

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.018

张晓娅,徐金忠,杨庆楠,等.间歇性降雨条件下黑土溅蚀团聚体分选特征[J].水土保持学报,2024,38(5):31-39.

ZHANG Xiaoya, XU Jinzhong, YANG Qingnan, et al. Sorting characteristics of black soil splash erosion aggregates under intermittent rainfall conditions[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 31-39.

间歇性降雨条件下黑土溅蚀团聚体分选特征

张晓娅¹, 徐金忠^{2,3}, 杨庆楠^{2,3}, 雷涵喆¹, 赵怡凯¹, 李雨¹, 张玉鹏¹, 付玉¹

(1.东北林业大学林学院,哈尔滨 150040;2.黑龙江省水利科学研究院水土保持研究所,
哈尔滨 150070;3.黑龙江省水土保持重点实验室,哈尔滨 150070)

摘要: [目的] 为探究间歇性降雨对黑土溅蚀量和溅蚀分选特征的影响。[方法] 基于人工模拟降雨试验,设计 2 个降雨强度(40, 70 mm/h),每个降雨强度 5 场降雨,分析不同降雨条件下黑土溅蚀量和溅蚀团聚体粒径分布特征。[结果] 2 种降雨强度下,不同降雨场次土壤表层存在“无结皮—弱结皮—强结皮—弱结皮—新结皮”强弱交替的结皮动态发育过程。2 种降雨强度下,溅蚀团聚体 MWD 和 GMD 均在第 4 场降雨出现最大值,在第 1 次降雨出现最小值。每场降雨 5~2 mm 粒级的团聚体均基本未发生迁移,溅蚀团聚体均以 2~0.25 mm 粒径为主,分别占 2 种降雨强度溅蚀量的 36.49%~58.61% 和 49.10%~60.09%。5 场降雨的溅蚀量随粒径减小呈先增加后减小的变化趋势,而粒径<0.053 mm 质量百分数随间歇次数增加的变化趋势为先降低再增加,粒径<0.053 mm 质量百分数均在第 3 场降雨出现最小值,分别为 18.21% 和 17.63%。[结论] 降雨导致土壤结皮的形成,且随降雨次数的增加结皮厚度呈现动态变化,在第 3 场降雨土壤结皮厚度最大,此时溅蚀量有最小值,且主要以>0.053 mm 为主。研究结果为东北黑土区土壤水蚀机理研究提供参考。

关键词: 间歇性降雨; 黑土区; 团聚体; 侵蚀

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242-(2024)05-0031-09

Sorting Characteristics of Black Soil Splash Erosion Aggregates Under Intermittent Rainfall Conditions

ZHANG Xiaoya¹, XU Jinzhong^{2,3}, YANG Qingnan^{2,3}, LEI Hanzhe¹,

ZHAO Yikai¹, LI Yu¹, ZHANG Yupeng¹, FU Yu¹

(1. College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2. Heilongjiang Academy of Hydraulic Sciences, Institute of Soil and Water Conservation, Harbin 150070, China; 3. Heilongjiang Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation, Harbin 150070, China)

Abstract: [Objective] To investigate the impact of intermittent rainfall on the amount and sorting characteristics of black soil splash erosion. [Methods] This study is based on artificial simulated rainfall experiments, with two rainfall intensities (40, 70 mm/h) designed, each with 5 rainfall events, to analyze the splashing erosion amount and particle size distribution characteristics of black soil under different rainfall conditions. [Results] Under two different rainfall intensities, there is a dynamic development process of alternating strength between "no crust weak crust strong crust weak crust new crust" in the soil surface layer of different rainfall sites. Under two different rainfall intensities, the maximum values of splashed aggregate MWD and GMD appeared in the fourth rainfall, and the minimum values appeared in the first rainfall. The agglomerates with a particle size of 5~2 mm did not migrate in each rainfall, and the splashed agglomerates were mainly composed of particles with a size of 2~0.25 mm, accounting for 36.49%~58.61% and 49.10%~60.09% of the splashed erosion amounts of the two rainfall intensities, respectively. The erosion amount of

收稿日期:2024-04-25

修回日期:2024-05-15

录用日期:2024-06-14

网络首发日期(www.cnki.net):2024-08-28

资助项目:国家自然科学基金青年基金项目(42207377);黑土地保护与利用重点实验室开放基金项目(2023HTDGZ-KF-02)

第一作者:张晓娅(1999—),女,硕士研究生,主要从事水土保持与水土流失研究。E-mail:xy36112022@163.com

通信作者:付玉(1991—),女,副教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀机理与水土流失防控研究。E-mail:aily_fy@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

the five rainfall events showed a trend of first increasing and then decreasing with the decrease of particle size, while the mass percentage with particle size <0.053 mm showed a trend of first decreasing and then increasing with the increase of intermittent frequency. The mass percentage with particle size <0.053 mm all showed the minimum value in the third rainfall event, which was 18.21% and 17.63%, respectively. [Conclusion] Rainfall can lead to the formation of soil crust, and the thickness of soil crust shows dynamic changes with the increase of rainfall frequency. In the third rainfall, the soil crust thickness is the highest, and at this time, the splash erosion amount has the minimum value, mainly greater than 0.053 mm. The research results provide reference for the study of soil water erosion mechanism in the black soil area of Northeast China.

