DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2024.02.015
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 Zhuanmin, WANG Bin, RAO Wei, 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.

初始含水率和降雨能量对黑土团聚体溅蚀特征的影响

张转敏[1,2], 王 彬[1,2], 饶 伟[1], 王文刚[1,2]
(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;
2.北京林业大学重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083)

摘 要:[**目的**]为明晰降雨能量和初始含水率对土壤团聚体溅蚀过程机制的影响。[**方法**]选取东北典型耕层黑土为研究对象,通过人工模拟降雨试验,探讨不同初始含水率、降雨能量和团聚体初始粒径的团粒溅蚀特征。[**结果**](1)4 种初始粒径黑土团聚体的溅蚀量均在初始含水率 4%时最大,其中初始粒径<0.25 mm 团聚体溅蚀量是相同降雨能量下各粒径团聚体溅蚀量的 1.21~5.50 倍。随初始含水率的增加各初始粒级团聚体溅蚀量呈减小趋势,而初始含水率>25%后则呈增大现象。(2)4 种初始粒径黑土团聚体的溅蚀量均随降雨能量的增加而增大。相较于降雨能量 305 J/(m^2·h)(1 m)条件,当降雨能量增加至 909 J/(m^2·h)(5 m)时,不同初始粒径团聚体溅蚀量分别增加 15.37~20.70(<0.25 mm),52.30~417.60(0.25~1 mm),51.58~359.36(1~3 mm),68.73~777.99 倍(3~5 mm)。不同初始粒径黑土团聚体溅蚀量存在明显的阈值,当降雨能量达到 529 J/(m^2·h)(2 m)以上时,不同降雨能量梯度下的溅蚀量存在显著差异。(3)降雨能量是影响溅蚀量的关键因素。降雨能量对溅蚀量的直接效应为 0.811,存在显著正向影响,且相关程度最高;初始含水率和团聚体初始粒径的直接效应分别为 0.193 和 0.352,存在显著负向影响。[**结论**]研究结果可为东北黑土区坡面土壤侵蚀过程机制研究和土壤侵蚀机理模型构建提供科学依据。

关键词:初始含水率;降雨能量;溅蚀量;典型黑土区
中图分类号:S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242-(2024)02-0068-08

Impact of Initial Soil Moisture and Rainfall Energy on Splash Erosion Characteristics of Black Soil Aggregate

ZHANG Zhuanmin[1,2], WANG Bin[1,2], RAO Wei[1], WANG Wengang[1,2]
(1.*School of Soil and Water Conservation*, *Beijing Forestry University*, *Beijing* 100083, *China*; 2. *Beijing Forestry University*, *Three-gorges Area*(*Chongqing*)*Jinyun Forest Eco-system Research Station*, *Beijing* 100083, *China*)

Abstract:[**Objective**] To investigate the influence of rainfall energy and initial moisture content on the mechanism of soil aggregate splashing erosion. [**Methods**] The typical cultivated black soil in northeast China was selected as the research object. Artificial simulated rainfall experiments were conducted to explore the splashing erosion characteristics of soil aggregates with varying initial moisture content, rainfall energy, and initial particle size of aggregates. [**Results**] (1) The splash erosion of the four kinds of black soil aggregates with initial particle size was highest when the initial soil moisture level was 4%, and the splash erosion of the aggregates with an initial particle size <0.25 mm was 1.21 to 5.50 times that of the aggregates with different particle sizes under the same rainfall energy conditions. Furthermore, as the initial soil moisture increased, the splash erosion of the aggregates within each particle size group decreased initially, but increased when the initial soil moisture surpassed 25%. (2) The splash erosion of four initial particle size black soil aggregates increased with the increase of higher rainfall energy. When the rainfall energy reached 909 J/(m^2·h) (equivalent to 5 m), the splash erosion of the different-sized black soil aggregates increased by 15.37 to 20.70

收稿日期:2023-07-27 **修回日期:**2023-09-07 **录用日期:**2023-10-08 **网络首发日期(www.cnki.net):**2024-01-24
资助项目:国家自然科学基金项目(41977060)
第一作者:张转敏(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:zzhuanmin@163.com
通信作者:王彬(1983—),男,教授,博士,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wangbin1836@bjfu.edu.cn

