

雨滴直径对表土结构和入渗特征的影响

马敢敢¹, 李光录^{1,2}, 穆旭东¹, 侯卫亮¹

(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:为探究雨滴击溅对表层土壤结构和入渗特征的影响,揭示土壤微结构与入渗间的深层关联,以黄土高原塋土为对象,采用模拟降雨、同步辐射 CT 扫描和入渗试验,系统地分析了不同雨滴击溅作用下土壤结构变化与入渗速率间的关系。结果表明:(1) 击溅土壤结构发生变化,团聚体数量和三维分形维数显著增加,孔隙体积和大孔隙率显著减小。雨滴直径越大,击溅后的团聚体破碎程度越强,孔隙堵塞率最高达 46.40%。(2) 雨滴击溅下,破碎的团聚体堵塞孔隙,在土壤表层形成致密低渗的结皮层,结皮强度随雨滴直径和击溅次数的增加逐渐增加。(3) 土壤入渗速率随雨滴直径和击溅次数的增加逐渐减小,经过 3 次雨滴击溅后减渗效应最高可达 91.81%。(4) 土壤稳渗速率与雨滴直径和土壤结构特征参数呈显著指数关系变化。研究表明,雨滴直径显著影响表层土壤结构和入渗特征,雨滴直径越大,土壤结构越分散,土壤入渗能力越低。

关键词:雨滴击溅; 团聚体破碎; 孔隙堵塞; 减渗效应

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0104-08

Effects of Raindrop Diameter on Topsoil Structure and Infiltration Characteristics

MA Gangan¹, LI Guanglu^{1,2}, MU Xudong¹, HOU Weiliang¹

(1.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Institute of Soil Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to investigate the effect of raindrop splash on the topsoil structure and its infiltration characteristics, and to reveal the deep relationship between soil microstructure and infiltration, simulated rainfall, synchrotron radiation CT scanning and infiltration tests were used to analyse the relationship between the soil structure and infiltration capacity of Lou soil on the Loess Plateau under different raindrop splashing conditions. The results show that: (1) The structure of the disturbed soil was altered, and the number of aggregates and the three-dimensional fractal dimension degree were significantly increased. At the same time, the pore volume and macro-porosity were significantly reduced. The larger the diameter of raindrop, the stronger the degree of fragmentation and the pore clogging rate reached as high as 46.40%; (2) Under the splash of raindrops, the broken aggregates blocked the pores, and thus a dense and low permeable crust was formed on the topsoil, the crust strength increased with the increase of raindrop diameter and splash frequencies; (3) With increasing splash frequencies and raindrop diameters, the infiltration rate decreased gradually. Three splashes later, the infiltration reduction effect reached 91.81%; (4) The steady infiltration rate changed significantly and exponentially with the raindrop's diameter and soil structure parameters. The results showed that the raindrop diameter significantly affected the topsoil structure and infiltration characteristics. The larger the raindrop diameter was, the more dispersed the soil structure was, and the lower the infiltration capacity of soil was.

Keywords: raindrop splash; aggregate breakdown; pore clogging; infiltration reduction effect

收稿日期:2021-08-14

修回日期:2021-09-14

资助项目:国家自然科学基金“黄土高原土壤侵蚀过程中团聚体循环破坏”(41571262)

第一作者:马敢敢(1997—),男,山东临沂人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀。E-mail:18954976029@163.com

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

水蚀是指在水的作用下,表层土壤被破坏、推移、沉积的过程^[1]。降雨雨滴打击表层土壤,导致土壤团聚体破碎^[2],在地表薄层径流的作用下进一步运输与迁移,形成致密的土壤结皮^[3-4]。分散的土壤细小颗粒堵塞孔隙,减小孔隙率,改变表层土壤微结构,继而导致土壤的导水透气性变差,入渗率减小,地表径流增大,加剧水蚀过程^[5]。土壤入渗是指水分透过表土进入深层土壤的过程^[6],是降水、地面水、土壤水和地下水相互转化的重要环节,对土壤中的水分含量、物质循环、地表径流和侵蚀过程都有重要影响^[7-8]。

土壤结构包括土壤团聚体结构和孔隙结构两方面,均具有不同的大小、形状和空间排列^[9]。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其稳定性是影响土壤侵蚀和地表径流的重要因素之一,已被广泛用于评价土壤结构稳定性和土壤质量的指标。在土壤侵蚀领域,研究显示,土壤粒径分布^[10],土壤有机质含量^[11],前期含水率^[12]等因素对土壤团聚体的稳定性有着重要的影响。在降雨侵蚀过程中,团聚体的破碎和分离主要是大直径雨滴造成的,雨滴直径越大,团聚体的破碎和分散程度越高,破碎的土壤细颗粒为土壤结皮的形成提供了基础物质^[1-2]。在土壤孔隙的研究方面,近年来学者们多使用X射线计算机断层扫描技术对土壤孔隙成像处理^[13-14],与传统土壤切片电镜成像方式相比,其具有快速、无损等许多优势,可以对土壤团聚体或孔隙进行可视化观察与定量分析研究。孔隙特征越来越多地用于描述土壤结构,孔径分布、孔隙率和孔隙连通性对土壤入渗率有重要影响^[13-15]。

降雨的渗透,地下水的补给和蒸散作用影响土壤水分的垂直变化和分布,土壤入渗还与土壤结构、土壤物理性质、地表覆盖率和地形等因素密切相关^[16]。研究发现累积入渗量和湿润锋推进速度随土壤团聚体粒径的增大而减小^[17],土壤孔隙度和土壤有机质含量的增加会促进土壤入渗^[18]。吴发启等^[19]认为降雨后的土壤表层形成封闭的结皮限制了土壤水分的渗透,较高的降雨强度会增加土壤含水量并且减小入渗率。尽管最近有很多关于降雨条件下土壤入渗特征的研究,但很少从土壤结构变化的角度揭示土壤入渗特征变化的根本原因。