Keywords: intermittent rain; black soil; aggregate; erode

Received: 2024-04-25

Revised: 2024-05-15

Accepted: 2024-06-14

Online(www.cnki.net): 2024-08-28

土壤团聚体是土壤基本结构单元,是砂粒、粉粒、黏粒通过各种胶结剂黏结而成的^[1-2],其稳定性直接影响土壤孔隙状况、入渗特性及土壤结构^[3]。水力侵蚀是土壤侵蚀类型之一,溅蚀是水力侵蚀的初级阶段^[4],雨滴打击作用下,溅蚀搬运土壤颗粒为坡面侵蚀提供松散物质,还改变土壤表层结构,影响水分下渗,提高径流的搬运能力,从而增强土壤侵蚀的发生^[5]。

东北黑土区是我国重要的商品粮生产基地,在我国的粮食生产地位中举足轻重。但近年来,该地区水土流失加剧,威胁着国家粮食安全^[6]。东北黑土区年降雨主要集中在夏季,水力侵蚀发生较为频繁。有关黑土区降雨强度、坡度及降雨量等因素对土壤侵蚀的影响已有广泛研究,如温磊磊等^[7]研究表明,当降雨强度由 30 mm/h 增加到 60 mm/h 时,黑土坡耕地侵蚀量增加 389.3 倍;ZHAO 等^[8]研究表明,相同降雨条件下,随击溅距离的增加小粒径团聚体质量百分比逐渐增加;程金花等^[9]研究表明,随着降雨强度的增加,土壤溅蚀量呈指数函数递增;FU 等^[10]研究表明,土壤溅蚀量与坡度具有明显相关性。但已有研究多是基于 1 次降雨的试验。众多研究^[11-13]表明,表层土壤在降雨的影响下发生破碎、迁移和重新聚集,其中一些细小颗粒留在土壤表面,形成一层结皮;在土壤结皮形成后,土壤的侵蚀效应更明显^[14]。土壤结皮发育程度不同,对土壤侵蚀响应效果不同,王辉等^[15]通过研究 3 种土壤结皮(无结皮、轻微结皮和严重结皮)发现,地表严重结皮具有降低径流和抑制产沙的作用;蒋芳市等^[16]研究表明,结皮发育程度越高,降雨侵蚀效应越明显,不同发育阶段的土壤结皮起到抗侵蚀的效果也不同。降雨后表层土壤结构变化影响下一次降雨侵蚀的结果,并且也影响作物生长,但目前研究较少涉及。而实际降雨过程中,存在多次降雨,尤其在东北黑土区有大量的坡耕地,裸露的地表土壤受到降雨打击后,表层结构必然发生变化,但对

下次侵蚀有何响应尚不清楚。

鉴于此,本研究以黑土坡耕地表层土壤为研究对象,采用人工模拟降雨的研究方法,探究不同间歇期和降雨强度条件下溅蚀团聚体分布特征,对比分析 5 次间歇期和 2 种降雨强度对溅蚀量和溅蚀团聚体分选的影响,以期为我国黑土区土壤侵蚀规律研究提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况与样品采集

试验地位于黑龙江省哈尔滨市宾县水土保持科技园(45°44'59"N,127°25'12"E),海拔 450 m,气候为寒温带大陆性季风气候,气温年较差大,年平均气温 3.9 °C,无霜期约 148 天。年平均降水量 548.5 mm,主要集中在夏季,6—9 月降雨量占全年降水量的 80%。该区域土壤类型以典型黑土为主,主要作物为玉米。

本试验选用的土壤为耕地表层土,采样前,先去除表层枯枝落叶,共采集 182 kg 散土和 4 个环刀(体积 100 dm³)样品,其中 2 kg 土壤样品用于测定土壤机械组成、有机质和 pH;4 个环刀样品用于测定土壤体积质量和含水率;自然风干后的 180 kg 散土过 2 mm 筛回填至试验土槽(长 100 cm×宽 10 cm×高 10 cm)用于模拟降雨试验。每个土槽按照原状土土壤体积质量和含水率回填,需要 5.5 kg 土壤,共计 30 个土槽。土壤基本理化性质为:土壤体积质量为 (1.10 ± 0.11) g/cm³,含水率为 $27.77\% \pm 0.16\%$,土壤颗粒组成为砂粒占 $6.14\% \pm 0.86\%$,粉粒占 $65.32\% \pm 2.57\%$,黏粒占 $28.54\% \pm 1.33\%$,有机质为 (20.93 ± 0.16) g/kg, pH 为 6.49 ± 0.09 。

1.2 试验装置

试验装置由供水装置、降雨箱、震动装置和试验土槽放置架 4 部分组成。图 1 为试验土槽及溅蚀装置示意图。降雨箱规格为 190 cm×114 cm×10 cm

(长×宽×高),采用针头式降雨,水头高度为4 cm,有效降雨高度为140 cm。通过测定供水箱水位所对应雨强选取本试验所用水位持续供水;震动装置为电动伸缩杆安装于降雨箱的侧壁上,通过震动装置推动降雨箱产生稳定震动,确保降雨过程中降雨均匀,也可以防止雨滴击打同一位置对土样表面产生破坏。试验土槽放置架可以通过分别调节两侧高度达到调节试验土样放置位置、倾向和坡度的目的,减小试验误差。试验土槽规格为长100 cm×宽10 cm×高10 cm,溅蚀板基于 Ellison 溅蚀板进行改进,秦越等^[17]研究结果表明,溅蚀土粒集中分布在距样地0~20 cm范围内,因此本试验溅蚀板规格为100 cm×20 cm,挡板高度为2 cm,出水口规格为15 cm×10 cm,溅蚀板、径流出口和试验土槽之间紧密结合不透水。

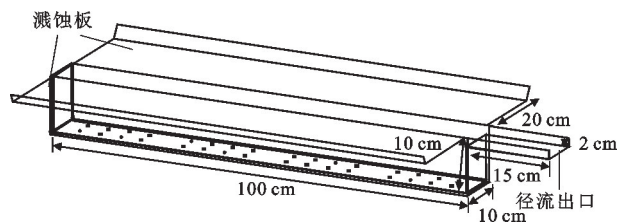


图1 试验土槽及溅蚀装置示意

Fig.1 Schematic diagram of experimental soil tank and splash erosion device

1.3 试验设计

根据詹敏等^[18]和张宪奎等^[19]指出的黑土区中度侵蚀的雨强标准为0.71 mm/min(42.6 mm/h),宁静等^[20]指出在土壤侵蚀的风险程度来看中度侵蚀所占比例较多为31.76%,中国暴雨统计参数图集中显示,东北地区多年平均最大6 h降雨强度为50~70 mm。结合此标准及试验实际情况,本试验降雨强度设定为40,70 mm/h,东北地区夏季持续降雨时间多<1 h^[21],周一杨^[22]通过模拟降雨试验得出,在模拟降雨溅蚀试验中降雨历时的选择应在30~40 min,本研究降雨历时为30 min;根据石璞等^[23]指出在降雨间歇期伴随着土壤含水量的减少,土壤团聚体MWD有所增大。试验设置5场降雨,且本研究预试验发现,降雨后土壤自然风干,基本在含水率34%时达到稳定,为统一含水量变化对土壤结构的影响,本研究设定土壤含水率为34%时进行下一场降雨。东北典型黑土区长坡长,坡度缓,张晓平等^[24]对东北黑土水土流失特点的研究认为,黑土区坡度<6°的面积超过97%,严重水土流失区的坡度一般为3°~5°,因此将本试验坡度设定为3°。每个试验处理重复3次。