(<0.25 mm), 52.30 to 417.60 times (0.25～1 mm), 51.58～359.36 times (1～3 mm), 68.73～777.99 times (3～5 mm), respectively. Notably, a clear threshold was observed for splash erosion of aggregates with different initial particle size. When the rainfall energy exceeded 529 J/(m^2 · h) (equivalent to 2 m), there was a significant difference in splash erosion among different rainfall energy gradient. (3) The analysis highlighted that rainfall energy was the primary factor affecting splash erosion. It exhibited a direct effect with a correlation coefficient of 0.811, demonstrating a significant positive influence. Conversely, the direct effects of initial soil moisture and initial particle size of aggregates were significantly negative, with correlation coefficients of 0.193 and 0.352, respectively. [**Conclusion**] The research findings can provide a scientific basis for investigating the mechanisms of slope soil erosion in the black soil regions of Northeast China, as well as for establishing process-based models for soil erosion.

Keywords: initial soil moisture; rainfall kinetic energy; splash erosion; the typical black soil region

Received:2023-07-27　　**Revised**:2023-09-07　　**Accepted**:2023-10-08　　**Online**(www.cnki.net):2024-01-24

土壤侵蚀是威胁全球生态环境安全和粮食安全的主要问题,严重的土壤侵蚀可造成土壤质量明显下降[1]。水力侵蚀是东北黑土区主要的侵蚀类型之一。溅蚀作为水力侵蚀的初始阶段[2],通过分散表层土粒为径流侵蚀提供大量可搬运的松散颗粒[3]。同时,溅蚀具有增强地表薄层径流紊动[4],进而加强坡面薄层流侵蚀动力的作用。雨滴打击是溅蚀的关键影响因素,雨滴能量与雨滴大小、降雨高度、终点速度等密切相关[5]。目前,大多研究[6-9]通过控制相同降雨强度下的雨滴降落高度来获取不同降雨能量,并发现溅蚀量与降雨能量呈正相关关系。

土壤特性对雨滴溅蚀作用具有显著影响[10]。研究[11]表明,土壤初始含水量对土壤颗粒间黏结力、团粒崩散速率、团聚体稳定性等作用明显,但其对溅蚀过程的作用关系尚不明晰;部分学者[12-13]指出,初始土壤含水量越低,表层土壤抵抗雨滴溅蚀的能力越弱;而部分研究[9,14]则表明,溅蚀量随土壤含水率的增加而增大。同时,不同粒级团聚体对溅蚀的抵抗能力存在明显差异,大粒径团聚体(>1 mm)较小粒径团聚体更易发生破碎[15],稳定性更低。

为进一步明确降雨能量、初始含水率及团聚体初始粒级等多因素耦合作用下的溅蚀特征,本研究以东北典型黑土为研究对象,通过人工模拟降雨条件下的溅蚀盘试验,研究不同初始粒径黑土团聚体在不同初始含水率和降雨能量下的溅蚀特征,明晰各影响因素对团聚体溅蚀量的作用贡献,进而揭示不同初始含水率和降雨动能对黑土团聚体溅蚀过程的作用机制,以期为东北黑土区溅蚀的研究和土壤侵蚀防治提供参考。

1　材料与方法

1.1　试验设计

本试验以黑龙江省克山县克山农场农耕地黑土为研究对象,采样时间为 2021 年 5 月。经风干后剔除土壤中的小石子及根系等杂物,通过萨维诺夫干筛法获取>5,5～3,3～1,1～0.25,<0.25 mm 共 5 个粒级的团聚体含量,分别为 18.01%,32.66%,29.46%,15.38%,4.49%。同时,测定土壤有机质含量为(重铬酸钾氧化—外加热法)4.99%,容重为(环刀法)1.28 g/cm^3。采用控制不同降雨高度获取对应降雨能量的方法[6,16],设计 1,2,3,4,5 m 共 5 个降雨高度对应的降雨能量。雨滴中数直径等降雨特性接近天然降雨。同时,考虑黑土区造成严重土壤侵蚀的主要降雨类型为短历时、高强度降雨[17-18],并结合中度侵蚀的瞬时降雨强度标准(I_{10}≥0.71 mm/min)和实测短历时瞬时降雨强度(103.20 mm/h),设计试验降雨强度为 100 mm/h。有研究[19]表明,溅蚀量随初始含水率由 3%增加至 20%时呈先减小后增大的趋势。结合试验区土壤条件设定 5 个土壤初始重量含水率水平(4%,10%,15%,20%,25%)。选取 5 mm 以下的 4 个粒级黑土团聚体,采用自制针式可拆卸雨滴生成装置,进行人工模拟降雨试验。试验重复 3 次,累计开展模拟降雨试验 300 场次。