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区之一,其生态环境脆弱,水资源匮乏。因全球气候变暖的影响,该区域年降雨量和降雨天数逐渐减少,但降雨强度反而呈上升趋势^[7,17],短时强降雨造成了黄土高原严重的水蚀现象。雨滴击溅侵蚀是造成水土流失的重要原因之一,土壤团聚体经过雨滴侵蚀破碎成细小的颗粒,堵塞孔隙,改变孔隙率,进而影响土壤入渗特

征。土壤入渗特征的变化可能导致土壤水分供应条件的变化,这将严重影响生态系统的结构和功能,影响农业生产活动^[8]。研究以黄土高原典型耕作层土壤塋土为研究对象,量化分析不同雨滴击溅下土壤团聚体和孔隙的结构特征以及土壤入渗特征,分析雨滴击溅与土壤结构和入渗特征的关系,揭示降雨侵蚀与入渗机理,为土壤侵蚀研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤样品采集与理化分析

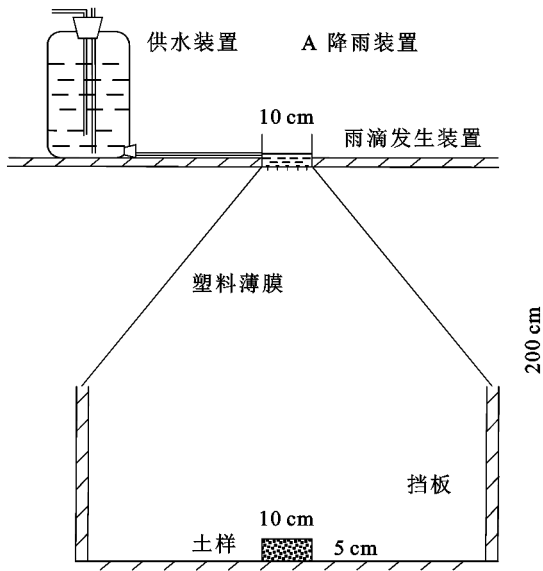
土壤样品采集于陕西省杨陵区(108°03′30.03″E, 34°18′25.95″N)。该地区属于暖温带半湿润大陆性气候,年平均气温 13℃,年平均降水量 550~650 mm,主要集中在 7 月、8 月、9 月。研究区的土壤类型为塋土,主要表现为壤质或粉壤质地。研究在去除土壤表层的枯枝落叶后,通过五点采样法,用环刀(直径 10 cm,高 5 cm)获取表层(0—20 cm)原状土,共采集环刀样品 75 个,其中 3 个环刀样品用来测量土壤容重,其余样品用于模拟降雨和后续试验。另收集 1 000 g 散土样品用于土壤理化性质分析。使用传统方法测得土样容重 1.36 g/cm³,含水率 22.44%,有机质 1.30%,CaCO₃ 含量 74.54 g/kg;机械组成:砂粒(2~0.02 mm)、粉粒(0.02~0.002 mm)和黏粒(<0.002 mm)分别为 29.96%,43.68%,26.36%。

1.2 试验设计与分析

试验于 2020 年在西北农林科技大学水土保持工程实验室进行。对采集后的环刀土样进行模拟降雨试验,试验采用自制降雨装置,见图 1A,雨滴发生装置为针头下滴式,由顶部开口的圆柱体(直径为 10 cm,高 10 cm)组成,在其底部每隔 2 cm 等间距布设医用针头 21 个。降雨试验前,将土样置于低于环刀高度的装水箱体内饱和 8 h,然后取出静置 12 h,使环刀内水重力流出,保持样品具有相同含水率。模拟降雨期间向圆柱体内供应保持 2 cm 高的恒定水头,通过控制针头型号得到不同的雨滴直径。试验过程中使用 3 种型号的针头(7,12,16),每个型号针头的降雨持续时间为 10 min。测得 3 种针头产生的雨滴直径分别为 2.67,3.39,4.05 mm,降雨强度分别为 5.76,68.61,217.26 mm/h,雨滴能量分别为 2.41×10^{-5} , 5.15×10^{-5} , 8.97×10^{-5} J/(m²·s),降雨参数符合黄土高原降雨特征。同时设置未击溅(CK)、第 1 次击溅(R₁)、第 2 次击溅(R₂)和第 3 次击溅(R₃)等不同击溅次数处理,用击溅次数-雨滴直径表示每组处理,如 R₁-2.67,以下表示相同意义。击溅完成后将样品置于室内自然风干,击溅间隔时间为 7 d。模拟降雨试验共 10 组不

同处理,其中 1 组为对照处理(未击溅),9 组为不同雨滴直径和击溅次数击溅处理。其中对照处理和第 1 次击溅下不同雨滴直径处理各重复 9 次,击溅后分别进行同步辐射 CT 扫描、入渗、结皮强度等试验,每项试验各重复 3 次;第 2 次、第 3 次击溅下不同雨滴直径处理各重复 6 次,击溅后分别进行入渗、结皮强度试验,每项试验各重复 3 次。

用小刀从未击溅土壤样品与第 1 次不同直径雨滴击溅风干后的样品表层获取干土块,长度、宽度和高度均为 2 cm,保存在海绵容器中。对选取的 12 个土块(表层 0.5 cm)进行同步辐射 CT 扫描。图像扫描采用的是上海同步辐射装置中的 X 射线成像及生物医学应用线站(BL13W1)的同步辐射 CT 装置,使用装置配套软件(PITRE)进行图像转换和切片重



