

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.03.012

刘志强, 张晓茹, 焦钊棚, 等. 连续性与间歇性降雨下土壤结皮与入渗的关系模拟[J]. 水土保持学报, 2024, 38(3): 64-72, 81.

LIU Zhiqiang, ZHANG Xiaoru, JIAO Fanxu, et al. The relationship between soil crust and infiltration under simulated continuous and intermittent precipitation[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 64-72, 81.

连续性与间歇性降雨下土壤结皮与入渗的关系模拟

刘志强¹, 张晓茹¹, 焦钊棚¹, 李光录^{1,2}

(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, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为探究连续性和间歇性降雨条件下土壤结皮与入渗性能间的变化关系。[方法] 选取 3 种典型耕作层黄土, 通过室内模拟降雨试验, 分析不同降雨条件下土壤结皮强度和黏结力与入渗性能的关系。[结果] (1) 入渗性能随连续性降雨历时及间歇性降雨场次的增加而减小; 同等降雨历时和降雨强度下, 间歇性降雨的减渗效应高于连续性降雨。(2) 土壤结皮强度和黏结力随连续性降雨历时和间歇性降雨场次的增加而增加; 褐土和黑垆土的入渗性能与结皮强度和黏结力呈显著线性相关 ($p < 0.05$), 连续性降雨历时越长、间歇性降雨场次的越多, 土壤结皮强度、黏结力以及减渗效应越大; 沙壤土的入渗性能与结皮强度和黏结力则呈显著的非线性相关 ($p < 0.05$)。 (3) 结皮的 MWD 和 GMD 越小, 入渗性能越差, 减渗效应越大; 关联度分析结果显示, 间歇性降雨对入渗性能的影响较高。[结论] 相同雨强条件下, 间歇性降雨下能形成更坚实的结皮, 对土壤入渗性能的削弱能力更强。研究结果可为黄土高原防治水土流失、有效利用水资源提供参考依据。

关键词: 结皮强度; 黏结力; 入渗性能; 减渗效应; 连续性与间歇性降雨

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)03-0064-09

The Relationship Between Soil Crust and Infiltration Under Simulation Continuous and Intermittent Precipitation

LIU Zhiqiang¹, ZHANG Xiaoru¹, JIAO Fanxu¹, LI Guanglu^{1,2}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study was aimed at investigating the variation relationship between soil crust and infiltration performance under continuous and intermittent rainfall conditions. [Methods] Three typical cultivated layer loesses were selected, and indoor simulated rainfall experiments were conducted to analyze the relationship between soil crust strength, cohesion, and infiltration performance under different rainfall conditions. [Results] (1) The infiltration performance decreased with the increase of continuous rainfall duration and intermittent rainfall events; under the same rainfall duration and intensity, the desilting effect of intermittent rainfall was higher than that of continuous rainfall. (2) Soil crust strength and cohesion increased with the increase of continuous rainfall duration and intermittent rainfall events; the infiltration performance of cinnamon soil and black earth was significantly linearly correlated with crust strength and cohesion ($p < 0.05$). The longer the continuous rainfall duration and the more frequent the intermittent rainfall events, the greater the soil crust strength, cohesion, and desilting effect. The infiltration performance of sandy soil was significantly nonlinearly correlated with crust strength and cohesion ($p < 0.05$). (3) The smaller the MWD and GMD of the crust, the worse the infiltration performance and the greater the desilting effect; furthermore, the correlation analysis results showed that the impact of intermittent rainfall on infiltration performance is higher. [Conclusion] Finally, under the same rainfall

收稿日期: 2023-10-19

修回日期: 2023-11-16

录用日期: 2023-12-15

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-04-09

资助项目: 国家自然科学基金项目 (41571262)

第一作者: 刘志强 (1998—), 男, 河南灵宝人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: 15039836420@nwfufu.edu.cn

通信作者: 李光录 (1964—), 男, 甘肃永靖人, 博士, 博士生导师, 教授, 主要从事土壤侵蚀与土地利用研究。E-mail: guangluli@nwsuaf.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

intensity, intermittent rainfall can form a more solid crust, which has a stronger weakening effect on soil infiltration performance. This study can provide a reference for the prevention and control of soil and water loss on the Loess Plateau and the effective utilization of water resources

Keywords: crust strength; bonding force; infiltration performance; infiltration reduction effect; continuous and intermittent precipitation

Received: 2023-10-19

Revised: 2023-11-16

Accepted: 2023-12-15

Online(www.cnki.net): 2024-04-09

土壤结皮在自然界十分常见,被分为物理结皮和生物结皮。物理结皮通常指在降雨打击、径流压实或灌溉条件下形成的一个致密结构层^[1],是黄土高原地区常见的土壤结构特征^[2]。ZHAI等^[3]研究认为,结皮的存在降低土壤的孔隙率和入渗性能;蔡强国等^[4]研究表明,结皮使得表土渗透性变差;MOORE等^[5]研究得出,结皮影响入渗并增加地表径流的产生。入渗是水分下渗到深层土壤的过程,是降雨、地表水和地下水相互转化的方式^[6],决定着地表径流的侵蚀量^[7]。土壤结构中微小团聚体含量的增加降低孔隙度,削弱土壤水分的入渗^[8],结皮的存在阻碍水分的入渗;高燕等^[9]研究表明,结皮强度与入渗速率呈正相关的关系;吴发启等^[10]指出,非结皮土壤的平均入渗率是结皮土壤平均入渗率的1.25倍。前人对结皮和入渗的关系已做大量的研究,但鲜有从降雨条件的角度去揭示结皮和入渗的关系。降雨是结皮形成的首要条件之一,从不同的降雨条件入手分析结皮结构,再探究入渗性能的变化,一步步的探索能够更深入地解释各因素对于入渗变化的影响。

黄土高原常发生短时多频的降雨,在结皮未形成时再次降雨使得土壤团聚体再次遭到破坏,破碎程度更大,细小的团聚体是影响结皮强度的主要原因之一。FU等^[11]研究发现,间歇性的多次雨滴击溅使团聚体更加破碎;MA等^[12]研究表明,间歇性降雨更大程度地降低土壤结皮的孔隙率。目前,证明降雨强度与入渗性能呈正相关,少有从连续性和间歇性降雨的角度去探究结皮和入渗性能的关系,因此,探究多场次的间歇性降雨是否影响结皮的形成更有利于深入研究入渗性能的变化。黄土高原是我国生态环境极其脆弱的地区之一^[13],其降雨历时短且降雨集中,间歇性的降雨更加贴合黄土高原的降雨特点,从间歇性降雨角度出发对探索黄土高原地表径流的调节机制和地下水供给情况改善土壤侵蚀问题有着重要的意义。