按照设计含水率雾化喷洒对应水量后,密闭静置 24 h,以使各试样初始含水率均匀分布。在溅蚀盘底部铺设滤纸,将黑土团聚体缓慢分层填入溅蚀盘内,并采用称重法控制土壤容重为 1.28 g/cm^3。为保证降雨能量的准确性,降雨前通过调节针头高度及侧壁开孔位置对降雨强度进行率定,每次降雨历时 15 min,每间隔 3 min 用注射器冲洗溅蚀盘外环土壤颗粒,并在出口处接取全部泥沙样品。

1.2　试验装置

试验装置由模拟降雨系统和溅蚀盘组成。模拟

降雨系统包括雨滴生成装置、供水装置和升降装置。雨滴生成装置为高30 cm、直径15 cm的PVC圆管，底部由透明PVC膜包裹，并均匀分布32个6.5#针头(内径0.41 mm)，在侧壁4.5 cm高度处设置恒压水头控制恒定降雨强度。供水装置通过小型额定功率水泵向雨滴生成装置供液。通过定滑轮调节高度以达到不同降雨能量。溅蚀盘为底部有斜面出液口的漏斗状装置，中间安放直径10 cm、高15 cm的溅蚀盘主体(图1)。

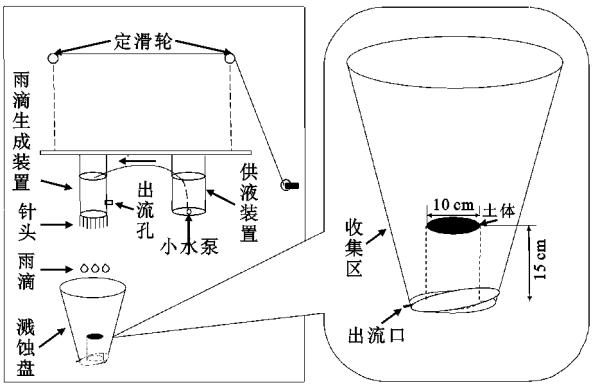


图1 试验装置示意

Fig. 1 Schematic diagram of the test device

1.3 降雨动能计算

假设雨滴降落时为球形，通过记录形成10滴雨滴所用时间和质量，计算雨滴当量直径：

$$D=10\sqrt[3]{\frac{6m}{\pi\rho}} \tag{1}$$

式中：D 为雨滴当量直径(mm)；m 为雨滴平均质量(g)；ρ 为密度(g/cm^3)，水的密度取1.00 g/cm^3。

雨滴在降落过程中受到重力、浮力和空气阻力，当3种作用力平衡时，雨滴达到终点速度[20]，关系式为：

$$W=mg=\rho Rg \tag{2}$$

$$F=\rho_k gR \tag{3}$$

$$Z=\frac{1}{2}C_\rho V^2A^2=\frac{1}{8}\pi C_\rho V^2D^2 \tag{4}$$

$$V=\sqrt{\frac{4Dg}{3C}\left(\frac{\rho_k}{\rho}-1\right)} \tag{5}$$

式中：V 为天然降雨雨滴降落速度(m/s)；W 为雨滴质量(g)；F 为浮力(N)；Z 为空气阻力(N)；R 为雨滴体积(m^3)；ρ_k 为空气密度(kg/cm^3)；g 为重力加速度(9.81 m/s^2)；C 为阻力系数，球体阻力系数为0.43；A 为球形雨滴的投影面积(m^2)。