构。土壤扫描图像的处理、可视化和量化分析均在 ImagePyv0.2 软件中进行,具体扫描参数与图像处理操作步骤方法详见参考文献[14]。

土壤结皮强度使用数显推拉力计法测定,每组降雨击溅试验结束后将样品置于室内自然风干 7 d,使用数显推拉力计测定土壤结皮强度,同时测量相应土壤含水率,将测得的土壤结皮强度与相应含水率数据进行拟合,取平均含水率下对应的数据作为每组处理的土壤结皮强度。土壤饱和入渗特征用环刀法测定,装置见图 1B,将空环刀倒放在样品环刀上,用凡士林和防水胶带密封连接。将薄海绵片放置在空环刀内,防止供应的水流对土样的破坏。通过马氏瓶向环刀内供水,并保持环刀内水头高度 5 cm 不变。通过电子天平记录读数,试验时间共持续 60 min。

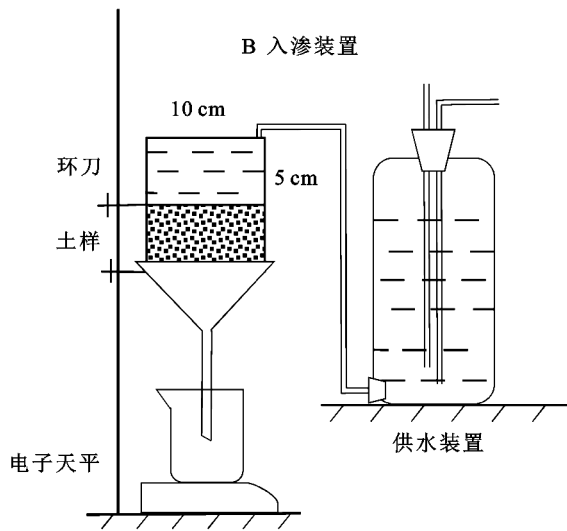


图 1 试验装置示意图

1.3 数据分析

提取团聚体和孔隙的三维结构参数来描述表土结构特征,根据土壤团聚体的粒径大小将团聚体划分为 5 个等级:≥500,250~500,106~250,53~106,<53 μm。将粒径≥250 μm 的团聚体定义为大团聚体,<250 μm 的团聚体定义为微团聚体^[2]。根据孔隙的当量直径将孔隙划分为 6 个等级:≥1 000,100~1 000,75~100,50~75,25~50,<25 μm。将孔径≥100 μm 的孔隙定义为大孔隙,<100 μm 则为小孔隙^[14]。

土壤团聚体几何平均直径(GMD)通过修改 Katz 等^[20]提出的方法计算,假设土壤各粒径团聚体密度相同,将式中各粒径的质量分数转化为体积分数,通过图像处理提取的团聚体体积数据进行计算,如下:

$$GMD=\exp(\sum_{i=1}^n p_i \ln x_i \sum_{i=1}^n p_i)$$
 (1)

式中: x_i 为任一粒径范围团聚体的平均直径(μm); p_i 为任一粒径范围团聚体的体积占总体积的分数(%)。

利用 ImagePy v0.2 软件的 Kit3D 工具计算土壤团聚体数量(A)、团聚体三维分形维数(FD)、孔隙体积(V_p)。土壤孔隙比表面积(SS_p)可用孔隙内壁表面积与孔隙体积的比值来定量描述,可反映单位体积上内孔隙对水分和溶质运动的阻挡能力。土壤大孔隙率(P_L)通过图像处理时孔径≥100 μm 的孔隙体积与研究区域体积的比值进行计算。土壤孔隙堵塞率(CR)通过雨滴击溅前后土壤孔隙率的变化计算^[14]。

$$CR=\frac{P_0-P_i}{P_0}\times 100\%$$
 (2)

式中: P_0 为未击溅土壤孔隙率(%); P_i 为不同雨滴击溅后土壤孔隙率(%)。

入渗特征的渗透参数和减渗效应(IR)的计算方法如下^[21]:

$$v=\frac{10\ Q_n}{t_n\cdot S}\tag{3}$$

$$K_{10}=\frac{10\ Q_n\cdot L}{t_n\cdot S(h+L)(0.7+0.03t)}\tag{4}$$

$$\text{IR}=\frac{v_0-v_i}{v_0}\times 100\%\tag{5}$$

式中: v 为渗透速率(mm/min); Q_n 为单位时间渗出水量(ml),试验时根据天平读数即渗出水质量换算成体积; S 为环刀横截面积(cm^2); t_n 为单位入渗间隔时间(min),取试验末 4 次单位间隔时间入渗速率均值为稳渗速率; K_{10} 为温度为 10°C 时的饱和导水率(mm/min); h 为环刀内水头高度(cm); L 为土层厚度(cm); t 为测定时水的温度($^\circ\text{C}$);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。