降雨过程中溅蚀与径流冲刷是共存的,水流剪切力不可忽视^[14],CHAMIZO等^[15]对土壤生物结皮的研究显示,土壤结皮的黏结力可作为土壤抗蚀性能的

重要因子之一。目前,许多研究^[12]探讨土壤物理结皮强度与降雨强度的关系,而对土壤物理结皮的黏结力与降雨强度的相关性鲜有研究,但单从垂直受力角度研究结皮并不全面。如要深入探究土壤结皮的力学强度与降雨间的关系,需要将结皮强度和黏结力联系在一起研究。

陕西省西北部地处黄土高原属于干旱缺水地区,水资源匮乏,但矿产资源丰富,近年来,开采导致地下水位连年下降,加上降雨集中且强度大,水土流失问题严峻,农业用水十分匮乏,严重阻碍农业生产活动的发展。因此,选取黄土高原3种主要的耕作土壤类型,通过室内模拟降雨试验,分析不同降雨条件下的表土结皮特征与入渗性能的关系,并探究表土团聚体粒径分布、MWD、GMD与连续性和间歇性降雨间的变化关系,总结不同降雨因素对入渗性能影响效应的权重,期望对合理利用水土资源,优化水资源循环提供重要依据。

1 材料与方法

1.1 土样采集和理化性质分析

黄土高原主要的耕作土有黄绵土、褐土、黑垆土、沙壤土等。在黄绵土基础上经过多年耕种熟化,形成褐土和黑垆土等特种的肥沃土壤;陕北主要的耕作土为沙壤土,土养分不足,但富含钾元素,适量施用有机肥就可满足生产需要。黄土高原土壤退化养分不足,且严重缺水,严重制约农业发展。因此,试验选取黄土高原耕作层的3种典型的表层耕作土,分别为陕西省宝鸡市眉县(107°45'36"E, 34°17'24"N)的褐土、陕西省咸阳市长武县(107°40'59"E, 35°14'27"N)的黑垆土、陕西省榆林市靖边县(108°46'08"E, 37°35'41"N)的沙壤土,通过室内模拟降雨试验,揭示表土结皮特征与入渗性能的关系,分析不同降雨条件对结皮形成的影响,以期能够对黄土高原的农业发展和水资源的保护利用提供帮助。土壤理化性质见表1。

土壤样本采用对角线法布设,在耕地表面去除落叶杂物,使用直径10 cm、高5 cm的圆形环刀取表层原状土(0—5 cm)。每种土壤共采集200个环刀样品和1 kg散土(用于测定理化性质),其中,5个环刀土样用于

测定土壤容重,12 个环刀土样不做处理,与试验环刀土样作对照,其余环刀土样用于雨滴击溅试验。

表 1 土样基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soils

土壤 类型	容重/(g·cm ⁻³)	有机质/%	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	颗粒组成/%		
					砂粒 (2~0.02 mm)	粉粒 (0.02~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
褐土	1.29	1.33	0.87	0.83	45.96	41.06	12.98
黑垆土	1.12	15.50	0.95	0.70	49.31	37.44	13.25
沙壤土	1.46	0.41	0.22	0.80	81.80	14.55	3.65

1.2 试验设计

降雨试验采用可变式针头模拟降雨装置(图 1)模拟降雨,降雨装置由无盖圆柱体(直径为 10 cm,高 10 cm)连接供水箱组成,圆柱体底部有 21 个均匀排列的开圆口,并通过橡皮塞在圆柱体底部开口固定安装同型号针头 21 个,供水时通过调节供水箱水阀在圆柱体中保持 2 cm 高的恒定水位。降雨前将由环刀采集的土样置于水位低于环刀的水箱中饱和 8 h,并

静置 12 h 保持相同的含水率。降雨开始时,于圆柱体正下方 200 cm 处放置土样,并由秒表计时,降雨结束后取出土样,放置水槽饱和(水位不可没过土样)。选取 3 种针头,其所产生的雨滴直径分别为 2.67, 3.39,4.05 mm,测得其降雨强度分别为 5.76,68.61, 217.26 mm/h,雨滴动量分别为 2.41×10^{-5} , 5.15×10^{-5} , 8.97×10^{-5} J/(m²·s)。整个装置采用塑料薄膜围住,防止试验过程中受到风力气流的扰动。