基于张宪奎等[18]、胡伟等[6]、肖海等[16]对于降雨能量的研究，通过控制不同降雨高度获取对应降雨能量，降雨能量接近自然降雨。采用公式计算雨滴在不同降雨高度下的速度[21]：

$$v=V\sqrt{1-e^{-\frac{2g}{V^2}H}} \tag{6}$$

式中：v 为模拟降雨雨滴的速度(m/s)；H 为降雨高度(m)。

根据动能计算公式，单颗雨滴动能则为：

$$e=\frac{1}{2}Wv^2 \tag{7}$$

式中：e 为雨滴动能(J)；v 为雨滴的实际速度(m/s)；W 为雨滴质量(g)。

根据单位时间内每个针头生成雨滴的数量，得到单位时间单位面积内的总降雨能量，计算公式为：

$$E=\frac{\sum_{i=1}^{n=32}N_ie_i}{a}=\frac{\sum_{i=1}^{n=32}\frac{36\ 000}{t_ie_i}}{a} \tag{8}$$

式中：E 为总降雨能量[J/(m^2·h)]；N 为单位时间内生成的雨滴数；t 为针头生成10滴雨滴的时间(s)；a 为降雨面积(m^2)。

不同降雨高度下雨滴大小及降雨能量见表1。

表1 不同降雨高度下的雨滴大小及降雨能量

Table 1 Raindrop size and rainfall kinetic energy at different rainfall heights

降雨高度/m	10滴雨滴时间/s	10滴雨滴重量/g	平均雨滴当量直径/mm	降雨能量/(J·m^{-2}·h^{-1})
1	6.87±0.06	0.1094±0.0107	2.74±0.01	304.5±0.2
2	6.88±0.03	0.1095±0.0100	2.75±0.01	529.4±0.1
3	6.87±0.02	0.1094±0.0103	2.75±0.01	695.7±0.1
4	6.87±0.04	0.1096±0.0104	2.76±0.02	818.4±0.2
5	6.89±0.06	0.1097±0.0096	2.76±0.01	909.2±0.1

