1 min 拍摄记录 1 次地表湿润面积,同时读取马氏瓶供水量,测定持续 35 min。



注:尺寸为 16 cm×15 cm×6 cm 的有机玻璃盒子作为薄层水流发生器;①为进水口,连接马氏瓶;②为出水口,形成薄层水流;③为小木塞。

图 1 薄层水流发生器示意

观测指标:入渗水量由马氏瓶上读出不同时段的人渗水量;

湿润面积:采用 Photoshop 处理计算每分钟湿润面积;

入渗速率:根据雷廷武等^[21]提出的公式计算得出生物结皮土壤入渗速率,计算公式为:

总入渗量

$$Q = \int_0^{t_i} \int_0^A i(t, A) dA dt \quad (1)$$

式中: t 为入渗时间(min); t_i 为入渗的总时间(min); A 为入渗总时间内的湿润面积(m^2); i 为入渗速率(mm/min)。

单位时间流量

$$q = \int_0^A i(A, t) dA \quad (2)$$

$$q_1 \approx i_1 A_1$$

$$q_2 \approx i_2 A_1 + i_1 A_2$$

$$q_3 \approx i_3 A_1 + i_2 A_2 + i_1 A_3 \quad (3)$$

⋮

$$q_n \approx i_n A_1 + i_{n-1} A_2 + \dots + i_1 A_n$$

式中: A_1, A_2, \dots, A_n 为在时段 t_1, t_2, \dots, t_n 增加的湿润的面积; i_1, i_2, \dots, i_n 为不同时刻对应的土壤入渗速率。

$$i_n = \frac{(q_n - \sum_{j=1}^{n-1} i_j A_{n-j+1})}{A_1} \quad n=1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

本研究中,为了反映不同时段的人渗过程,将前 3 min 土壤水分入渗速率平均值记为初始入渗速率,整个过程 35 min 土壤水分入渗速率的平均值作为平均入渗速率,将入渗 30 min 后入渗速率平均值作为稳定入渗速率。

1.2.3 人工模拟降雨试验 在圈建的试验小区上,搭设人工模拟降雨仪器,采用人工模拟降雨系统(EL-RS3/5)进行模拟降雨。模拟降雨雨强为 90 mm/h,降雨历时 1 h。降雨产流后,每 3 min 接取 1 次径流。降雨结束后测定径流量,通过径流总量和降雨总量之比计算径流系数。利用水量平衡原理计算模拟降雨条件下生物结皮土壤入渗速率^[22-23]。本文将降雨结束前 12 min 的平均入渗速率记为稳定入渗速率。

根据水量平衡原理(降雨过程中蒸发量忽略不计)计算降雨量:

$$P = R_i + I \quad (5)$$

式中: P 为降雨量(mL); R_i 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)计算入渗率($i, \text{mm}/\text{min}$):

$$P = R(t_{i+1} - t_i) S \cos \alpha \quad (6)$$

$$i = \frac{P - R_s}{S(t_{i+1} - t_i)} \quad (7)$$

式中: R 为降雨强度(mm/min); t_{i+1}, t_i 为各时段始末时间(min); S 为坡面面积(mm^2); α 为坡度; R_s 为各时段对应的地表径流量(mL)。

本文采用公式(7)计算模拟降雨条件下的平均入渗速率和稳定入渗速率。

1.3 统计分析及作图

用 Adobe Photoshop CC 软件处理野外入渗试验所得照片,计算得出土壤水分入渗速率,用 SPSS 16.0 软件对人工模拟降雨与线源入流试验所得的土壤水分入渗速率作相关及方差分析。用 Origin 8.0 软件对不同生物结皮类型下土壤水分入渗过程及不同藓盖度下土壤水分入渗速率作图。