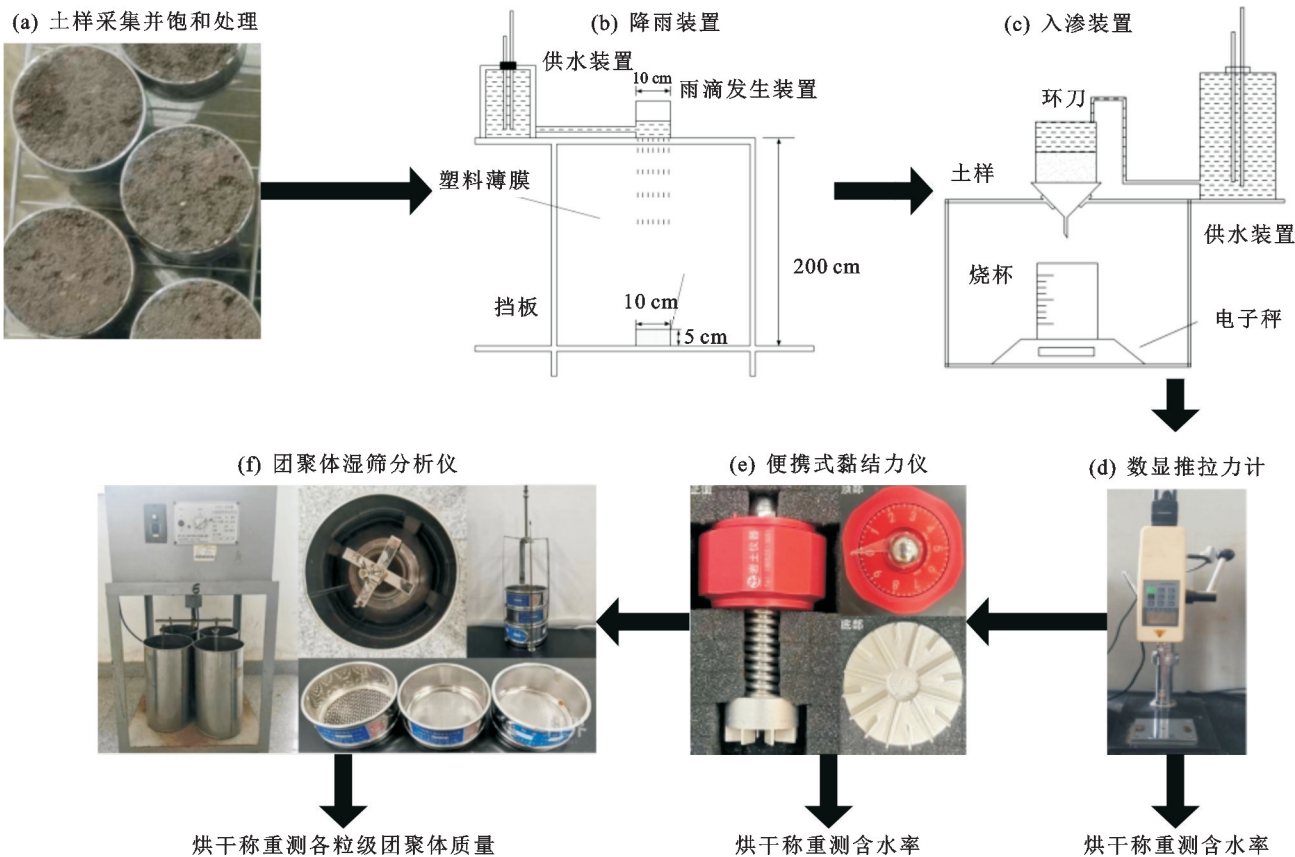


图 1 试验装置及流程

Fig. 1 Experimental device and process

降雨条件设置未击溅土样(ND)为空白对照组,同时,设置 10,20,30 min 连续性降雨 M1、M2、M3 和间歇性降雨,分别为连续降雨 10 min 无间歇的 1 次降雨(M4),持续降雨 10 min 间歇 20 min 再连续降雨 10 min1 次间歇的 2 次降雨(M5)和持续降雨 10 min 间歇 20 min 再连续降雨 10 min 再间歇 20 min 再降雨 10

min2 次间歇的 3 次降雨(M6)。降雨结束后将土样放于通风处阴干 1 周,使用数显推拉力计每隔 12 h 测定土壤结皮强度(kPa),使用便携式黏结力仪每隔 12 h 测定土壤结皮黏结力(kPa),同时,用烘干法测定其对应含水率,重复 7 次。将测定的土结皮强度值和黏结力值去除异常值后与相应的含水率进行拟合。

土壤入渗试验采用双环刀法。降雨结束后将对照组土样和试验组土样置于水槽中饱和 8 h。取出后在土样环刀上对接 1 个空环刀,2 个环刀的接触面涂抹凡士林,同时,用防水胶带缠绕对接处密封。在铁架上将密封好的 2 个环刀整体垂直固定在铁架台上,并在固定好的环刀下放置滤纸、玻璃漏斗、大烧杯和电子天平,测量土壤入渗量(图 1c)。通过马氏瓶向环刀供水,将薄海绵片放置表土上,阻挡水流对土样的破坏,保持水头高度 5 cm 不变,用温度计测量水温。当漏斗滴下第 1 滴水时开始计时,前 10 min 每 1 min 记录电子秤读数,后续每 5 min 记录读数,持续记录 1 h。

土壤结皮水稳性团聚体粒径组成试验采用湿筛法^[16]进行,取对照组未击溅土壤和试验组雨滴击溅后土壤阴干放置 1 周后的土壤样品表层土壤(0—5 mm),用团聚体分析仪(TTF-100)将收集的团聚体湿筛分为 >2, 1~2, 0.5~1, 0.25~0.5, 0.053~0.25, <0.053 mm 共 6 个等级,然后,用蒸馏水将每个粒径等级的团聚体分别冲洗到铝盒中,并做好相应的标记,置于 105 ℃ 的烘箱中烘干 24 h,取出后进行称重并记录。

1.3 数据分析

土壤入渗性能是表征土壤水分入渗能力优劣的指标,主要包括初始入渗率、稳定入渗率和平均入渗率^[17],土壤入渗速率^[18]的计算公式为:

$$v = \frac{10 Q_n}{t_n \cdot S} \quad (1)$$

$$IR = \frac{v_0 - v_i}{v_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: v 为渗透速率(mm/min); Q_n 为单位时间渗出水量(mL); S 为环刀横截面积(cm²); t_n 为单位入渗间隔时间(min); IR 为减渗效应; v_0 为未击溅土渗透参数; v_i 为不同雨滴击溅后土壤渗透参数。

土壤团聚体各粒级的含量决定着土壤孔隙的分布和连通性,影响着水分入渗的性能。各粒级团聚体的含量分布特征通过平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)来表示^[19],计算公式为:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (\bar{r}_i \cdot m_i)}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (3)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n m_i \ln \bar{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \right] \quad (4)$$

式中: $\bar{r}_i$ 为 i 级筛中团聚体的平均直径(mm); m_i 为在 i 级筛中团聚体质量(g)。

土壤含水率的大小影响着土壤结皮强度和黏结力的大小,计算公式为:

$$mc = \frac{m_0 - m}{m} \times 100\% \quad (5)$$

式中: mc 为土壤含水率(%); m_0 为烘干后的土壤质量(g); m 为在烘干前的土壤质量(g)。

试验中使用 Excel 2022, Origin Pro 2018 和 SPSS 16.0 软件进行数据处理、图表绘制和统计分析。数据分析采用方差分析(ANOVA)和最小显著差异法(LSD),均在 $p < 0.05$ 的显著性水平下进行差异显著性检验,误差使用标准偏差表示。