在试验土槽底部以相同间距打孔,并在土槽底部铺5 cm细沙,细沙上部铺1层纱布,纱布装填厚度为5 cm的黑土,土壤体积质量为1.10 g/cm³。装完土

槽后沉降14天。试验开始前,将试验土槽放置在水位低于土槽1 cm的容器中饱和12 h,保证土壤降雨前期含水率一致。每次降雨前,率定降雨强度,达到目标降雨强度开始正式降雨并计时开始雨滴击溅试验。降雨过程中收集溅蚀团聚体,试验结束后将收集到的溅蚀团聚体依次通过5,2,0.25,0.053 mm的套筛,利用团聚体分析仪(TTF-100)得到4个粒径(5~2,2~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm)团聚体,所有团聚体在60℃下烘干24 h称重。1次降雨结束后,每天测量土壤含水率,当含水率达到34%时,取表层土块(长2 cm×宽2 cm×高2 cm)进行CT扫描,之后对其余试验土槽进行下一次降雨试验。

1.4 指标获取与计算

1.4.1 土壤表层结皮的判定 本研究的CT扫描在无锡瑞埃德检测科技有限公司的高分辨率微纳米工业CT(Easytom150)进行,具体参数为:设定电压110 kV,电流272 μA,焦点源为5 μm,投影数1 440,分辨率20.00 μm。扫描后的土壤样品采用Image Py软件进行处理,获取二维结构图像及孔隙度等数据。研究^[25]表明,降雨后土壤表层形成致密层,孔隙率为4.83%~8.31%,可明显表征土壤结皮的存在,以此作为土壤结皮的判别方法。

1.4.2 团聚体特征参数 平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)是评价团聚体特征的典型指标。

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

式中: W_i 为第*i*粒级的土壤团聚体质量百分数(%); X_i 为相邻两级土壤团聚体的平均粒径(mm); $\ln X_i$ 为第*i*粒级的土壤粒级平均直径的自然对数。

1.5 数据分析

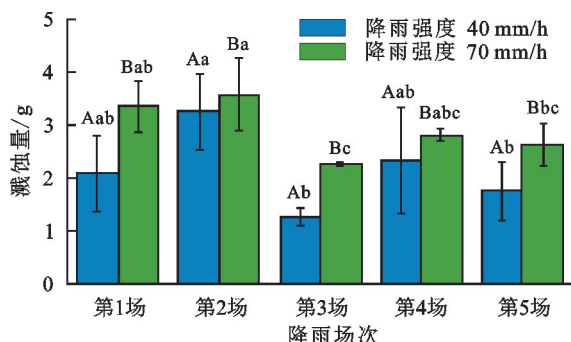
采用Excel 2003和SPSS 16.0软件进行数据处理与分析,采用SPSS 16.0软件中单因素方差分析(One-way ANOVA)和独立样本*t*检验,进行显著性水平检验($p < 0.05$)。采用Origin软件绘制柱状图,采用Image Py软件进行土块CT扫描数据的处理。

2 结果与分析

2.1 溅蚀量特征

溅蚀量在不同雨强和间歇期下的变化特征见图2。降雨强度40,70 mm/h下,5场降雨的溅蚀量随间歇次数呈现波动式变化,其中,溅蚀量在第2场降雨出现最大值,在第3场降雨出现最小值,最大值较最小值的分别减小61.66%和36.59%。每场降雨,降

雨强度 70 mm/h 的溅蚀量均高于降雨强度 40 mm/h 的溅蚀量,且是降雨强度 40 mm/h 的 1.10~1.82 倍。



注:图柱上方不同小写字母表示溅蚀量在相同雨强不同间歇期差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示溅蚀量在不同雨强同一间歇期差异显著($p < 0.05$)。

图 2 溅蚀量在不同雨强和间歇期下的变化特征

Fig.2 The variation characteristics of splash erosion under different rainfall intensities and intermittent periods

2.2 团聚体粒径分布特征

由不同雨强和间歇期溅蚀团聚体粒径分布(图 3)可知,5 个间歇期的溅蚀量随粒径减小呈先增加后减小的变化趋势。降雨强度 40,70 mm/h 溅蚀团聚体均以 2~0.25 mm 粒径为主,分别占 2 种降雨强度的 36.49%~58.61%和 49.10%~60.09%。

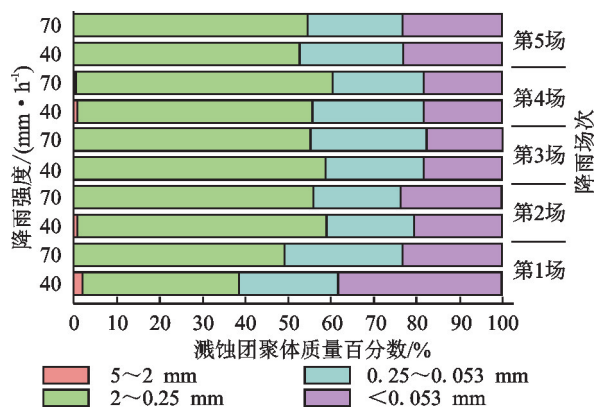


图 3 不同雨强和间歇期溅蚀团聚体粒径分布

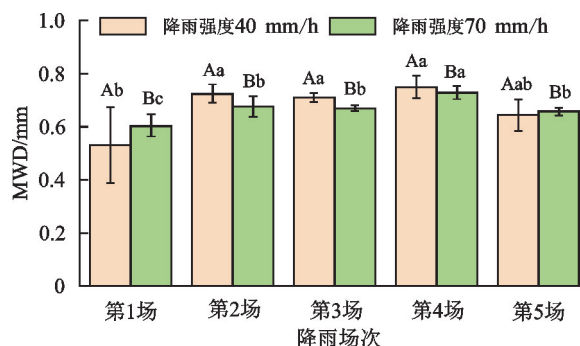
Fig.3 Particle size distribution of splash erosion aggregates under different rainfall intensities and intermittent periods