2 结果与分析

2.1 线源入流入渗法测得不同类型生物结皮土壤水分入渗过程

由图 2 可知,不同地表处理的水分入渗过程差异明显,裸地(无生物结皮)土壤水分初始入渗速率约为 28 mm/min,随着时间推移急速下降,15 min 后入渗速率下降减缓并逐渐稳定于 5 mm/min 的土壤水分入渗速率。藻结皮小区,初始入渗速率约为 3 mm/min,入渗速率随着时间的推移呈现缓慢降低并在 10 min 后稳定于 0.8 mm/min 的稳定入渗速率。在藓结皮小区,初始阶段随着时间的推移,土壤水分入渗速率保持 12 mm/min 稳定不变,在 8 min 后,入渗速率开始呈现出下降趋势,在 30 min 后停止下降保持 2 mm/min 的稳定入渗速率。

在藓盖度较高的藓结皮小区,入渗试验的前 6 min,土壤水分入渗速率基本保持 12 mm/min 的速率不变,这与裸土(无生物结皮)的小区及藻结皮小区入渗过程有明显差异。可能是由于藓结皮小区,在入渗的初始阶段藓结皮生物会先行吸水^[24],待藓结皮吸水至饱和状态,水分才进入下层土壤产生类似于裸土的水分入渗过程。同时,由图 2 可知,不同地表处理的初始入渗速率差异明显,土壤初始水分入渗速率为裸土>藓结皮>藻结皮。在裸土中,土壤孔隙远大于藻结皮与藓结皮小区的土壤孔隙,因此裸土土壤水分初始入渗速率(28 mm/min)远大于藻结皮(4 mm/min)与藓结皮(12 mm/min)。藓结皮与藻结皮都具有一定的斥水性,当生物结皮中藓类植物盖度在 20% 以上时,斥水持久性显著低于藻结皮^[25],藻结皮的强斥水性,导致藻结皮小区的土壤水分初始入渗速率(4 mm/min)远低于藓结皮(12 mm/min)与裸土小区(28 mm/min),且整个入渗过程中土壤水分入渗速率均低于藓结皮与裸土小区,其变化趋势与裸土

较为类似,但各阶段入渗速率显著低于裸土小区。验证线源入流入渗法可行性的同时表明,线源入流入渗法可以准确清晰地测定不同类型生物结皮土壤水分的入渗过程。

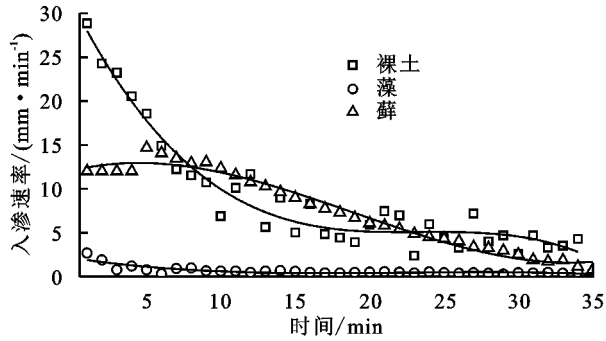
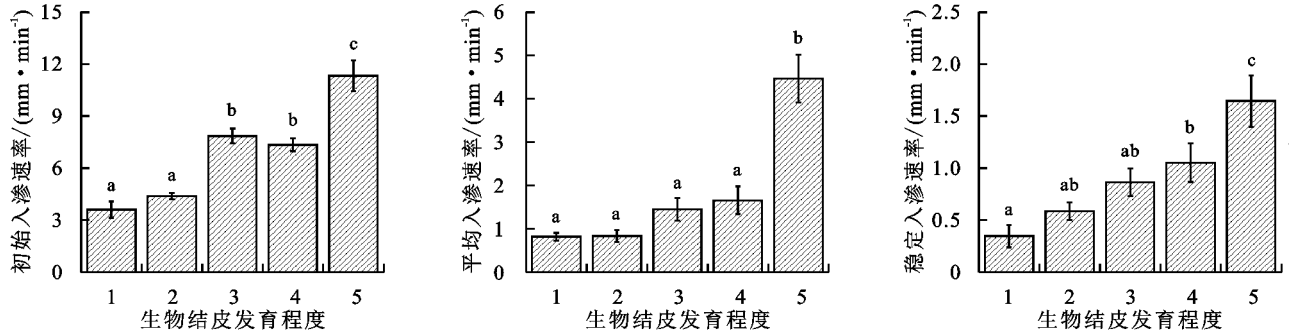