2 结果与分析

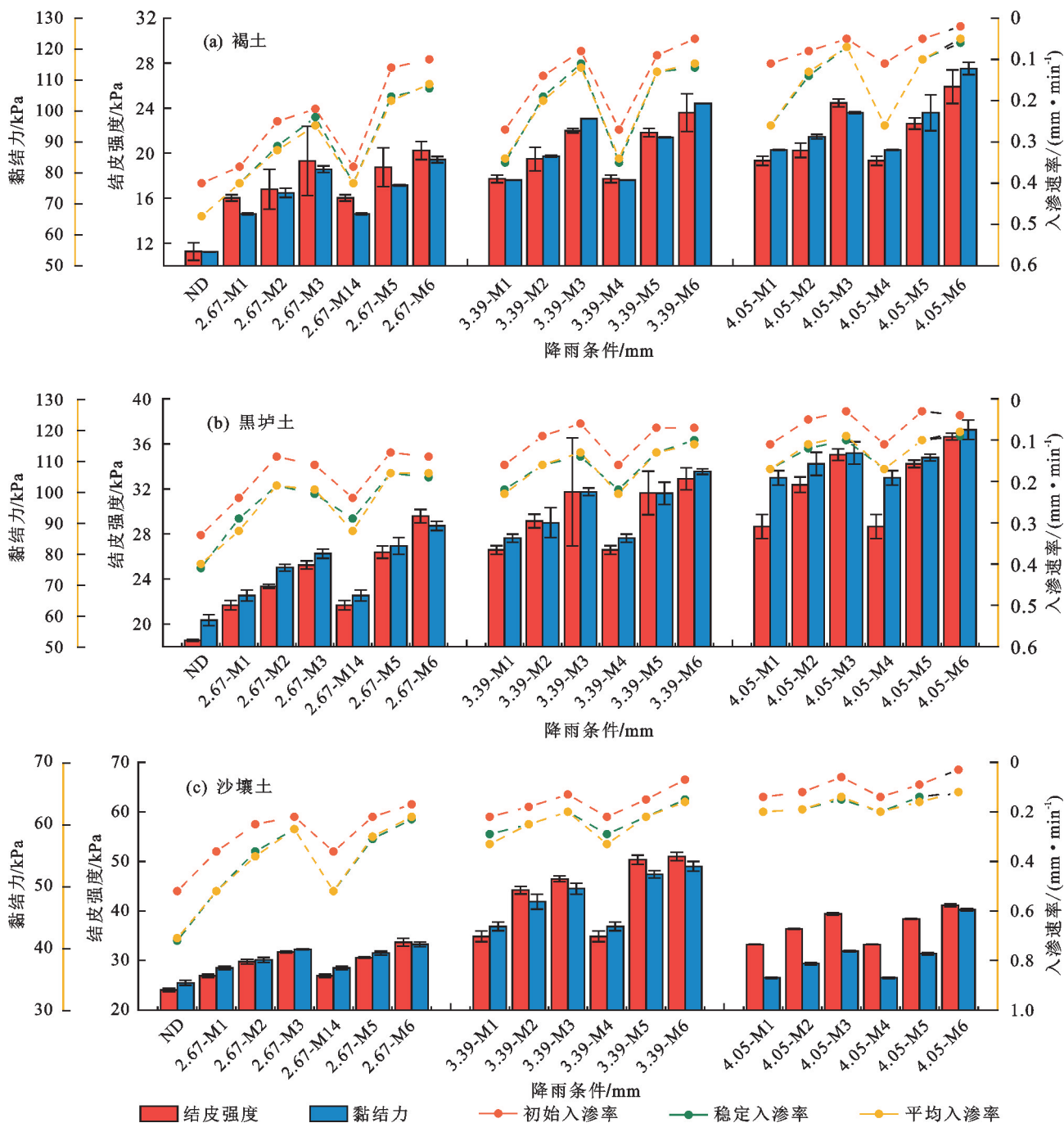
2.1 雨滴击溅下表土入渗性能与结皮的变化关系

图 2 为土壤入渗性能随降雨强度、降雨时间及间歇性降雨场次的变化趋势。统计的数据初步显示,土壤结皮强度和黏结力与含水率呈抛物线变化趋势,且随着含水率的增加,结皮强度和黏结力呈先缓慢下降后快速下降趋势,因此,采用二次回归分析得出,土壤结皮强度和黏结力与含水率的曲线关系($R^2 = 0.77 \sim 0.99$, $p < 0.05$),以实际田间平均含水率 20% 下的强度作为土壤结皮强度和黏结力的指标。结皮强度和黏结力随着连续性降雨时间、间歇性次数的增加而增加;在降雨时间相同情况下,间歇性降雨下形成结皮的强度和黏结力高于连续性降雨。土壤结皮对初始入渗速率的影响最大,也是影响径流产生的最重要原因之一。

将不同降雨条件下的入渗性能和土壤结皮强度和黏结力变化进行对比分析发现,褐土、黑垆土的入渗性能与土壤结皮强度及黏结力表现极其显著的相关性,沙壤土的入渗性能与土壤结皮强度和黏结力相关性不高。但是 3 类土壤都在结皮的抵抗力学破坏能力增大时,入渗性能反之减弱。结皮对于入渗性能的削弱能力表现为初始入渗速率 > 稳定入渗速率 > 平均入渗速率。数据可视化分析发现,褐土和黑垆土的结皮强度和黏结力与入渗性能呈显著的线性关系,即随着结皮强度和黏结力的增大,入渗性能反之减小;沙壤土则呈显著的非线性关系,即随着结皮强度和黏结力的增大,而入渗性能表现为先减小后增大趋势。为更具体显示结皮强度和黏结力与入渗性能之间的函数关系,采用 Levenberg—Marquardt 优化算法进行线性拟合得到关系式,褐土、黑垆土的结皮强度和黏结力与入渗性能的关系式为 $y = ax + b$,

沙壤土为 $y = ax^b$, 相关系数 a 、 b 见表 2。其中, 褐土和黑垆土的关系式中系数 a 及沙壤土的关系式中

数 b 之所以为负值, 是由于入渗性能随着土壤结皮力学特性的增强而减小。



注: 图中柱状图的数值对照纵坐标(左), 点线图的数值统一对照纵坐标(右); 横坐标标尺信息: ND 为未干扰的空白对照土样, 例 2.67mm-M1 前部为雨滴直径, 后部为降雨模式。

图 2 不同降雨条件下形成的结皮与入渗性能的关系

Fig. 2 Relationship between crust formation and infiltration performance under different rainfall conditions

2.2 雨滴击溅下表土结皮入渗性能与团聚体粒径分布变化的关系

降雨过程中首先破坏的是土壤结构, 致使团聚体破碎为细小的团聚体, 并随着水分入渗填充进土壤孔隙中堵塞孔隙, 降低土壤孔隙的连通性, 进而影响着水分入渗^[20]。因此, 需进一步探究受降雨影响后团聚体的组成与入渗性能变化的关系。由图 3 可知,