注：表中数据为平均值±标准差。

1.4 数据处理

试验数据利用SPSS 22.0软件进行相关性分析和统计描述，图表处理采用Origin 2018和Excel 2019软件完成。

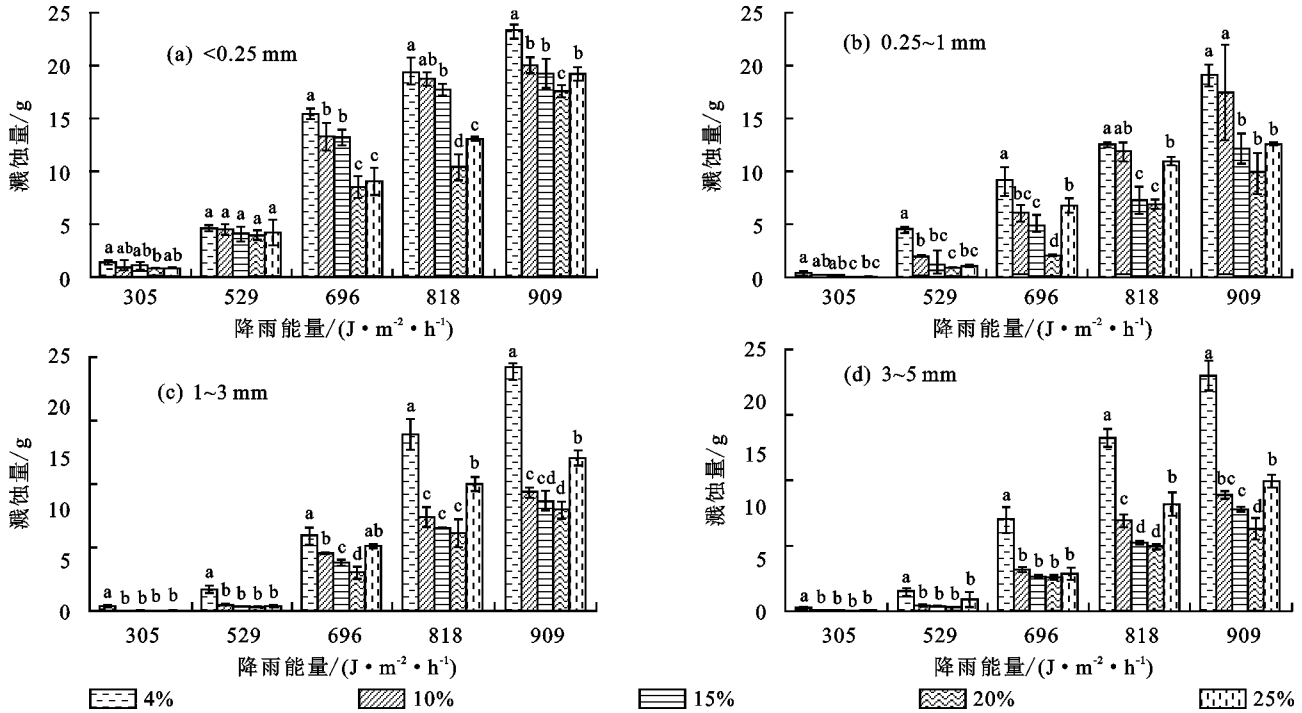
2 结果与分析

2.1 不同初始含水率条件下黑土团聚体溅蚀特征

相同降雨能量下，不同初始粒径黑土团聚体的溅蚀量均随初始含水率的增加呈先减小后增大的趋势(图2)。当初始含水率为4%时的溅蚀量最大，分别为1.42～23.19(<0.25 mm)，0.36～19.05(0.25～1 mm)，0.37～19.21(1～3 mm)，0.26～17.96 g(3～5 mm)。而当初始含水率为20%时，溅蚀量最小，较初始含水率4%条件下分别减少14.04%～46.76%(<0.25 mm)，44.83%～93.46%(0.25～1 mm)，48.97%～93.97%(1～3 mm)，62.88%～96.87%(3～5 mm)。随着初始含水率从4%增至10%时，不

同初始粒径黑土团聚体的溅蚀量分别减少 2.24%～18.57%(<0.25 mm),5.40%～55.23%(0.25～1 mm),22.73%～91.24%(1～3 mm),47.96%～71.13%(3～5 mm);尤其初始粒径 1～3 mm 和 3～5 mm 团聚体,其溅蚀量在 5 个不同降雨能量下均呈显著差异。随初始含水率继续增加,溅蚀量随之减小。初始含水率增加至 25%时,不同初始粒径黑土团聚体的溅蚀量较初始含水率 20%分别增加 0.05～0.26(<0.25 mm),0.15～2.26(0.25～1 mm),0.15～0.70(1～3 mm),0.10～7.33 倍(3～5 mm);初始粒径 1～3,3～5 mm 团聚体在降雨能量大于 696 J/(m² · h)(3 m)时表现出显著差异。初始含水率相同时,黑土团聚体的溅蚀量总体上随初始粒径的增大而减小,初始含水量为 4%时,初始粒径为<0.25 mm 黑土团聚体的溅蚀量分别是>0.25 mm 各粒径的 1.30～3.96(0.25～1 mm),1.21～3.88(1～3 mm),1.29～5.50 倍(3～5 mm)。