图 2 裸土及不同类型生物结皮土壤水分入渗过程

2.2 线源入流入渗法测得的生物结皮土壤水分入渗速率

由图 3 可知,不同藓盖度小区,随着藓盖度的增



注:分别用 1,2,3,4,5 表示藓盖度为 <15%, 15%~30%, 30%~45%, 45%~60%, >60% 5 个生物结皮不同发育程度的样地;图柱上方不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图 3 不同发育阶段生物结皮土壤水分入渗速率

2.3 模拟降雨试验条件下土壤水分入渗速率

采用人工模拟降雨系统(EL-RS3/5)进行人工模拟降雨试验,测定不同藓盖度生物结皮土壤水分入渗速率结果见图 4。由于降雨初始阶段土壤入渗速率由降雨强度所决定,所以人工模拟降雨法无法得出土壤初始水分入渗速率。通过人工模拟降雨法得出不同藓盖度下生物结皮土壤水分平均入渗速率为 0.8~

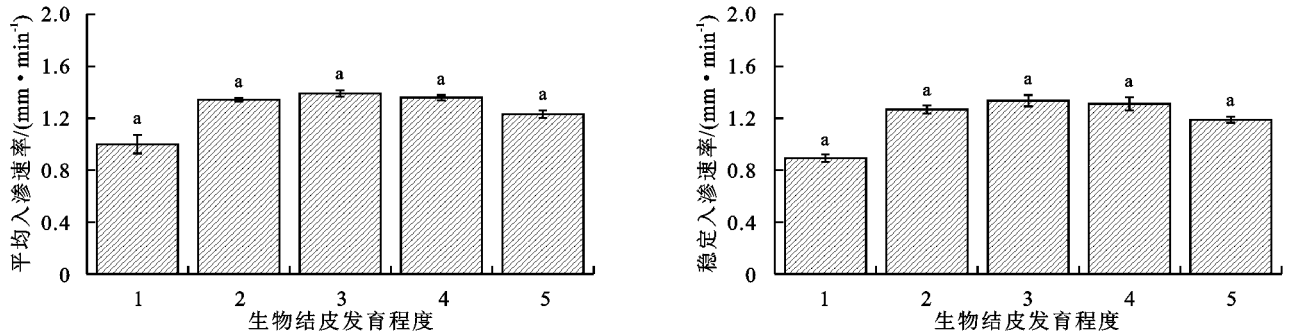


图 4 模拟降雨试验条件下土壤水分入渗速率

2.4 线源入流入渗法与人工模拟降雨法测定结果相关性

将同一试验小区线源入流入渗试验与人工模拟

加,初始、平均、稳定入渗速率均存在显著差异。初始入渗速率为 3~12 mm/min,平均入渗速率为 0.5~4.5 mm/min,而稳定入渗速率为 0.3~1.8 mm/min。

土壤水分的渗透性能主要由土壤本身性质所决定,当生物结皮存在时,改变原土壤的孔隙度、团聚体结构、黏结力、及有机质、N、P 含量等理化性状,进而影响原土壤的渗透性能。生物结皮具有一定的斥水性,而随着藓盖度的增加生物结皮斥水性逐渐下降,使得土壤水分的入渗速率逐渐增加,导致测得的土壤水分初始、平均与稳定入渗速率均随着藓盖度的不同而存在显著差异。线源入流入渗法测得的不同藓盖度下土壤水分不同入渗阶段入渗速率的变化,充分反映出不同藓盖度生物结皮土壤水分入渗速率的差异,同时验证了线源入流入渗法在测定不同藓盖度生物结皮土壤水分入渗速率中的可行性,并可以清晰地表示出生物结皮不同入渗阶段的土壤水分入渗速率。