当降雨强度为 40 mm/h 时,粒径 2~0.25 mm 质量分数随间歇次数增加的变化趋势为先增加再降低,而粒径<0.053 mm 质量分数随间歇次数增加的变化趋势为先降低再增加。2 种粒径都在第 3 场降雨时质量分数达到极值,其中粒径 2~0.25 mm 质量分数为最高值,与前 2 场降雨相比,粒径 2~0.25 mm 质量分数分别增加 60.62%和 0.82%,但第 5 场降雨和其前 2 场降雨相比,粒径 2~0.25 mm 质量分数分别降低 10.24%和 4.05%;粒径<0.053 mm 质量分数为最低值,与前 2 场降雨相比,质量分数降低 52.22%和 10.82%,但第 5 场降雨和其前 2 场降雨相比,粒径

<0.053 mm 质量分数分别增加 0.33%和 43.71%。当降雨强度为 70 mm/h 时,粒径 2~0.25 mm 质量分数随间歇次数波动变化,粒径<0.053 mm 质量分数随间歇次数增加的变化趋势为先降低再增加,在第 2 场降雨时有最高值,第 3 场降雨时有最低值,最高值是最低值的 1.34 倍。

2.3 团聚体特征参数

团聚体平均重量直径(MWD)随不同间歇期不同降雨强度的变化特征见图 4。降雨强度 40,70 mm/h 下,MWD 随降雨场次的增加呈现波动式变化。第 1 场降雨和第 5 场降雨,降雨强度 70 mm/h 的 MWD 分别是降雨强度 40 mm/h 的 MWD 的 1.13,1.02 倍,中间 3 场降雨,当降雨强度由 40 mm/h 增加到 70 mm/h 时,MWD 分别下降 6.94%,5.63%和 2.67%。降雨强度 40,70 mm/h 下,MWD 均在第 4 场降雨出现最大值,在第 1 次降雨出现最小值,表明与其他降雨场次相比,第 4 场降雨溅蚀团聚体中大团聚体较多,第 1 场降雨溅蚀团聚体中小团聚体较多。降雨强度 40,70 mm/h 下,最大值分别是最小值的 1.42,1.22 倍。

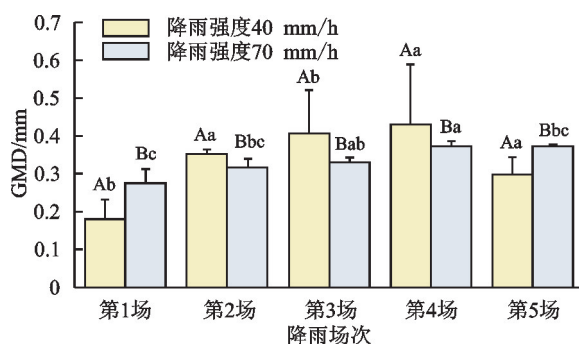


注:图柱上方不同小写字母表示团聚体 MWD 在相同雨强不同间歇期差异显著($p < 0.05$);不同大写字母表示团聚体 MWD 在不同雨强同一间歇期差异显著($p < 0.05$)。

图 4 不同间歇期不同雨强团聚体平均重量直径

Fig.4 Mean weight and diameter of aggregates with different intermittent periods and rainfall intensities

团聚体几何平均直径(GMD)随不同间歇期不同雨强的变化特征见图 5。降雨强度 40,70 mm/h 下,GMD 随降雨次数的增加呈现先增加后减小的变化趋势。在第 1 场降雨和第 5 场降雨时降雨强度 70 mm/h 的 GMD 分别是降雨强度 40 mm/h GMD 的 1.50,1.02 倍,中间 3 场降雨,当降雨强度由 40 mm/h 增加到 70 mm/h 时,GMD 分别下降 11.43%,5.88%和 2.63%。降雨强度 40,70 mm/h 下,GMD 均在第 4 场降雨出现最大值,在第 1 次降雨出现最小值,表明与其他降雨场次相比,第 4 场降雨溅蚀团聚体中大团聚体较多,第 1 场降雨溅蚀团聚体中小团聚体较多。降雨强度 40,70 mm/h 下,最大值分别是最小值的 2.11,1.37 倍。



注:图柱上方不同小写字母表示团聚体 GMD 在相同雨强不同间歇期差异显著 ($p < 0.05$);不同大写字母表示团聚体 GMD 在不同雨强同一间歇期差异显著 ($p < 0.05$)。

图5 不同间歇期不同雨强团聚体几何平均直径

Fig.5 Geometric mean diameter of aggregates with different intermittent periods and rainfall intensities