由此可见,随土壤团聚体含水率由干燥逐渐到饱和,溅蚀量呈先减小后增大的趋势,这与马仁明等[19]的研究结果一致。



注:图中不同字母表示在相同降雨能量下黑土团聚体在不同初始含水率条件下的溅蚀量差异($p<0.05$)。

图 2　不同初始粒径和初始含水率条件下的黑土团聚体溅蚀量

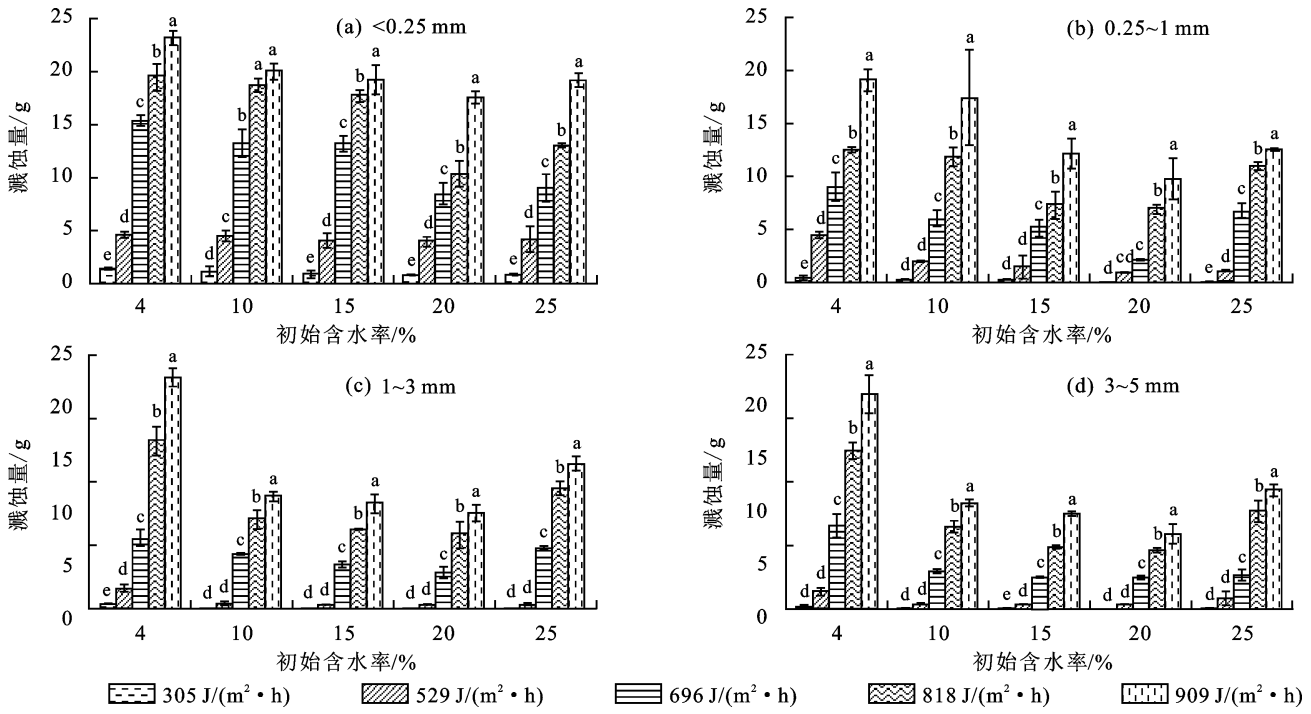
Fig. 2　Splash erosion amount of black soil aggregates under different initial particle sizes and initial moisture content conditions

2.2　不同降雨能量下黑土团聚体溅蚀特征

相同初始含水率条件下,不同初始粒径黑土团聚体的溅蚀量均随降雨能量的增加而增大(图 3)。

降雨能量增加至 909 J/(m² · h)(5 m)时,不同初始粒径黑土团聚体的溅蚀量相比降雨能量 305 J/(m² · h)(1 m)分别增加 15.37～20.70(<0.25 mm),52.30～417.60(0.25～1 mm),51.58～359.36(1～3 mm),68.73～777.99 倍(3～5 mm)。降雨能量达到 529 J/(m² · h)(2 m)后,不同初始含水率团聚体的溅蚀量差异显著,表明降雨能量对不同初始粒径团聚体溅蚀量的影响总体随初始粒径的增大而增加。单位降雨高度(1 m)对应的降雨能量增加幅度分别为 37.09%(1～2 m),27.65%(2～3 m),20.20%(3～4 m)和 15.07%(4～5 m)。随降雨能量由 305 J/(m² · h)(1 m)增加至 529 J/(m² · h)(2 m),不同初始粒径黑土团聚体的溅蚀量大幅度增加,分别增加 2.26～3.68(<0.25 mm),5.69～38.85(0.25～1 mm),3.68～14.31(1～3 mm),4.64～39.75 倍(3～5 mm)。当降雨能量由 696 J/(m² · h)(3 m)增加至 909 J/(m² · h)(5 m),降雨能量增加幅度为35.26%,不同初始粒径的黑土团聚体的溅蚀量增加幅度较小,分别增加 0.46～1.12(<0.25 mm),0.86～3.70(0.25～1 mm),1.05～2.27(1～3 mm),1.43～2.49 倍(3～5 mm)。降雨能量 305 J/(m² · h)(1 m)增加到 529 J/(m² · h)(2 m)的增加幅度较 696 J/(m² · h)(3 m)增加到 909 J/(m² · h)(5 m)仅增大 1.83%,溅蚀量表现出明显的差异。