>250 μm 的 4 个粒级的团聚体含量随着连续降雨时间和间歇性次数的增加呈减少趋势, <250 μm 的 3 个粒级的团聚体含量随连续降雨时间和间歇性次数的增加呈上升趋势, 表明在降雨过程中, >250 μm 粒级的团聚体破碎成 <250 μm 粒级的微小团聚体。在间歇性降雨条件下, 表土结皮中 <250 μm 的 3 个粒级的团聚体含量分别高于连续性降雨约 9.51%

(106~250 μm), 24.72% (53~106 μm), 45.28% (< 53 μm)。在水蚀过程中,团聚体破碎的机制主要是通过快速润湿和雨滴击溅作用引起的机械破坏导致团聚体的崩解^[21]。雨滴的动能直接作用在土壤表面,使>0.25 mm 团聚体破碎形成微团聚体,改变团聚体的空间分布特征。

表 2 土壤入渗性能与结皮强度和黏结力的线性关系

Table 2 Linear relationship between soil infiltration performance and crust strength or bonding force										
土壤类型	项目	初始入渗率			稳定入渗率			平均入渗率		
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> ²
褐土	结皮强度	−0.030	0.742	0.841	−0.033	0.859	0.897	−0.033	0.872	0.901
	黏结力	−0.007	0.767	0.838	−0.008	0.870	0.851	−0.008	0.887	0.871
黑垆土	结皮强度	−0.015	0.552	0.880	−0.016	0.629	0.887	−0.016	0.648	0.906
	黏结力	−0.004	0.513	0.854	−0.004	0.587	0.855	−0.005	0.604	0.875
沙壤土	结皮强度	6 617.432	−2.986	0.824	3 271.257	−2.672	0.821	2 380.000	−2.576	0.803
	黏结力	1.596×10 ⁵	−3.703	0.731	2.225×10 ⁴	−3.060	0.774	1.090×10 ⁴	−2.862	0.718

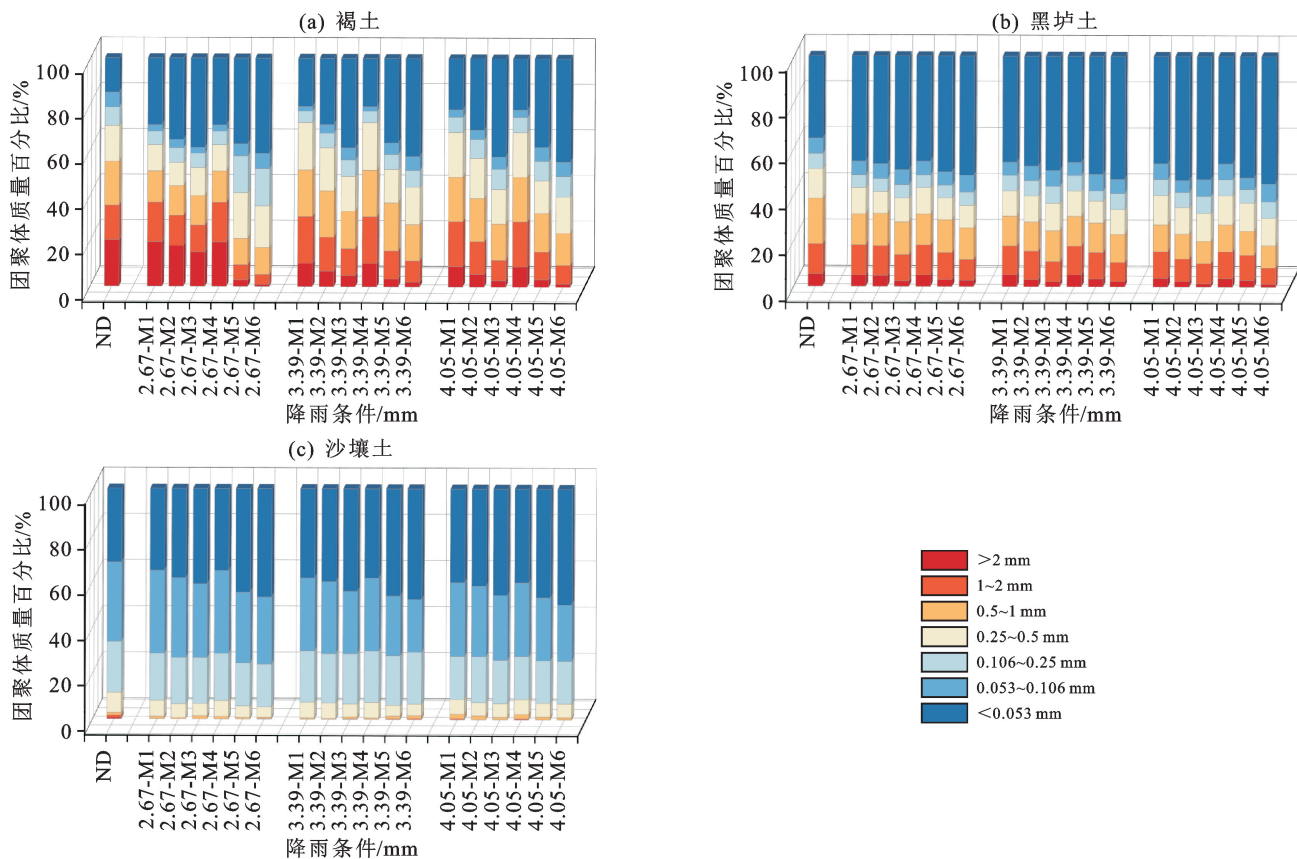


图 3 不同降雨条件下表层结皮的团聚体粒径含量

Fig. 3 Aggregate particle size content of surface crust under different rainfall conditions

已有研究^[20]表明,土壤团聚体的稳定性与降雨入渗有着密切的关系。褐土和黑垆土的结皮强度与入渗性能呈显著的负相关性,沙壤土反而不显著,与土壤本身的结构特征有关,土壤团聚体的平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)能够有效地表征结构特征。GMD 和 MWD 反映团聚体大小及稳定性,值越小,微团聚体越多,土壤结构越不稳定。图 4 为土壤入渗性能与团聚体的分布特征和稳定性存在显著的相关性,随着表土团聚体的 MWD 和 GMD 降低,土壤入渗性能均呈下降趋势,对于入渗性能的减渗效