1.5 mm/min,稳定入渗速率为 0.8~1.4 mm/min,生物结皮土壤水分平均与稳定入渗速率随着藓盖度的不同呈现出一定的差异,但差异不显著。表明不同藓盖度生物结皮土壤水分入渗速率差异,同时验证了线源入流入渗法测定不同藓盖度生物结皮土壤水分入渗速率的可行性与准确性。

降雨试验所测得土壤水分稳定入渗速率进行相关性分析,可见线源入流试验所得的入渗速率与模拟降雨试验所得生物结皮土壤水分入渗速率变化趋势相似(图

5),二者呈显著的线性相关关系(图 6)($\rho=0.539^*$, $n=15$),表明线源入流入渗法的观测结果可以预测降雨条件下生物结皮土壤水分入渗速率。

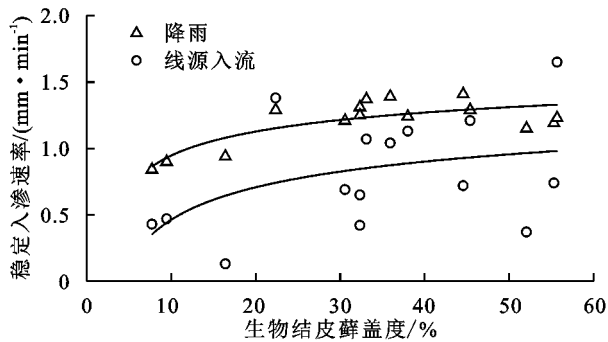


图 5 不同藓盖度小区线源入流入参与降雨测得的土壤水分稳定入渗速率

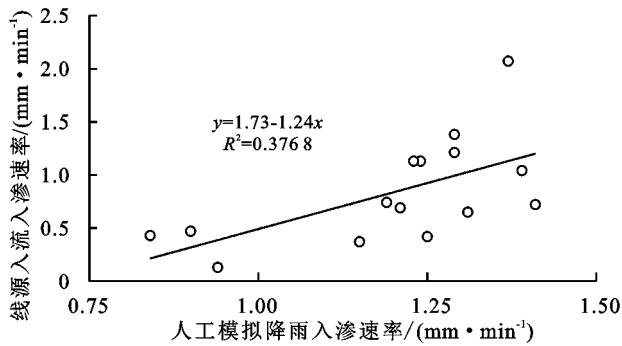


图 6 线源入流入渗法与人工模拟降雨法结果的相关性

3 讨论

生物结皮是位于地表的土壤—大气界面层,显著影响土壤水分渗透性,由于生物结皮脆弱易碎的特性,加之生物结皮常分布于坡地,导致其水分渗透性测定困难。研究表明,线源入流入渗法可以较好的反映不同类型生物结皮土壤水分入渗过程。不同类型生物结皮土壤初始入渗速率差异较大,平均与稳定入渗速率差异明显,这可能与不同类型生物结皮的斥水性有关。有研究^[25]表明,藻结皮的斥水性大于藓结皮。因此,在本研究中,随着藓盖度的增加,生物结皮土壤斥水性降低,导致土壤初始入渗速率增加,不同类型生物结皮土壤水分初始入渗速率之间差异较大。平均入渗速率与稳定入渗速率主要取决于土壤本身的孔隙度(容重)、厚度、团聚体数量及稳定性、有机质含量等理化属性,而以上属性随着藓盖度增加到一定程度会产生明显差异,因此,其平均与稳定入渗速率在藓盖度达到一定程度时产生显著差异。其次,较其他方法而言,线源入流入渗法可准确详细地反映不同藓盖度下土壤水分不同入渗阶段入渗速率,且所得稳定入渗速率与人工模拟降雨所测得结果存在显著的线性相关关系,表明该方法测定生物结皮土壤水分入渗的可行性与准确性。与人工模拟降雨法相比,线源入流入渗法具有节省人力物力资源,简便