3 讨论

3.1 间歇性降雨对土壤溅蚀量的影响

水力侵蚀的开始阶段主要以溅蚀为主,降雨过程中,雨滴造成土壤表层颗粒的分散、溅起和迁移^[26]。本研究表明,降雨强度 70 mm/h 溅蚀总量是降雨强度 40 mm/h 的 1.10~1.82 倍(图 2),此研究结果与张兴义等^[27]研究结论较为相似,其发现当降雨强度由 30 mm/h 增加到 90 mm/h 时,总溅蚀量增加 2.5~17.9 倍;LI 等^[28]研究发现,当降雨强度由 30 mm/h 增加到 75 mm/h 时,溅蚀量增加幅度为 48.47%;HU 等^[29]研究表明,当降雨强度由 50 mm/h 增加到 100 mm/h 时,溅蚀量增加 1.9~4.5 倍;刘窑军等^[30]研究发现,随着降雨强度的增大,溅蚀量呈对数函数关系增加,表明随着降雨强度的增加,雨滴的打击能力也随之增强,从而导致其对土壤颗粒的分离能力增大。但张兴义等^[27]研究的溅蚀总量增幅度是本研究的 1.40~16.08 倍,主要原因为:其一张兴义等^[27]试验土样为人工起垄的顺坡垄体,土壤扰动大,土粒较分散,很容易被溅出;其二张兴义等^[27]试验土壤初始含水率较低,土壤抗蚀能力弱^[31],因此溅蚀总量较大。HU 等^[29]研究的溅蚀总量增加幅度是本研究的 1.73~2.47 倍,一方面是因为 HU 等^[29]研究中的降雨强度大于本研究降雨强度,而降雨强度越大,土壤溅蚀量越大;另一方面,是因为本研究选取的是典型黑土,有机质高,土壤质地较为黏重,土粒不易被溅出,但 HU 等^[29]研究选取的是黄土,而黄土以粉砂质为主,缺乏黏粒胶结,遇降雨易分散^[32],因此溅蚀量较大。

有研究^[33-34]表明,雨滴击溅引起表层土壤团聚体破碎,进而导致孔隙堵塞和表层土壤结皮的形成。本研究发现,在 5 场降雨条件下表土结皮呈动态发育变化(图 6),与陈正发等^[35]研究结果较为一致,其提出

不同降雨场次表土结皮存在“无结皮—弱结皮—强结皮—弱结皮—新结皮”强弱交替的动态发育过程。本研究 2 个雨强条件下,溅蚀量均在第 2 场最大,是其他 4 场降雨溅蚀量的 1.07~2.61 倍,可能是由于土壤弱结皮,表土结皮发育较疏松,雨滴对表土结皮扰动大,土粒易被溅出;第 3 场降雨溅蚀量最小,是其他 4 场降雨溅蚀量的 38.34%~86.31%,可能是由于第 3 场降雨前表土结皮较厚,表土结皮发育较致密。卜崇峰^[36]提出,土壤结皮的发育源自细颗粒移动、填塞的致密作用;朱远达等^[37]也有相似的研究结果,其提出雨滴打击夯实作用造成团聚体分散和重新排列,从而导致表层土壤结皮的形成;马仁明等^[38]研究发现,团聚体的粒径分布呈动态发育过程,小团聚体逐渐填充表土层孔隙,限制溅蚀的进一步发育,第 3 次降雨前表土结皮致密,抑制溅蚀发生,土粒不易被溅出;范文波^[39]研究指出,溅蚀量随着结皮厚度的增加呈减小趋势,与本研究结果一致;同时也发现,2 个雨强条件下表土结皮厚度均在第 3 场降雨前有最大值。

3.2 间歇性降雨对土壤溅蚀团聚体的影响

本研究中,5~2 mm 粒级的团聚体基本未发生迁移(图 3),与乔宝玲^[40]的研究结果较为相似,其研究当降雨强度在 30~90 mm/h 时,5~2 mm 粒径的团聚体仅占溅蚀团聚体的 1.08%,主要原因有二:其一可能是在降雨过程中大粒径团聚体易被拆分为小粒径团聚体^[41];其二可能是因为大粒径团聚体质量较高,本研究降雨条件下不足以使其发生迁移。本研究中,2 种降雨强度下溅蚀团聚体均以 2~0.25 mm 粒径为主,分别占 2 种降雨强度溅蚀量的 36.49%~58.61%和 49.10%~60.09%。与张逸飞等^[42]研究结果较为一致,说明 2~0.25 mm 粒径更容易发生位移,是该粒径团聚体在土壤全样中占比较高导致的^[43]。2 种降雨强度下粒径<0.053 mm 质量分数均随间歇次数的增加呈先降低再增加的变化趋势,在第 3 场降雨出现最小值,分别为 18.21%和 17.63%,说明本场降雨过程中小粒径团聚体很少溅出,大都留在土壤表面,土壤结皮最厚(图 6),土壤结皮是土壤表层有细小颗粒沉积而形成的一层致密层^[44],堵塞土壤孔隙^[45],这与 CHEN 等^[46]研究结果较为相似,其研究发现,降雨后表层土壤小粒径团聚体随土壤结皮厚度的增加而增加,但这一结论与 LIU 等^[47]研究结果相反,其研究结果表明<0.05 mm 粒级范围内的颗粒容易在雨滴作用下发生位移,可能是由于本研究的试验土样为黑土,团聚体稳定性较高,小粒径团聚体不易被溅出,而 LIU 等^[47]研究选取的试验土样为土,土壤质地相对较为疏松,小粒径团聚体优先被搬运^[26]。