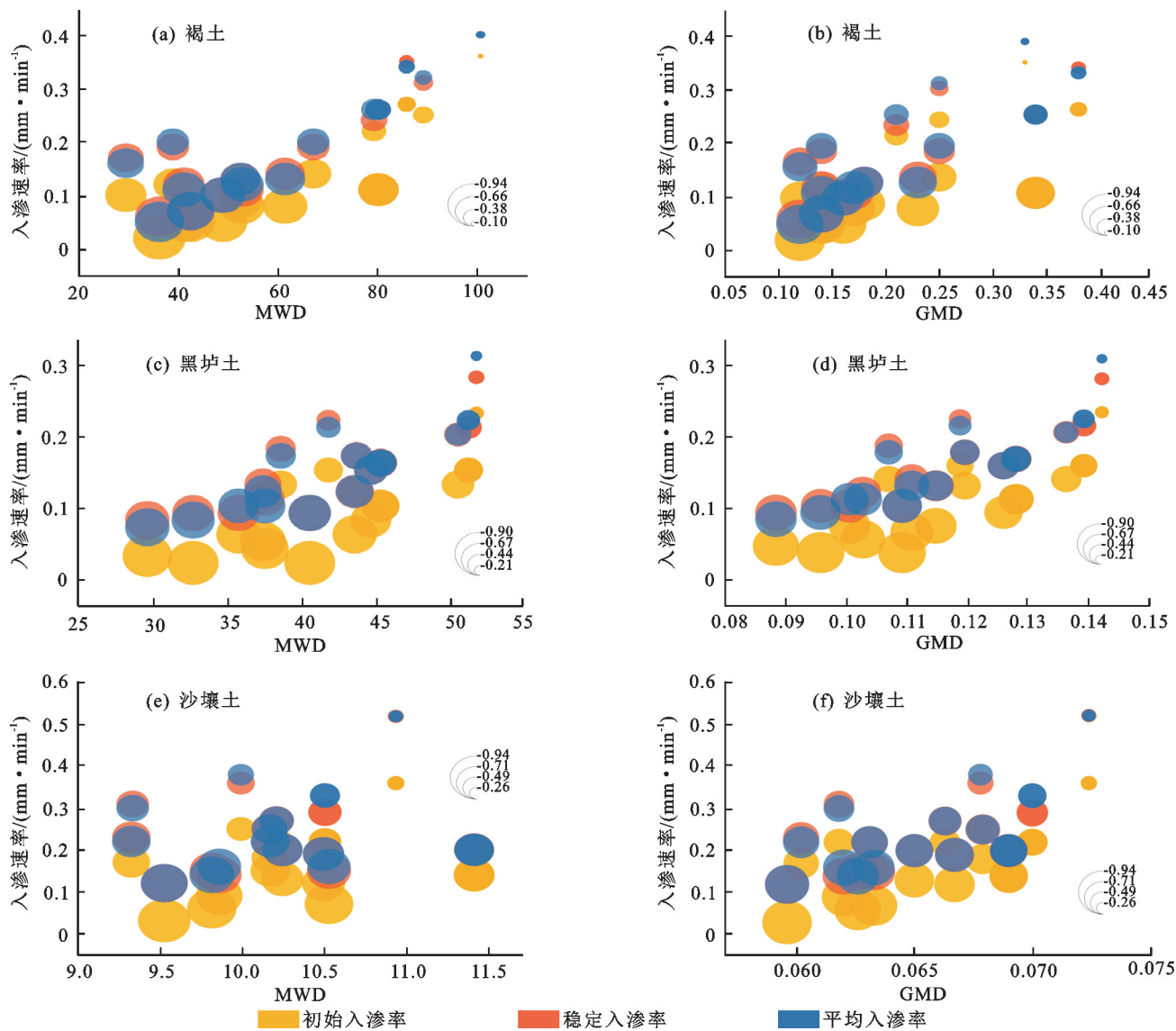
应也随之增大。MWD 和 GMD 的大小变化对于初试入渗率的影响最大,对于稳定入渗率的减渗效应相对较小。土壤中大团聚体越多,MWD 和 GMD 值越大,孔隙连通性越好,入渗性能更好,减渗效应较弱。

2.3 表土入渗性能与降雨因素之间的关联分析

降雨是影响土壤结皮形成的第一步,由于降雨的打击致使土壤结构的变化,使得团聚体被破坏为更细小的团聚体来堵塞土壤孔隙,并在雨滴打击和径流压实的作用下,形成更致密的结皮,因此,从降雨因素分析,能够从根本原因上探究影响入渗性能变化的成

因。根据灰色关联度分析法对土壤表层入渗性能(初始入渗率、稳定入渗率、平均入渗率)与不同降雨因素的关联度进行分析,关联度越大,表明该影响因素对入渗性能的影响更重要。由表 3 可知,间歇性降雨条件对土壤表层入渗性能的关联度最大,表明间歇性降雨对入渗性能的影响起到主导作用,灰色关联度分析

的结果印证该试验设计的设想。间歇性降雨对于表土入渗性能的影响高于连续性降雨,随着间歇性降雨场次增加,土壤结皮强度和黏结力随之提高,对于土壤团聚体的粒径分布的影响更大,因此,间歇性降雨能够更大程度增加表土的减渗效应,间歇场次越多,减渗效应越大。



注:圆的直径越大代表其减渗效益的越大。

图 4 表层结皮的 MWD 和 GMD 与入渗性能之间的变化关系

Fig. 4 The relationship between infiltration performance surface and crust of MWD or GMD

3 讨论

随着雨滴直径、累积降雨时长和间歇性降雨次数的增加,褐土和黑垆土的结皮强度和黏结力也随之增加;入渗性能与结皮抵抗力学破坏的能力则呈负相关性,即结皮强度和黏结力越大,土壤入渗性能越差;与 MA 等^[12]和路培等^[22]研究结果一致。但是,沙壤土的结皮强度和黏结力随雨滴直径、累积降雨时长和间

歇性降雨次数的增加呈先增大后减小趋势,表明沙壤土含砂量较大,土质疏松,在大雨量的冲刷下,团聚体之间的黏结性较弱,形成的结皮较脆。GIMENEZ 等^[23]和 马敢敢等^[24]发现,在较高的降雨强度增加土壤含水量且减小土壤渗透率,与本试验结果类似。在雨强相同下,间歇性降雨形成的结皮对于土壤入渗性能的削弱能力要强于连续性降雨。

表 3 各土壤类型的入渗性能与降雨因素的灰色关联度分析

Table 3 Results of GRAGM between infiltration performance of each soil type and each influencing factor