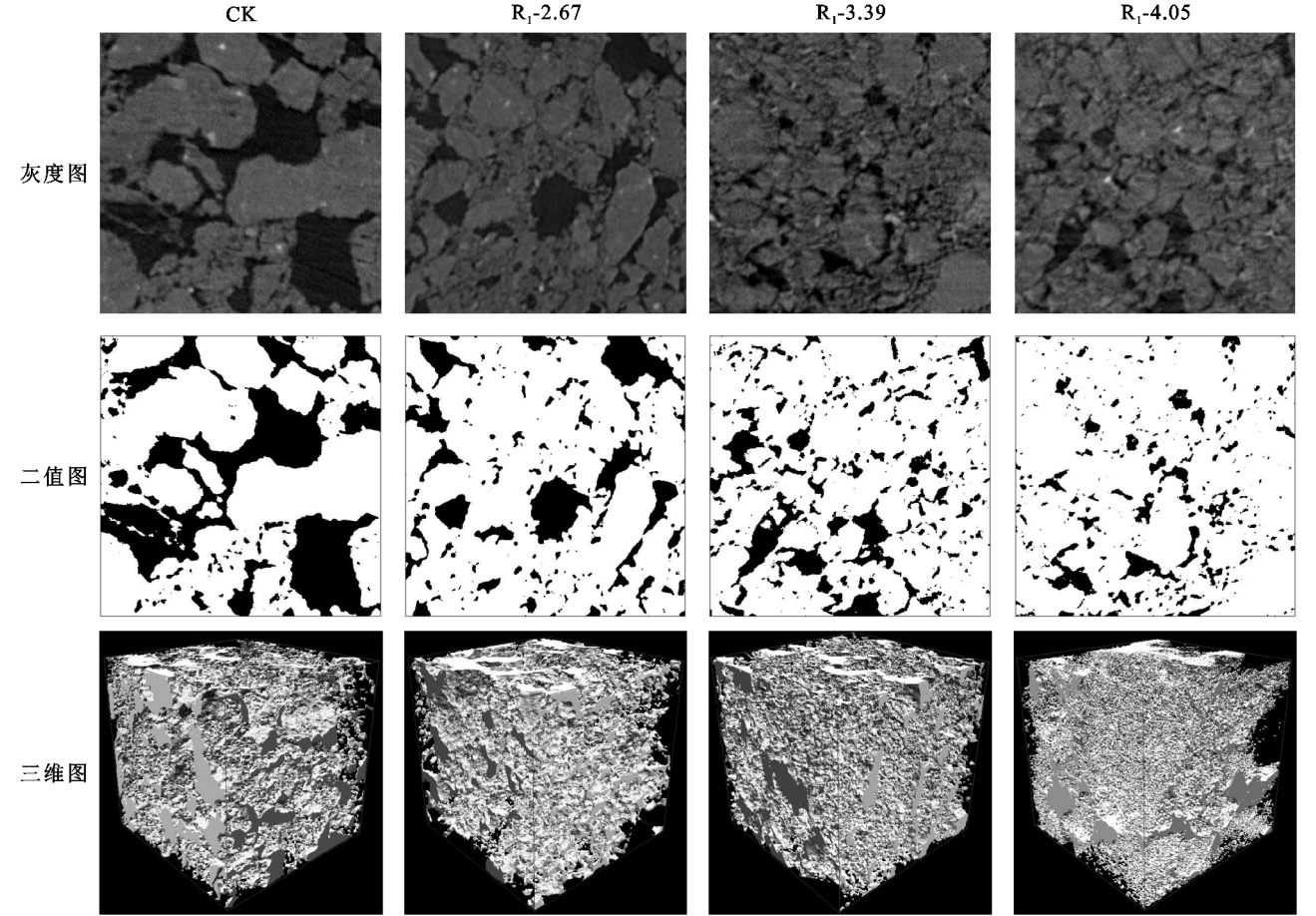
试验中使用 Microsoft Office Excel 2019,Origin Pro 2021 和 SPSS 16.0 进行数据处理、图表绘制和统计分析。数据分析采用方差分析(ANOVA)和最小显著差异法

(LSD),均在 $p<0.05$ 的显著性水平下进行差异显著性检验,表格中的误差使用标准偏差表示。

2 结果与分析

2.1 雨滴击溅与表土结构微观变化

对第 1 次不同直径雨滴击溅后的表层土块进行同步辐射 CT 扫描和图像处理,得到表层土壤结构的二维和三维图像(图 2)。在二维灰度图和二值图中,白色区域表示土壤团聚体,黑色区域表示土壤孔隙,在三维图中显示的是孔隙结构(灰色框内)。从图中可以看出击溅后土壤团聚体粒径小与未击溅土,并且随着雨滴直径的增大,团聚体破碎程度越明显,大团聚体破碎成微团聚体,在各种力的相互作用下进一步聚集形成封闭区域。击溅土壤孔隙被破碎的团聚体堵塞,大孔隙体积减小,连通性降低,微孔隙数量增加,孔隙变得更加孤立。随着雨滴直径的增大,其动能相应增加,对土壤结构的影响也就越大。



注:灰度图与二值图边长均为 $1.664\text{ mm}\times 1.664\text{ mm}$,三维图中立方体边长均为 $1.664\text{ mm}\times 1.664\text{ mm}\times 1.664\text{ mm}$ 。CK 表示对照组(未击溅);用击溅次数—雨滴直径表示各击溅处理,例 $R_1-2.67$ 表示第 1 次 2.67 mm 直径雨滴击溅处理,以下表示相同意义。

图 2 雨滴击溅下土壤微观结构变化

2.2 雨滴击溅下土壤团聚体与孔隙结构特征

对表土团聚体三维结构进行分析和提取,得到土壤团聚体的结构特征参数和分布特征,见表 1 和图

3。从表 1 可以发现,雨滴击溅后土壤 A 和 FD 大于未击溅土,且随雨滴直径的增加逐渐增加,4.05 mm 直径雨滴击溅后 A 和 FD 显著增加($p<0.05$)。FD

是土壤破碎度的度量,值越大,则团聚体的破碎或分散程度越大,细粒物质(黏粒,粉粒)含量越高,对空间的填充能力越强^[11]。雨滴击溅后土壤 GMD 小于未击溅土,且随雨滴直径的增加逐渐减小,不同雨滴直径间无显著差异($p>0.05$)。GMD 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^[22]。从图 2 中可以发现,表层土壤主要由微团聚体(<250