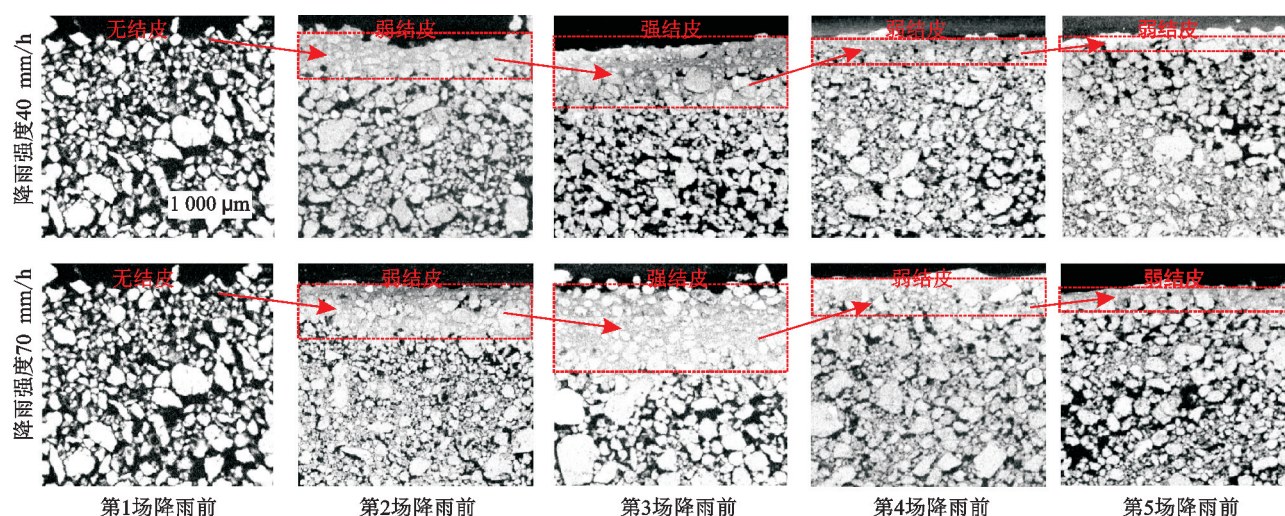


图 6 降雨导致土壤结皮形成过程

Fig.6 Process diagram of soil crust formation caused by rainfall

本研究中,降雨强度 40,70 mm/h 下,溅蚀 MWD 和 GMD 均在第 4 场降雨出现最大值,在第 1 次降雨出现最小值(图 4、图 5),表明与其他降雨场次相比,第 4 场降雨溅蚀团聚体中大团聚体较多,第 1 场降雨溅蚀团聚体中小团聚体较多。因为第 1 场降雨时土壤表面无结皮,土质疏松,大团聚体质量较大,降雨雨滴能量较小,大团聚体很难被搬运^[48],所以第 1 场降雨溅蚀团聚体中小粒径团聚体含量较多;第 3 场降雨时土壤结皮强度为强结皮,雨滴打击作用下降,仅可以将土壤表层强结皮打碎成小粒径团聚体,很少溅出;第 4 场降雨时土壤结皮强度为弱结皮,降雨产生的径流带走土壤表层的小粒径团聚体^[49],所以第 4 场降雨时溅蚀团聚体中大粒径团聚体含量较多。

第 1 场降雨和第 5 场降雨,当降雨强度由 40 mm/h 增加到 70 mm/h 时,溅蚀 MWD 分别增加 13.83% 和 1.99%,可能是由于第 1 场降雨土壤表层无结皮,第 5 场降雨表土结皮较薄(图 6),土质疏松,表层大粒径团聚体易被搬运,随着降雨强度的增加,雨滴打击能力也随之增强^[50],所以第 1 场降雨和第 5 场降雨时,降雨强度 70 mm/h MWD 大于降雨强度 40 mm/h MWD。中间 3 场降雨雨强 40 mm/h 的 MWD 是降雨强度 70 mm/h MWD 的 0.94~1.12 倍,表明这 3 场降雨雨强 70 mm/h 溅蚀团聚体中大团聚体较少,主要与土壤结皮厚度有关。路培等^[51]研究表明,降雨强度越大,土壤结皮强度也随之增加,与本研究结果较为一致(图 6)。土壤结皮强度越大,表面越光滑,流速越大^[52],所以降雨强度 70 mm/h 降雨过程中坡面径流较大,搬运土壤中大团聚体,使大团聚体发生迁移,从而导致降雨强度 70 mm/h 溅蚀团聚体中大团聚体较少,表明降雨间歇次数影响溅

蚀团聚体的分布。

4 结论

(1) 2 种降雨强度下,不同降雨场次表土结皮存在“无结皮—弱结皮—强结皮—弱结皮—新结皮”强弱交替的动态发育过程。5 场降雨的溅蚀量随间歇次数呈波动式变化,降雨强度 70 mm/h 的溅蚀量是降雨强度 40 mm/h 溅蚀量的 1.10~1.82 倍,且溅蚀量均在第 2 场降雨出现最大值,第 3 场降雨出现最小值。

(2) 2 种降雨强度下,MWD 和 GMD 均在第 4 场降雨出现最大值,在第 1 次降雨出现最小值。每场降雨 5~2 mm 粒级的团聚体均基本未发生迁移,溅蚀团聚体均以 2~0.25 mm 粒径为主,分别占 2 种降雨强度溅蚀量的 36.49%~58.61% 和 49.10%~60.09%。5 场降雨的溅蚀量随粒径减小呈先增加后减小的变化趋势,而粒径 < 0.053 mm 质量分数随间歇次数增加的变化趋势为先降低再增加,粒径 < 0.053 mm 质量分数均在第 3 场降雨出现最小值,分别为 18.21% 和 17.63%。

综上,降雨导致土壤结皮的形成,且随降雨次数的增加结皮厚度呈现动态变化,在第 3 场降雨土壤结皮厚度最大,此时溅蚀量有最小值,且主要以 > 0.053 mm 为主。

参考文献:

- [1] LADO M, BEN-HUR M, SHAINBERG I. Soil wetting and texture effects on aggregate stability, seal formation, and erosion[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 1992-1999.
- [2] 赵勇钢, 赵世伟, 曹丽花, 等. 半干旱典型草原区退耕地土壤结构特征及其对入渗的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 14-20.