土壤类型	影响因素	初始入渗率		稳定入渗率		平均入渗率	
		关联度	排名	关联度	排名	关联度	排名
褐土	降雨时间	0.493 1	4	0.473 3	4	0.497 7	4
	降雨强度	0.550 2	3	0.538 3	3	0.542 6	3
	连续性降雨	0.615 2	2	0.589 7	2	0.599 7	2
	间歇性降雨	0.643 8	1	0.612 2	1	0.615 4	1
黑垆土	降雨时间	0.508 5	4	0.496 7	4	0.492 6	4
	降雨强度	0.575 0	3	0.567 8	3	0.558 5	3
	连续性降雨	0.665 6	2	0.659 6	2	0.643 2	2
	间歇性降雨	0.674 3	1	0.673 6	1	0.661 3	1
沙壤土	降雨时间	0.513 4	4	0.519 7	4	0.512 2	4
	降雨强度	0.585 3	3	0.598 8	3	0.587 6	3
	连续性降雨	0.684 0	2	0.688 4	2	0.676 6	2
	间歇性降雨	0.703 9	1	0.720 0	1	0.708 6	1

分析各粒级团聚体的质量百分比发现,间歇性降雨使团聚体被分解得更细小^[12]。2 次间歇性降雨(M6)后<250 μm 的 3 个粒级的团聚体含量的增加率小于 1 次间歇性降雨(M5),因为微小团聚体的质量较小导致其质量占比变化不明显,同时,在间歇性降雨过程中,第 1 次降雨时许多大团聚体已被分解为微团聚体,而在进行第 2 次降雨时表土中提供分解为微团聚体的大团聚体含量不足。因此,随着间歇性降雨的次数增加,微小团聚体的数量虽有增加但增长率在逐渐变小,也揭示随着降雨次数的增加,结皮力学强度虽然在增大,但增大的趋势逐渐平滑的原因。结皮力学特征与各粒级团聚体含量有关,细小团聚体含量越多,孔隙堵塞越严重,结皮越结实,此结果与路培等^[22]研究结果一致。LEGOUT 等^[25]指出,微团聚体(< 250 μm)黏结在一起形成大团聚体(> 250 μm),降雨使得大团聚体(> 250 μm)被分解为微小团聚体(<250 μm),本试验也得到相同结论。各粒径团聚体的组成不能直观地反映入渗性能的变化情况,因此,将其转化为 GMD 和 MWD 发现,减渗效应随着 GMD 和 MWD 的增加而增加。细小团聚体含量越多,GMD 和 MWD 越小,同时反映土壤的孔隙率和孔隙连通性越低,表明间歇性降雨能最大程度上削弱土壤入渗性能。

试验结果表明,雨滴直径、累积降雨时长和降雨模式都影响土壤结皮的形成,进而影响入渗性能的变化。灰色关联度结果表明,诸降雨因素中间歇性降雨对入渗性能的影响最大,同时,间歇次数越多,减渗效应越大^[26],因此,间歇性降雨对入渗性能的削弱程度高于同等降雨时长的连续性降雨,也促使结皮中含有更多细小的团聚体,进而形成结皮强度和黏结力更大的结皮。

4 结 论

(1)雨滴击溅土壤与未击溅土壤相比,随着降雨强度、降雨时间、降雨间歇次数的增加,土壤结皮强度和黏结力也随之增加,而土壤入渗性能随之减弱,呈显著相关性($p<0.05$)。在降雨强度及累积降雨时长相同条件下,间歇性降雨对入渗性能的减渗效应高于连续降雨。

(2)雨滴击溅后,粒径>250 μm 的团聚体被分解成为粒径<250 μm 的微小团聚体;在雨强和累积降雨时间相等条件下,2 次间歇性降雨后,团聚体破坏程度最大,高于连续性降雨 26.50%。结皮团聚体的 MWD 和 GMD 大小与入渗性能呈显著正相关,与减渗效应呈显著负相关,并且对初试入渗率的减渗效应影响最明显。

(3)入渗性能的变化与降雨时间、降雨强度、间歇性次数等降雨因素及 GMD、MWD 呈显著相关性($p<0.05$)。降雨是结皮形成进而导致入渗性能变化的直接影响因素,灰色关联分析结果显示,各降雨因素中间歇性降雨次数对于入渗性能的影响力更大。

通过模拟降雨试验研究不同降雨条件对耕作层表土的结皮形成和入渗性能变化的影响,分析连续性降雨和间歇性降雨对于入渗性能影响的关系,以期能对探究黄土高原土壤侵蚀问题的研究提供参考依据,对黄土高原农业发展和水资源保护利用提供有利的帮助。

参考文献:

[1] SAFWAN M, ALAA K, OMRAN A, et al. Predicting soil erosion hazard in Lattakia Governorate (W Syria) [J].International Journal of Sediment Research,2021,36 (2):207-220.