μm)构成,其中占比最大的是 $106\sim250\ \mu\text{m}$ 粒径的团聚体,占总团聚体数量的 $36.90\%\sim68.86\%$ 。击溅土壤大团聚体($>250\ \mu\text{m}$)数量小于未击溅土,且随雨滴直径的增加而减少。击溅土壤微团聚体数量大于未击溅土,且随着雨滴直径的增加逐渐增加。但 $4.05\ \text{mm}$ 直径雨滴因较大的雨滴能量使 $106\sim250\ \mu\text{m}$ 粒径团聚体继续破碎,所以数量小于未击溅土。

表 1 雨滴击溅下土壤团聚体和孔隙特征参数

处理	团聚体特征参数			孔隙特征参数		
	数量/个	几何平均直径/ μm	三维分形维数	体积/ μm^3	比表面积/ μm^{-1}	大孔隙率/%
CK	$490.33\pm16.17\text{A}$	$284.99\pm84.64\text{A}$	$2.79\pm0.02\text{A}$	$1.11\text{E}+09\pm2.31\text{E}+08\text{B}$	$0.09\pm0.01\text{A}$	$23.36\pm5.38\text{B}$
$\text{R}_1\text{-}2.67$	$512.00\pm27.22\text{A}$	$276.62\pm62.82\text{A}$	$2.80\pm0.01\text{A}$	$1.08\text{E}+09\pm9.13\text{E}+07\text{B}$	$0.08\pm0.01\text{A}$	$22.65\pm2.01\text{B}$
$\text{R}_1\text{-}3.39$	$659.33\pm67.26\text{A}$	$205.27\pm29.62\text{A}$	$2.83\pm0.01\text{B}$	$8.13\text{E}+08\pm8.37\text{E}+07\text{A}$	$0.12\pm0.01\text{A}$	$16.52\pm1.98\text{A}$
$\text{R}_1\text{-}4.05$	$1249.33\pm251.29\text{B}$	$200.41\pm57.67\text{A}$	$2.85\pm0.02\text{B}$	$5.92\text{E}+08\pm8.90\text{E}+07\text{A}$	$0.44\pm0.06\text{B}$	$11.86\pm2.34\text{A}$

注:不同的大写字母表示各参数在不同直径雨滴击溅土壤处理间差异显著, $p<0.05$ 。

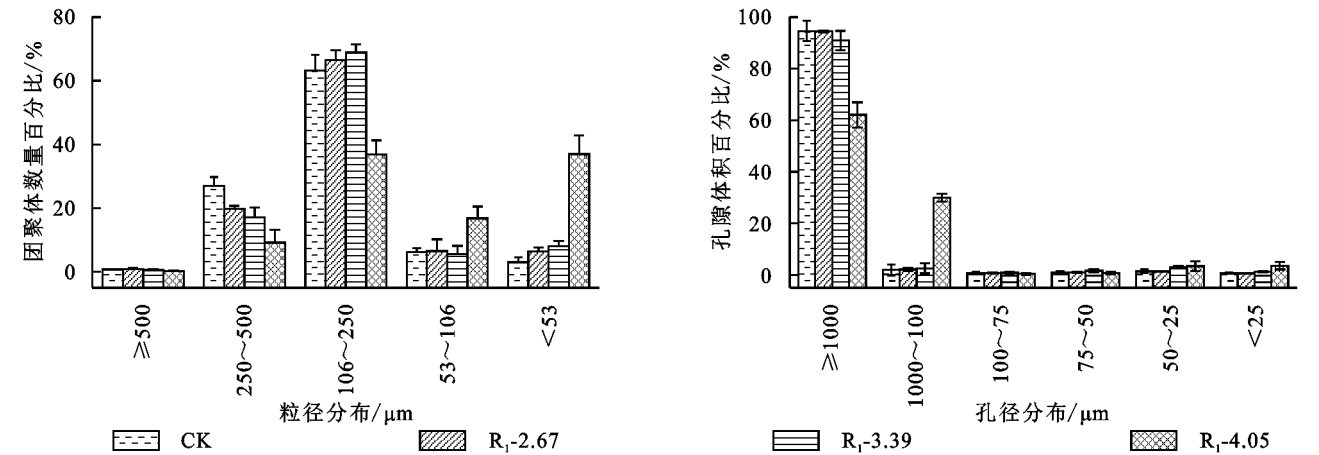


图 3 雨滴击溅下土壤团聚体与孔隙分布特征

表土孔隙三维结构进行分析和提取,得到表土孔隙的结构特征参数和分布特征,见表 1 和图 3。从表 1 可以发现,雨滴击溅后的 V_p 和 P_L 小于未击溅土,且随雨滴直径的增加逐渐减小。 SS_p 反映孔隙的连通性,值越大连通性越低,雨滴击溅后的 SS_p 大于未击溅土,且随雨滴直径的增加而增加。从图 2 中可以发现大孔隙($>100\ \mu\text{m}$)是土壤孔隙的主要组成部分,占土壤孔隙总体积的 $89.52\%\sim98.86\%$ 。击溅土壤中孔径 $\geq1\ 000\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积随雨滴直径的增加逐渐减小, $4.05\ \text{mm}$ 直径雨滴击溅后 $100\sim1\ 000\ \mu\text{m}$ 孔径的孔隙体积显著增加($p<0.05$)。微孔隙($\leq100\ \mu\text{m}$)体积占土壤孔隙总体积的 $3.46\%\sim8.02\%$,对土壤入渗的影响效果微弱。击溅土壤孔隙堵塞率均大于 0,且随雨滴直径的增加而增加, $2.67, 3.39, 4.05\ \text{mm}$ 直径雨滴击溅后 CR 分别为 $1.29\%, 23.99\%, 46.40\%$,不同直径雨滴击溅土壤孔隙堵塞率间差异显著($p<0.05$)。