- ZHAO Y G, ZHAO S W, CAO L H, et al. Soil structural characteristics and its effect on infiltration on abandoned lands in semi-arid typical grassland areas [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 14-20.
- [3] 韦自强, 伊怀虎, 任鹏, 等. 大兴安岭重度火烧迹地植被恢复后土壤团聚体稳定性及有机碳特征[J]. 森林工程, 2023, 39(4): 19-28.
- WEI Z Q, YI H H, REN P, et al. Soil aggregates stability and organic carbon characteristics after vegetation restoration of burned areas in greater khingan mountains [J]. Forest Engineering, 2023, 39(4): 19-28.
- [4] 郑粉莉, 高学田. 坡面土壤侵蚀过程研究进展[J]. 地理科学, 2003, 23(2): 230-235.
- ZHENG F L, GAO X T. Research progresses in hill-slope soil erosion processes [J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(2): 230-235.
- [5] 肖海, 刘刚, 赵金凡, 等. 雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J]. 土壤学报, 2017, 54(4): 827-835.
- XIAO H, LIU G, ZHAO J F, et al. Characteristics of mechanical impact and slaking effect of rain drops on soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(4): 827-835.
- [6] 阎百兴, 杨育红, 刘兴土, 等. 东北黑土区土壤侵蚀现状与演变趋势[J]. 中国水土保持, 2008(12): 26-30.
- YAN B X, YANG Y H, LIU X T, et al. Present status of soil erosion and evolution tendency of black soil region of northeast [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 26-30.
- [7] 温磊磊, 郑粉莉, 沈海鸥, 等. 东北典型黑土区农耕土壤团聚体流失特征[J]. 土壤学报, 2015, 52(3): 489-498.
- WEN L L, ZHENG F L, SHEN H O, et al. Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of Northeast China [J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52(3): 489-498.
- [8] ZHAO Y K, WANG H, CHEN X W, et al. Effect of rainfall on soil aggregate breakdown and transportation on cultivated land in the black soil region of Northeast China [J]. Sustainability, 2022, 14(17): e11028.
- [9] 程金花, 秦越, 张洪江, 等. 华北土石山区模拟降雨下土壤溅蚀研究[J]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 153-161.
- CHENG J H, QIN Y, ZHANG H J, et al. Splash erosion under artificial rainfall in rocky mountain area of Northern China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 153-161.
- [10] FU S H, LIU B Y, LIU H P, et al. The effect of slope on interrill erosion at short slopes [J]. Catena, 2011, 84(1/2): 29-34.
- [11] FU Y, LI G L, ZHENG T H, et al. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action [J]. Catena, 2017, 150: 154-160.
- [12] HU F N, LIU J F, XU C Y, et al. Soil internal forces initiate aggregate breakdown and splash erosion [J]. Geoderma, 2018, 320: 43-51.
- [13] 李叶鑫, 吕刚, 王道涵, 等. 煤矿复垦排土场裂缝区土壤团聚体分布及稳定性[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(6): 104-110.
- LI Y X, LYU G, WANG D H, et al. Distribution and stability of soil aggregates over the fissure zones in reclaimed coal mining waste dumpsite [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(6): 104-110.
- [14] 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.
- WU F Q, FAN W B. Study on relationship of soil crust and rainfall splash [J]. Journal of Soil Water Conservation, 2001, 15(3): 1-3.
- [15] 王辉, 王全九, 邵明安, 等. 表土结皮影响坡地产流产沙及养分流失的试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(4): 35-38.
- WANG H, WANG Q J, SHAO M A, et al. Impact of soil crust on runoff, sediment and nutrient loss from sloping land [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(4): 35-38.
- [16] 蒋芳市, 黄炎和, 林金石, 等. 不同结皮条件对崩岗崩积体坡面侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 1-6.
- JIANG F S, HUANG Y H, LIN J S, et al. Effects of soil crust on the erosion of colluvial deposits in granite Benggang [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(3): 1-6.
- [17] 秦越, 程金花, 张洪江, 等. 北京市褐土区降雨参数对土壤溅蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(6): 16-20.
- QIN Y, CHENG J H, ZHANG H J, et al. Effect of rainfall parameters on splash erosion in loamy soil of Beijing [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(6): 16-20.
- [18] 詹敏, 厉占才, 信玉林. 黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J]. 黑龙江水专学报, 1998(1): 40-43.
- ZHAN M, LI Z C, XIN Y L. On the relationship between precipitation parameter and soil erosion [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 1998(1): 40-43.
- [19] 张宪奎, 许靖华, 卢秀琴, 等. 黑龙江省土壤流失方程的研究[J]. 水土保持通报, 1992, 12(4): 1-9.
- ZHANG X K, XU J H, LU X Q, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4): 1-9.
- [20] 宁静, 周杰, 周芳琪. 基于变权物元模型的黑土区土壤侵

- 蚀风险评价[J].江苏农业科学,2022,50(15):203-209.
- NING J, ZHOU J, ZHOU F Q. Risk assessment of soil erosion in black soil area based on variable weight matter element[J].Jiangsu Agricultural Sciences,2022,50(15):203-209.
- [21] 姜义亮,郑粉莉,温磊磊,等.降雨和汇流对黑土区坡面土壤侵蚀的影响试验研究[J].生态学报,2017,37(24):8207-8215.
- JIANG Y L, ZHENG F L, WEN L L, et al. An experimental study on the impacts of rainfall and inflow on hillslope soil erosion in typical black soil regions[J].Acta Ecologica Sinica,2017,37(24):8207-8215.
- [22] 周一杨.典型黑土击溅侵蚀特征的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2009.
- ZHOU Y Y. Characters of soil splash erosion of typical black soil region [D]. Harbin: Northeast Forestry University,2009.
- [23] 石璞, YANG C, 赵鹏志.间歇性降雨对土壤团聚体粒级及磷、铜、锌富集的影响[J].土壤学报,2021,58(4):948-956.
- SHI P, YANG C, ZHAO P Z. Effect of intermittent rainfall on size distribution and phosphorus, copper and zinc enrichment of soil aggregates[J].Acta Pedologica Sinica,2021,58(4):948-956.
- [24] 张晓平,梁爱珍,申艳,等.东北黑土水土流失特点[J].地理科学,2006,26(6):687-692.
- ZHANG X P, LIANG A Z, SHEN Y, et al. Erosion characteristics of black soils in Northeast China [J]. Scientia Geographica Sinica,2006,26(6):687-692.
- [25] ZHU X C, LIANG Y, CAO L X, et al. Pore characteristics of physical crust samples from two typical erodible soils in Southern China [J]. European Journal of Soil Science,2022,73(2):e13234.
- [26] FU Y, LI G L, ZHENG T H, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion[J].Catena,2020,185:e104342.
- [27] 张兴义,乔宝玲,李健宇,等.降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响[J].农业工程学报,2020,36(16):110-117.
- ZHANG X Y, QIAO B L, LI J Y, et al. Effects of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of downslope ridge on farmland in black soil areas of Northeast China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(16):110-117.
- [28] LI Y X, LÜ G, FU X Y, et al. Effects of rainfall characteristics and slope on splash erosion of cinnamon soil on slope farmland in low mountain and hilly region of western Liaoning Province[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(4):37-43.
- [29] HU W, ZHENG F L, BIAN F. The directional components of splash erosion at different raindrop kinetic energy in the Chinese mollisol region[J].Soil Science Society of America Journal,2016,80(5):1329-1340.
- [30] 刘窑军,杨广勇,徐铭泽,等.鄱阳湖流域 3 种典型母质发育红壤溅蚀特征[J].水土保持学报,2019,33(2):55-59.
- LIU Y J, YANG G Y, XU M Z, et al. Splash erosion features of three red soils in Poyang Lake basin[J].Journal of Soil and Water Conservation,2019,33(2):55-59.
- [31] 张转敏,王彬,饶伟,等.初始含水率和降雨能量对黑土团聚体溅蚀特征的影响[J].水土保持学报,2024,38(2):68-75.
- ZHANG Z M, WANG B, RAO W, et al. Impact of initial soil moisture and rainfall energy on splash erosion characteristics of black soil aggregate[J].Journal of Soil and Water Conservation,2024,38(2):68-75.
- [32] 张媛静.基于能量分析的不同类型土壤抗侵蚀特征研究[D].武汉:长江科学院,2010.
- ZHANG Y J. Study on anti-erosion characteristics of different types of soils based on energy analysis [D]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute,2010.
- [33] FALSONE G, BONIFACIO E, ZANINI E. Structure development in aggregates of poorly developed soils through the analysis of the pore system [J]. Catena, 2012,95:169-176.
- [34] ARJMAND SAJJADI S, MAHMOODABADI M. Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size [J]. Solid Earth,2015,6(1):311-321.
- [35] 陈正发,夏清,史东梅,等.基于模拟降雨的土壤表土结皮特征及坡面侵蚀响应[J].水土保持学报,2011,25(4):6-11.
- CHEN Z F, XIA Q, SHI D M, et al. Soil surface crust characteristic and response feature to slope erosion base on simulation rainfall[J].Journal of Soil and Water Conservation,2011,25(4):6-11.
- [36] 卜崇峰.黄土水蚀风蚀区土壤结皮的发育特征及其侵蚀效应研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2010.
- BU C F. Research on the development characteristics and erosion effects of soil crust in loess water and wind erosion areas[D].Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2010.
- [37] 朱远达,蔡强国,胡霞,等.土壤理化性质对结皮形成的影响[J].土壤学报,2004,41(1):13-19.
- ZHU Y D, CAI Q G, HU X, et al. Effects of soil physical and chemical properties on soil crusting [J]. Acta Pedologica Sinica,2004,41(1):13-19.
- [38] 马仁明,王军光,李朝霞,等.降雨过程中红壤团聚体粒