研究发现,降雨能量对黑土团聚体溅蚀量的影响在 305 J/(m² · h)(1 m)和 529 J/(m² · h)(2 m)间存在阈值效应。



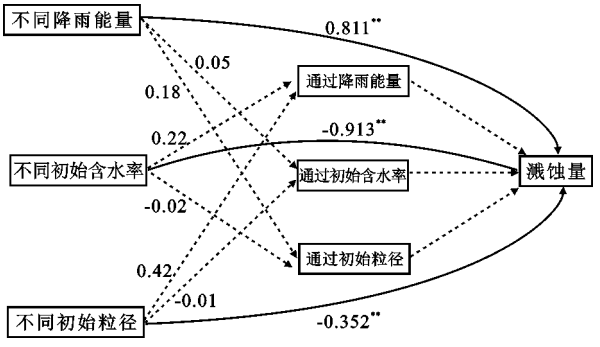
注：图中不同字母表示在相同初始含水率条件下黑土团聚体在不同降雨能量下的溅蚀量差异($p<0.05$)。

图 3 不同初始粒径和降雨能量下的黑土团聚体溅蚀量

Fig. 3 Splash erosion amount of black soil aggregates under different initial particle sizes and rainfall kinetic energy

2.3 黑土团聚体溅蚀影响因素的路径分析

黑土团聚体溅蚀量的变化由降雨能量、初始含水率和团聚体初始粒径直接或间接协同作用产生(图 4)。



注：**表示在 $p<0.01$ 水平显著相关；图中实线表示直接作用路径，虚线表示间接作用路径。

图 4 黑土团聚体溅蚀量各影响因素的路径分析

Fig. 4 Path analysis of influencing factors of splash erosion amount of black soil aggregates

降雨能量对溅蚀量的直接效应为 0.811，呈显著正向影响，且相关程度最高。初始含水率和团聚体初始粒径的直接效应分别为 0.193 和 0.352，存在显著负向影响。与不同降雨能量和初始含水率条件下的溅蚀特征研究结果一致，降雨能量是影响溅蚀量的关键因素。随初始含水率的增加溅蚀量并非单调减小，而在初始含水率>25%后出现增大的现象。团聚体初始粒径和初始含水率通过降雨能量间接正向影响溅蚀量，间接效应分别为 0.42 和 0.22；不同降雨能量通过初始粒径和初始含水率间接正向影响溅蚀量，间接效应分别为 0.18 和 0.05。结果表明，降雨能量对溅蚀量存在正向影响，而团聚体初始粒径和初始含水率对溅蚀量存在负向影响。

3 讨论

3.1 初始含水率对黑土团聚体溅蚀量的影响

初始含水率是影响团聚体溅蚀量的重要因素。本研究发现，黑土团聚体在初始含水率 4%时溅蚀量最大，这与马仁明等[19]的研究结果一致。不同含水率影响团聚体稳定性，低含水率条件下团聚体稳定性差，容易溅散。团聚体由干燥状态到微湿润状态(初始含水率 10%)，溅蚀量明显减小。其原因主要是土壤团聚体在干燥时孔隙较大[13]，雨滴降落到土壤颗粒表面，分散的土壤颗粒受雨滴的打击作用易被溅蚀；同时，土壤颗粒间相互作用力(包括静电斥力、水合斥力和范德华引力)对团聚体稳定性具有明显作用[22-23]；当土粒间距离小于 1.5～2.0 nm 时，水合斥力远大于范德华引力(绝对值)，且水合斥力与范德华力的差值随土壤颗粒间距离的减小而急剧增大[24-25]，即水合斥力为导致土壤团聚体的分散的主导因素。因此，当干燥的土壤团聚体遇到雨滴作用时，水合斥力总能克服范德华力使团聚体发生溶胀，导致溅蚀量增大；且上述现象随降雨能量和初始粒径的增大更为显著。<0.25 mm 团聚体的溅蚀量是>0.25 mm 团聚体溅蚀量的 1.21～5.50 倍；>0.25 mm 团聚体，因其自身质量和体积较大，溅蚀分散和迁移所需的能量