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^[4,6]。雨滴击溅作用导致土壤稳定性降低, $>0.25\ \text{mm}$ 团聚体破碎成 $<0.25\ \text{mm}$ 的微团聚体^[1-2],改变表土团聚体结构特征。雨滴直径对表土结构的改变有着显著的影响,随着雨滴直径的增大,其降雨强度和降雨能量也增大,团聚体破碎程度加重,微团聚体分布更加密集,土壤结构稳定性越差。同时雨滴击溅改变了表土孔隙的结构和分布,击溅土壤孔隙被破碎的团聚体堵塞,大孔隙率减小,孔隙连通性降低,孔隙结构更加复杂。Yang 等^[14]认为土壤孔隙的孔径分布与孔隙形状受雨滴击溅的影响,雨滴击溅后,总孔隙体积、细长孔隙率和平均孔径减小,减小孔隙连通性。土壤孔隙率的下降是由大孔隙的减少引起的,土壤中几乎所有入渗的水分都是由大、中孔隙传输的^[23-24]。随着雨滴直径的增加,大孔隙连通性逐渐降低,微孔隙多为孤立孔隙,且其数量逐渐增加,土壤孔隙堵塞程度更严重。

2.3 雨滴击溅下土壤结皮强度与饱和入渗特征

多次雨滴击溅处理后,土壤结皮强度随雨滴直径

团聚体破碎的机制主要是通过快速润湿和雨滴

的增加逐渐增加,且击溅次数越多,土壤结皮强度越大(表 2)。R₃ 处理下 3 种直径雨滴击溅土壤的结皮强度分别为 8.49,10.33,15.84 kPa,与未击溅土相比,分别增加了 47.61%,51.39%,65.97%。雨滴击溅后形成的土壤结皮影响土壤入渗特征,通过方差分析发现击溅次数和雨滴直径对土壤稳渗速率有着显著影响($p<0.05$), F 值分别为 50.99,5.88,表明击溅次数的影响更大。

表 2 雨滴击溅下土壤结皮强度变化

雨滴 直径/mm	结皮强度/kPa		
	R ₁	R ₂	R ₃
CK	5.39±0.30Aa	5.39±0.30Aa	5.39±0.30Aa
2.67	6.01±0.77Aa	7.80±0.49Bb	8.49±1.84Bb
3.39	7.83±1.48ABa	9.65±1.43BCb	10.33±1.39BCb
4.05	10.29±1.78Ba	11.09±1.95Ca	15.84±2.31Ca

注:同一列不同的大写字母表示不同直径雨滴击溅土壤结皮强度间差异显著, $p<0.05$;同一行不同的小写字母表示不同击溅次数土壤结皮强度间差异显著, $p<0.05$ 。

图 4 显示了雨滴击溅后土壤的入渗过程,未击溅土入渗曲线随时间的变化呈增加—平稳—下降的趋

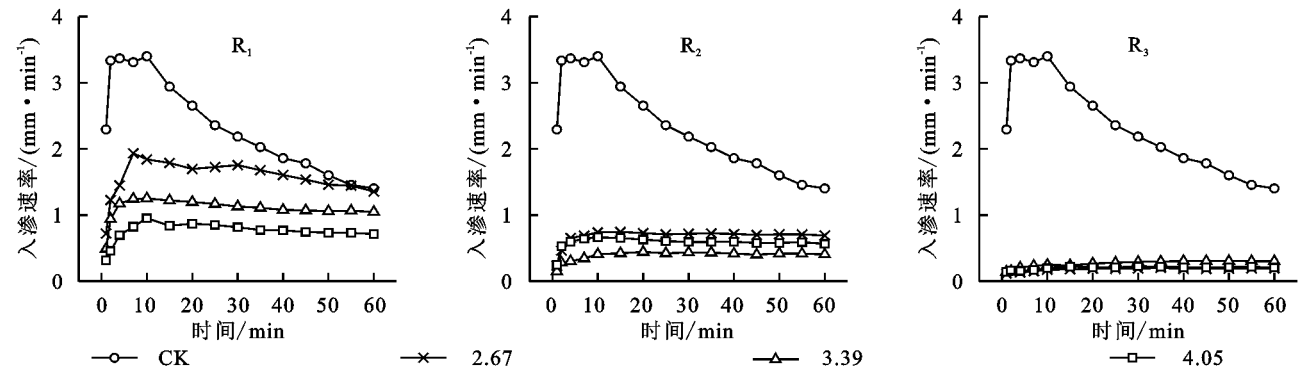


图 4 雨滴击溅下土壤入渗速率与时间关系

表 3 雨滴击溅下土壤渗透参数与减渗效应

处理	累积 入渗量/mm	IR/%	稳渗速率/ (mm·min ⁻¹)	IR/%	K ₁₀ / (mm·min ⁻¹)	IR/%
CK	13.38	0	1.69	0	0.70	0
R ₁ -2.67	9.64	27.98	1.51	10.37	0.60	13.42
R ₁ -3.39	6.70	49.96	1.07	36.54	0.41	40.65
R ₁ -4.05	4.67	65.13	0.74	55.94	0.27	61.26
R ₂ -2.67	4.20	68.63	0.71	58.11	0.28	59.54
R ₂ -3.39	2.43	81.83	0.41	75.45	0.17	76.15
R ₂ -4.05	3.58	73.26	0.58	65.44	0.22	68.03
R ₃ -2.67	1.10	91.81	0.19	88.66	0.08	88.61
R ₃ -3.39	1.66	87.61	0.30	82.11	0.12	82.83
R ₃ -4.05	1.24	90.75	0.21	87.41	0.08	88.29