[2] HAO A W, ZHANG H J, HAN S C, et al. High-reso-

- lution Moho depth and V_p/V_s ratio distributions in Northeast China from joint inversion of receiver functions and gravity data and their geological implications[J]. *Science China Earth Sciences*, 2023, 66(7): 1569-1582.
- [3] ZHAI L, YANG K, JIANG F Y, et al. High-performance solid-state lithium metal batteries achieved by interface modification[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 79: 357-364.
- [4] 蔡强国, 陆兆熊. 黄土发育表土结皮过程和微结构分析的试验研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 1996, 4(4): 363-370.
- CAI Q G, LU Z X. Experimental study on the process and microstructure analysis of topsoil crust in loess development[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 1996, 4(4): 363-370.
- [5] MOORE D C, SINGER M J. Crust formation effects on soil erosion processes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(4): 1117-1123.
- [6] 郁耀闯, 张光辉. 黄土丘陵区典型农耕地土壤稳定入渗率季节变化[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(2): 8-11, 17.
- YU Y C, ZHANG G H. Temporal variation of soil steady-state infiltration rate under typical cultivated land in hilly region of Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(2): 8-11, 17.
- [7] LIU H, LEI T W, ZHAO J, et al. Effects of rainfall intensity and antecedent soil water content on soil infiltrability under rainfall conditions using the run off-on-out method[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 396(1/2): 24-32.
- [8] HUANG Z, TIAN F P, WU G L, et al. Legume grasslands promote precipitation infiltration better than graminaceous grasslands in arid regions[J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(1): 309-316.
- [9] 高燕, 郑粉莉, 王彬, 等. 土壤结皮对黑土区坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(4): 17-20.
- GAO Y, ZHENG F L, WANG B, et al. Effects of soil crust on runoff and sediment on hillslope in black soil region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(4): 17-20.
- [10] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 97-101.
- WU F Q, FAN W B. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 97-101.
- [11] FU Y, LI G L, ZHENG T H, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion[J]. *Catena*, 2019, 185: e104342.
- [12] MA G G, LI G L, MU X D, et al. Effect of raindrop splashes on topsoil structure and infiltration characteristics[J]. *Catena*, 2022, 212: e106040.
- [13] FU Y, LI G L, WANG D, et al. Raindrop energy impact on the distribution characteristics of splash aggregates of cultivated dark loessial cores[J]. *Water*, 2019, 11(7): e1514.
- [14] 杨凯. 黄土丘陵区生物结皮盖度影响坡面产流产沙的动力机制[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- YANG K. Effect and dynamic mechanism of biocrusts with different coverage on runoff and sediment in the Hilly Loess Plateau[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2023.
- [15] CHAMIZO S, RODRÓGUEZ-CABALLERO E, CANTÓN Y, et al. Penetration resistance of biological soil crusts and its dynamics after crust removal: Relationships with runoff and soil detachment[J]. *Catena*, 2015, 126: 164-172.
- [16] FANG X, ZHOU G Y, LI Y L, et al. Warming effects on biomass and composition of microbial communities and enzyme activities within soil aggregates in subtropical forest[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2016, 52(3): 353-365.
- [17] LV Y H, CAI B, YUAN R H, et al. Toward high-efficiency perovskite solar cells with one-dimensional oriented nanostructured electron transport materials[J]. *Journal of Energy Chemistry*, 2023, 82(7): 66-87.
- [18] 张登科, 宋珍珠. 不同连作年限下土壤物理性质对土壤饱和导水率空间分布的影响[J]. *土地开发工程研究*, 2018, 3(10): 41-47.
- ZHANG D K, SONG Z Z. Effects of soil physical properties on soil saturated hydraulic conductivity spatial distribution under different continuous cropping years[J]. *Land Development and Engineering Research*, 2018, 3(10): 41-47.
- [19] BARRETO R C, MADARI B E, MADDOCK J E L, et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO_2 in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 132(3/4): 243-251.
- [20] 张佐源, 夏彬, 郝旺林, 等. 黄土高原坝地层状土壤剖面孔隙分布特征[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(6): 83-90.
- ZHANG Z Y, XIA B, HAO W L, et al. Pore distribution characteristics of layered soil profile in dam land of loess plateau[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(6): 83-90.
- [21] LEGOUT C, LEGUÉDOIS S, LE BISSONNAIS Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. *Geoderma*, 2005, 124(3/4): 279-292.

- [17] 张丙昌,武志芳,李彬.黄土高原生物土壤结皮研究进展与展望[J].土壤学报,2021,58(5):1123-1131.
ZHANG B C, WU Z F, LI B. Progress and prospect of biological soil crusts in Loess Plateau[J].Acta Pedologica Sinica,2021,58(5):1123-1131.
- [18] TIAN G Q, BAI X L, XU J, et al. Experimental studies on the natural restoration and the artificial culture of the moss crusts on fixed dunes in the tengger desert, China[J].Frontiers of Biology in China,2006,1(1):13-17.
- [19] 李盼盼,王兵,刘国彬,等.氮添加对白羊草种群及土壤特征的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(2):35-42.
LI P P, WANG B, LIU G B, et al. Effects of nitrogen addition on the population characteristics of *Bothriochloa ischaemum* and soil properties[J].Science of Soil and Water Conservation,2017,15(2):35-42.
- [20] 李聪会,朱首军,陈云明,等.黄土丘陵区生物结皮对土壤抗蚀性的影响[J].水土保持研究,2013,20(3):6-10.
LI C H, ZHU S J, CHEN Y M, et al. Effects of biological crusts on soil anti-erodibility in loess hilly areas [J].Research of Soil and Water Conservation,2013,20(3):6-10.
- [21] XIAO B, SUN F H, HU K L, et al. Biocrusts reduce surface soil infiltrability and impede soil water infiltration under tension and ponding conditions in dryland ecosystem[J].Journal of Hydrology,2019,568:792-802.
- [22] BELNAP J. The potential roles of biological soil crusts in dryland hydrologic cycles[J].Hydrological Processes, 2006,20(15):3159-3178.
- [23] 孙福海,肖波,李胜龙,等.黄土高原不同发育阶段生物结皮的导水和持水特征[J].草业学报,2021,30(6):54-63.
SUN F H, XIAO B, LI S L, et al. Effects of biological soil crusts in different developmental stages on soil water permeability and water holding capacity in the Chinese Loess Plateau[J].Acta Prataculturae Sinica,2021,30(6):54-63.
- [24] 马金龙,许欢欢,王兵,等.黄土高原坡耕地土壤物理结皮对坡面产流产沙过程的影响[J].水土保持学报,2022,36(1):45-49.
MA J L, XU H H, WANG B, et al. Effect of soil physical crust on runoff and sediment yield on sloping farmland of the Loess Plateau[J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(1):45-49.
- [25] 饶本强,吴易雯,李华,等.库布齐沙漠不同发育类型人工结皮对露水凝结作用的比较研究[J].水土保持学报,2011,25(6):159-164.
RAO B Q, WU Y W, LI H, et al. Comparison studies on dew condensation of different developmental artificial crusts in Hopq Desert[J].Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(6):159-164.
- [26] 陈青.荒漠生物结皮微生物群落组成研究[D].银川:宁夏大学,2014.
CHEN Q. Investigation of microbial communities structure in biological soil crusts of desert [D]. Yinchuan: Ningxia University,2014.
- (上接第72页)
- [22] 路培,王林华,吴发启.不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J].农业工程学报,2017,33(8):141-146.
LU P, WANG L H, WU F Q. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(8):141-146.
- [23] GIMÉNEZ D, ALLMARAS R R, HUGGINS D R, et al. Prediction of the saturated hydraulic conductivity-porosity dependence using fractals[J].Soil Science Society of America Journal,1997,61(5):1285-1292.
- [24] 马敢敢,李光录,穆旭东,等.雨滴直径对表土结构和入渗特征的影响[J].水土保持研究,2022,29(6):104-111.
- MA G G, LI G L, MU X D, et al. Effects of raindrop diameter on topsoil structure and infiltration characteristics [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(6):104-111.
- [25] LEGOUT C, LEGUÉDOIS S, LE BISSONNAIS Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements[J].European Journal of Soil Science,2005,56(2):225-238.
- [26] GUAN S, AN N, ZONG N, et al. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow[J].Soil Biology and Biochemistry,2018,116:224-236.