易操作,可以满足野外多种条件下生物结皮土壤水分入渗速率的测定。同时,线源入流入渗法避免了其他方法在测定过程中对生物结皮干扰破坏,可测定完整生物结皮土壤水分入渗过程,弥补了生物结皮土壤水分入渗测定方法的不足,为坡地生物结皮水分渗透性的研究提供了一个好方法。然而,在实际的测定过程中,影响土壤水分入渗测定的因素有很多,如供水流量、坡度、前期含水量、微地形等。为了将线源入流入渗法广泛地推广应用于生物结皮土壤水分入渗的测定,这些因素对线源入流入渗法测定结果产生的影响仍有待进一步的研究与探讨。

4 结论

(1)线源入流入渗法可以很好地描述坡地不同类型生物结皮土壤水分入渗过程,获取不同类型生物结皮土壤水分初始、稳定及平均入渗速率,是测定生物结皮土壤水分入渗简单快捷的方法。

(2)不同类型生物结皮,初始入渗速率裸土>藓结皮>藻结皮,土壤水分入渗速率随着入渗时间的延长呈现出逐渐下降并趋于稳定的趋势。

(3)在线源入流入渗法测定下,随着生物结皮中藓盖度的增加,土壤水分初始、平均及稳定入渗速率呈增加趋势,差异显著。

(4)线源入流入渗法测得的生物结皮土壤稳定入渗速率与人工模拟降雨试验结果之间呈显著的线性相关关系($y=1.73x-1.24, R^2=0.3768, \rho=0.539^*$),表明线源入流入渗法可准确的反映坡地生物结皮土壤水分的入渗速率及入渗过程。

参考文献:

- [1] Belnap J, Büdel B, Lange O L. Biological soil crusts: Characteristics and distribution [J]. IEEE Antennas & Wireless Propagation Letters, 2003, 8(4): 1299-1301.
- [2] Scott F, Reed S C, Jayne B. Climate change and physical disturbance cause similar community shifts in biological soil crusts [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2015, 112(39): 16-21.
- [3] 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.
- [4] Neuman M K, Maxwell C. Temporal aspects of the abrasion of microphytic crusts under grain impact [J]. Earth Surface Processes & Landforms, 2010, 27(8): 891-908.
- [5] Li X J. Effects of patchy distribution of vegetation on infiltration, runoff generation and resources redistribution in Tengger Desert, north China [J]. Oil Depot & Gas Station, 2012, 14(31): 2191-2199.