土壤结皮的形成与发育依赖于土壤本身的理化性质,降雨特征,地表微地形等因素^[25-27]。路培等^[12]认为影响土壤结皮强度的 3 个主要因子中,降雨强度

势,达到稳渗后,较大的入渗速度将土壤孔隙中的细颗粒淋洗到下层,堵塞入渗通道,造成入渗速率的减小。击溅土壤入渗速率呈增加—平稳的趋势。随着雨滴直径的增加,入渗能力越小;随着击溅次数的增加,土壤达到稳渗状态的时间逐渐提前,雨滴直径对入渗的影响减弱。表 3 显示了不同雨滴击溅下土壤各渗透参数和相应的减渗效应,累积入渗量、稳渗速度和 K₁₀ 随雨滴直径和击溅次数的增加呈现相同的变化趋势。雨滴击溅后土壤入渗能力小于未击溅土,且雨滴直径越大、击溅次数越多,入渗能力越小。R₁ 处理下,4.05 mm 直径雨滴对土壤入渗能力的影响最大,累积入渗量的减渗效应为 65.13%。R₂ 处理下,3.39 mm 直径雨滴对土壤入渗能力的影响最大,累积入渗量的减渗效应为 81.83%。R₃ 处理下,2.67 mm 直径雨滴对土壤入渗能力的影响最大,累积入渗量的减渗效应为 91.81%。相同直径雨滴不同击溅次数处理间的 IR 有显著差异($p<0.05$),相同击溅次数不同直径雨滴处理下的 IR 有显著差异($p<0.05$),但随着击溅次数的增加,差异渐无。

的直接作用最大。降雨特征中的雨滴直径和击溅次数对土壤结皮的发育有促进作用,雨滴直径越大,击溅次数越多,形成的土壤结皮强度越大,对土壤孔隙

的堵塞更严重。表 3 显示的减渗效应均为正值,说明雨滴击溅会减少土壤入渗率,且随着雨滴直径和击溅次数的增加,土壤入渗率逐渐减小。吴发启等^[19]发现在较高的降雨强度下会增加土壤含水量并且减小土壤入渗率。Carmi 等^[28]通过模拟降雨试验发现雨滴能量影响土壤入渗速率,未受保护地块的入渗速率小于受保护地块,并且雨滴能量越大,未受保护地块的入渗速率下降速度更快。我们的研究与这些结果类似,雨滴打击地表,在雨滴动能的压实和土壤团聚体的运输作用下形成密闭的土壤结皮,减小土壤入渗速率,雨滴直径越大,击溅次数越多,土壤渗透能力越弱。

2.4 雨滴击溅下土壤结构与入渗特征的关系

选取雨滴直径(R_d)和土壤结构特征参数等 7 个因子与土壤稳渗速率进行相关性分析(表 4),发现除 GMD 外,其余因子与土壤稳渗速率呈极显著相关关系($p<0.01$)。其中, R_d 、 A 、 FD 和 SS_p 等因子与土壤稳渗速率呈极显著负相关关系($p<0.01$), V_p 和 P_L 与土壤稳渗速率呈极显著正相关关系($p<0.01$), V_p 与土壤稳渗速率相关性最大。除 GMD 外,雨滴直径和各土壤结构特征参数与土壤稳渗速率间存在显著的指数关系,土壤稳渗速率随 R_d 、 A 、 FD 和 SS_p 的增加呈减逐渐小的指数函数关系, $R^2=0.597\sim0.732$ ($p<0.05$)。土壤稳渗速率随 V_p 和 P_L 的增加呈逐渐增大的指数函数关系, $R^2=0.678\sim0.697$ ($p<0.05$)。

表 4 各因素与稳渗速率的相关性和拟合方程

因素	相关指数	显著性水平	拟合方程	R^2
R_d	-0.779 **	0.003	$y=\exp(0.565-0.143x)$	0.560
A	-0.763 **	0.004	$y=\exp(0.989-0.001x)$	0.654
GMD	0.412	0.148	$y=\exp(-0.251+0.002x)$	0.160
FD	-0.852 **	0	$y=\exp(29.659-10.467x)$	0.732
V_p	0.868 **	0	$y=\exp(-0.757+0.001x)$	0.697
SS_p	-0.751 **	0.005	$y=\exp(0.569-2.184x)$	0.597
P_L	0.858 **	0	$y=\exp(-0.660+0.046x)$	0.678

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

雨滴击溅能够显著影响土壤饱和入渗特征,雨滴击溅对入渗特征的影响主要取决于雨滴对土壤表层的机械作用^[5-6,8],而不是土壤颗粒间的化学分散作用^[28],土壤团聚体和孔隙的结构特征对研究土壤入渗能力具有重要作用,土壤结构参数可以用来预测土壤饱和和导水率的协变量,使预测结果更有效和准确^[9]。Giménez 等^[29]发现可以用孔隙体积和孔隙表面粗糙度的分形维数来预测土壤饱和和导水率。通过土壤降雨和入渗试验,结果表明孔隙体积对入渗率的影响最大,这与 Lipiec 等^[30]的结论一致,他们发现耕

作方式通过改变孔隙结构和孔隙率来影响土壤入渗率,免耕地的孔隙率和土壤入渗率小于常规耕作地。研究表明,雨滴击溅作用下的土壤结构特征与土壤入渗能力显著相关,雨滴击溅作用导致土壤结构特征发生变化,并造成了土壤入渗能力的差异。