- 径变化对溅蚀的影响[J].长江流域资源与环境,2013,22(6):779-785.
- MA R M, WANG J G, LI Z X, et al. Effects of dynamic distribution of aggregate size on splash erosion under rainfall in red soils[J].Resources and Environment in the Yangtze Basin,2013,22(6):779-785.
- [39] 范文波.坡耕地土壤结皮的成因及其作用研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2001.
- FAN W B. Study on the causes and functions of soil crust on sloping farmland[D].Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2001.
- [40] 乔宝玲.典型黑土农田垄体溅蚀特征研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2021.
- QIAO B L. Splash erosion characteristics of ridge body on farmland in the typical black soil region of northeast China [D].Harbin: Northeast Agricultural University,2021.
- [41] 郭伟,史志华,陈利顶,等.不同湿润速率对三种红壤坡面侵蚀过程的影响[J].土壤学报,2008,45(1):26-31.
- GUO W, SHI Z H, CHEN L D, et al. Effects of wetting rate on erosion processes on hillslopes of red soil [J].Acta Pedologica Sinica,2008,45(1):26-31.
- [42] 张逸飞,汪零,徐玲,等.降雨驱动下红壤团聚体的溅蚀特征及周转过程[J].水土保持研究,2023,30(4):27-33.
- ZHANG Y F, WANG L, XU L, et al. Splash erosion characteristics and turnover process of red soil aggregates driven by rainfall[J].Research of Soil and Water Conservation,2023,30(4):27-33.
- [43] SAEDI T, SHORAFI M, GORJI M, et al. Indirect and direct effects of soil properties on soil splash erosion rate in calcareous soils of the central Zagross, Iran: A laboratory study[J].Geoderma,2016,271:1-9.
- [44] 景可,黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势.北京市,中国科学院地理科学与资源研究所,2005-01-01.
- [45] LI G L, FU Y, LI B Q, et al. Micro-characteristics of soil aggregate breakdown under raindrop action[J].Catena, 2018,162:354-359.
- [46] CHEN L, YANG C, ZHANG Q W, et al. Variations in the disintegration rate of physical crusts induced by artificial rainfall in different alcohol concentrations[J].International Soil and Water Conservation Research,2022,10(4):565-573.
- [47] LIU B L, CAI Q G, SHI Z H, et al. Rain-simulated experiment study on the splash erosion characteristics of loess soil [J].Journal of Soil and Water Conservation,2016,31(5):29-33.
- [48] 程琴娟,蔡强国,李家永.表土结皮发育过程及其侵蚀响应研究进展[J].地理科学进展,2005,24(4):114-122.
- CHENG Q J, CAI Q G, LI J Y. Summarization on study of soil surface crust or sealing and its effects on erosion[J].Progress In Geography,2005,24(4):114-122.
- [49] 吴新亮,魏玉杰,李朝霞,等.亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性[J].土壤学报,2014,51(6):1223-1233.
- WU X L, WEI Y J, LI Z X, et al. Composition of sediments of erosion from different red soil slopes in subtropical area[J].Acta Pedologica Sinica,2014,51(6):1223-1233.
- [50] 赵迎松.雨滴击溅下薄层径流对土壤团聚体破碎、迁移的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- ZHAO Y S. The effect of shallow overland flow on breakdown and transport of soil aggregates under raindrop action [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2019.
- [51] 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.
- [52] 胡伟.我国主要侵蚀土壤溅蚀和片蚀特征与机理研究[D].北京:中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心),2016.
- HU W. Characteristics and mechanisms of splash erosion and sheet erosion on hillslope of main typical eroded soils in China[D].Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences,2016.