- [6] 肖波,赵允格,许明祥,等.陕北黄土区生物结皮条件下土壤养分的积累及流失风险[J].应用生态学报,2008,19(5):1019-1026.
- [7] Barger N N, Herrick J E, Zee J V, et al. Impacts of biological soil crust disturbance and composition on C and N loss from water erosion [J]. *Biogeochemistry*, 2006, 77(2):247-263.
- [8] 李小军,汪君,高永平.荒漠化草原植被斑块分布对地表径流侵蚀及养分流失的影响[J].中国沙漠,2011,31(5):1112-1118.
- [9] 任宗萍,张光辉,王兵,等.双环直径对土壤入渗速率的影响[J].水土保持学报,2012,26(4):94-97.
- [10] 朱良君,张光辉,任宗萍.4种土壤入渗测定方法的比较[J].水土保持通报,2012,32(6):163-167.
- [11] Fortunato R P, Degrande P E. Simulate rain about action insecticide flonicamid in the control of the cotton aphid [J]. *Acta Scientiarum Agronomy*, 2011, 33(4):603-606.
- [12] 孔刚.人工降雨条件下黄土坡面土壤养分流失试验研究[D].西安:西安理工大学,2007.
- [13] 雷廷武,刘汗,潘英华,等.坡地土壤降雨入渗性能的径流-入流-产流测量方法与模型[J].中国科学:地球科学,2005,35(12):1180-1186.
- [14] 石亚芳,赵允格.踩踏干扰对生物结皮土壤渗透性的影响[J].应用生态学报,2017,28(10):3227-3234.
- [15] Karpf C, Hoefft S, Scheffer C, et al. Groundwater infiltration, surface water inflow and sewerage exfiltration considering hydrodynamic conditions in sewer systems [J]. *Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 2011, 63(9):1841-1848.
- [16] Wooding R A. Steady infiltration from a shallow circular pond [J]. *Water Resources Research*, 2010, 4(4):1259-1273.
- [17] 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饱和和导水率的影响[J].农业工程学报,2007,23(12):35-40.
- [18] 韩海燕.陕西省定边县土地开发综合效益评价[J].安徽农业科学,2018,594(17):222-224.
- [19] 杨晓武,李新平.定边县板凳滩移民区土壤发生特性与系统分类研究[J].水土保持通报,2012,32(1):26-32.
- [20] 贾科利,常庆瑞,张俊华.陕北农牧交错带沙漠化土地时空变化特征分析[J].中国沙漠,2009,29(2):223-228.
- [21] 雷廷武,毛丽丽,李鑫,等.土壤入渗性能的线源入流测量方法研究[J].农业工程学报,2007,23(1):1-5.
- [22] Knight J, Warrick A W. Steady infiltration from line sources into a layered profile [J]. *Water Resources Research*, 2003, 39(12):1327-1335.
- [23] Communar G, Friedman S P. Unsteady infiltration from point and line Sources in laterally confined domains [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77(5):1529-1536.
- [24] Zeng C, Wang Q, Fan J. Effect of initial water content on vertical line-source infiltration characteristics of soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1):24-30.
- [25] 张培培,赵允格,王媛,等.黄土高原丘陵区生物结皮土壤的斥水性[J].应用生态学报,2014,25(3):657-663.
- (上接第127页)
- [19] 李卓,吴普特,冯浩,等.容重对土壤水分入渗能力影响的模拟试验[J].农业工程学报,2009,25(6):40-45.
- [20] 王春霞,王全九,吕廷波,等.添加化学改良剂的砂质盐碱土入渗特征试验研究[J].水土保持学报,2014,28(1):31-35.
- [21] 张妙,李秧秧,白岗栓.生物炭和PAM共施对黄绵土水分入渗和蒸发的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):134-140.
- [22] 于健,雷廷武,Shainberg I,等.不同PAM施用方法对土壤入渗和侵蚀的影响[J].农业工程学报,2010,26(7):38-44.
- [23] Lentz R D. Inhibiting water infiltration with Polyacrylamide and surfactants: Applications for irrigated agriculture [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 58(5):290-300.
- [24] 姚宝林,李光永,李发永.南疆滴灌棉田休闲期土壤入渗特性研究[J].中国农业科学,2014,47(22):4453-4462.
- [25] 李帅霖,王霞,王朔,等.生物炭施用方式及用量对土壤水分入渗与蒸发的影响[J].农业工程学报,2016,32(14):135-144.
- [26] 肖茜,张洪培,沈玉芳,等.生物炭对黄土区土壤水分入渗、蒸发及硝态氮淋溶的影响[J].农业工程学报,2015,31(16):128-134.
- [27] 宋日权,褚贵新,治军,等.掺砂对土壤水分入渗和蒸发影响的室内试验[J].农业工程学报,2010,26(1):109-114.
- [28] 潘英华,雷廷武,张晴雯,等.土壤结构改良剂对土壤水动力学参数的影响[J].农业工程学报,2003,19(4):37-39.
- [29] 吴淑茗,柯萍萍,黄俊祥,等.羧甲基纤维素钠的研究进展[J].化学工程与装备,2018(10):246-247.