3 结论

(1) 与未击溅土相比,击溅土壤结构和分布特征发生变化,土壤团聚体数量和三维分形维数显著增加($p<0.05$), $>250\ \mu\text{m}$ 粒径团聚体减少,土壤结构更加破碎与松散;土壤孔隙体积和大孔隙率显著减小($p<0.05$),孔隙比表面积和孔隙堵塞率显著增加($p<0.05$)。大直径雨滴击溅造成的团聚体破碎程度更严重,孔隙被破碎的团聚体堵塞,连通性降低。

(2) 雨滴击溅产生的破碎团聚体在土壤表层形成致密的结皮,且结皮强度随雨滴直径和击溅次数的增加逐渐增大。雨滴击溅会显著减小土壤入渗速率,且随击溅次数和雨滴直径的增加,累积入渗量、稳渗速率、饱和导水率等入渗特征参数均呈减小的趋势。大直径雨滴击溅土壤的减渗效应更显著,经过 3 次雨滴击溅后,土壤减渗效应最高可达 91.81%。

(3) 土壤稳渗速率与土壤团聚体数量、三维分形维数、孔隙体积、孔隙比表面积、大孔隙率等表土结构特征参数呈极显著相关关系($p<0.01$),且随表土结构特征参数的变化呈指数关系变化($p<0.05$)。研究为揭示雨滴击溅作用下土壤入渗特征变化的原因与机理提供了理论依据。

参考文献:

[1] 李光录,吴发启,赵小风,等.雨滴击溅下薄层水流的输沙机理研究[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2009,37(9):149-154.

[2] 付玉,李光录,郑腾辉,等.雨滴击溅对耕作层土壤团聚体粒径分布的影响[J].农业工程学报,2017,33(3):155-160.

[3] Assouline S. Rainfall-induced soil surface sealing: A critical review of observations, conceptual models, and solutions[J]. Vadose Zone Journal,2004,3(2):570-591.

[4] Legout C, Legu  dois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils [J]. Geoderma,2005,124(3/4):279-292.

[5] Fu Y, Li G, Zheng T, et al. Impact of raindrop characteristics on the selective detachment and transport of aggregate fragments in the Loess Plateau of China[J]. Soil Science Society of America Journal,2016,80(4):1071-1077.

[6] Ellison W D. Some effects of raindrops and surface-flow on

- soil erosion and infiltration[J]. *Eos Transactions American Geophysical Union*, 1945, 26(3): 415-429.
- [7] 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.
- [8] He Z, Jia G, Liu Z, et al. Field studies on the influence of rainfall intensity, vegetation cover and slope length on soil moisture infiltration on typical watersheds of the Loess Plateau, China[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(25): 4904-4919.
- [9] 解文艳, 樊贵盛. 土壤结构对土壤入渗能力的影响[J]. *太原理工大学学报*, 2004, 35(4): 381-384.
- [10] 杨帆, 张洪江, 程金花, 等. 基于模拟降雨的北京褐土坡地土壤团粒流失特征试验[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 137-145, 215.
- [11] Wang X, Cammeraat E L H, Cerli C, et al. Soil aggregation and the stabilization of organic carbon as affected by erosion and deposition[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, 72: 55-65.
- [12] 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.
- [13] Liu B, Ma R, Fan H. Evaluation of the impact of freeze-thaw cycles on pore structure characteristics of black soil using X-ray computed tomography[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206: 104810.
- [14] Yang M, Fu Y, Li G, et al. Microcharacteristics of soil pores after raindrop action[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2020, 84(5): 1693-1704.
- [15] 孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. *土壤通报*, 2015, 46(1): 233-238.
- [16] Heathman G C, Larose M, Cosh M H, et al. Surface and profile soil moisture spatio-temporal analysis during an excessive rainfall period in the Southern Great Plains, USA[J]. *Catena*, 2009, 78: 159-169.
- [17] Li Y Y, Shao M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 64(1): 77-96.
- [18] 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 & Development*, 2017, 28(1): 309-316.
- [19] 吴发启, 范文波. 土壤结皮与降雨溅蚀的关系研究[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(3): 1-3.
- [20] Katz A J, Thompson A H. Fractal sandstone pores: implications for conductivity and pore formation[J]. *Physical Review Letters*, 1985, 54(12). DOI: 10.1103/PhysRevLett.54.1325.
- [21] 张登科, 宋珍珍. 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]. *西部大开发(土地开发工程研究)*, 2018, 3(10): 41-47.
- [22] Farres P J, Portsmouth. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact[J]. *Catena*, 1980, 7: 223-231.
- [23] Peth S, Horn R, Beckmann F, et al. Three-dimensional quantification of intra-aggregate pore-space features using synchrotron-radiation-based microtomography[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2008, 72(4): 897-907.
- [24] Lin H S, McInnes K J, Wilding L P. Effective porosity and flow rate with infiltration at low tensions into a well-structured subsoil[J]. *Transactions of the Asae*, 1996, 39: 131-135.
- [25] 陈琳, 王健, 宋鹏帅, 等. 降雨对坡耕地地表结皮土壤水稳性团聚体变化研究[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(1): 98-105.
- [26] 胡波, 王玉杰, 王彬, 等. 自然降雨条件下结皮层团聚体稳定性变化特征研究[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(6): 225-231.
- [27] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 632-635.
- [28] Carmi G, Abudi I, Berliner P. An experimental study to assess the effect of the energy and the electrolyte concentration of rain drops on the infiltration properties of naturally crusted soils[J]. *Journal of Arid Environments*, 2018, 152: 69-74.
- [29] 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.
- [30] Lipiec J, Kuś J, Słowińska-Jurkiewicz A, et al. Soil porosity and water infiltration as influenced by tillage methods[J]. *Soil and Tillage research*, 2006, 89(2): 210-220.