更大[26],导致溅蚀量较小。

初始含水率逐渐增加至 20%时,溅蚀量与初始含水率呈负相关关系,与刘目兴等[11]、REJMAN 等[12]和相莹敏等[27]的研究结果相似。黑土团聚体同样表现出随初始含水率增加水散作用减弱的现象。随含水率增大颗粒表面形成水膜,水膜产生的黏聚作用逐渐增强[7,28],团聚体稳定性有所改善[29],抗侵蚀力增强,以致溅蚀量不断减小。初始含水率增加至 25%时,水膜厚度明显增加[30],溅蚀量反而呈增大趋势,主要是因为 2 个相互靠近的土壤颗粒之间产生巨大的范德华引力,使土壤颗粒凝结在一起,而随着 2 个颗粒之间距离的增加,范德华力逐渐减小,静电斥力增加[22,31],导致团聚体稳定性下降,因而溅蚀量明显增加。黑土团聚体溅蚀影响因素的路径分析发现,由于作用机制的影响,土壤团聚体初始粒径对溅蚀量的影响大于初始含水率的作用。大粒径土壤颗粒自身的质量和体积较大,被溅蚀所需的能量较大,使其不易被搬运,溅蚀量较小[9,32]。可见,初始含水率增加时,土壤颗粒间相互作用力也在发生变化,进而对溅蚀产生影响。

3.2　降雨能量对黑土团聚体溅蚀量的影响

降雨能量是影响团聚体溅蚀量的又一重要因素。本研究发现,相同初始含水率条件下,各初始粒径黑土团聚体溅蚀量变化趋势一致,均随降雨能量的增加而增大。降雨能量从 305 J/(m^2 · h)(1 m)增加到 909 J/(m^2 · h)(5 m),溅蚀量增加 15.37～777.99 倍,这与郭威震等[8]的研究结果一致。当降雨高度增加,降雨动能增大,其搬运能力也增强。降雨能量对溅蚀量具有显著正向影响,雨滴打击力是黑土团聚体发生破碎的直接因素,这与 AN 等[33]和胡伟等[6]的研究结果一致。降雨能量为 305 J/(m^2 · h)(1 m)时,溅蚀量较小,是因为雨滴仅少部分能量用于破碎土壤团聚体,可供溅蚀搬运的团聚体较少,与秦越等[9]的研究结果基本一致。降雨能量增加到 529 J/(m^2 · h)(2 m)时,初始粒径<0.25 mm 团聚体,降雨能量突破能量阈值,用于溅蚀搬运的能量增大,这使得在雨滴能量较小时无法被携带出溅蚀盘的部分微团聚体,进一步被雨滴带出溅蚀盘,导致溅蚀量急剧增加。初始粒径>0.25 mm 团聚体,降雨能量增加到 696 J/(m^2 · h)(3 m)后,溅蚀量显著增加。随着雨滴打击力不断增强,更多的大团聚体颗粒被分散破坏为细小颗粒,进而被携带出溅蚀盘。该结果与胡伟等[6]和赵晓光等[14]的研究结果一致,即溅蚀过程存在降雨能量阈值,当达到能量阈值后溅蚀量显著增加。黑土团聚体溅蚀量各影响因素的路径分析表明,降雨能量对溅蚀量变化的贡献程度最高,雨滴与土壤发生碰撞产生的冲击力是地表土壤发生溅蚀的直接动力,碰撞使一部分能量被土壤吸收,而未被吸收的能量将破坏原有的土壤结构,使其分散跃移[26]。综上,雨滴打击力是黑土发生溅蚀的侵蚀动力[22],且降雨能量对不同初始粒径团聚体溅蚀量的影响存在阈值效应。

4　结 论

(1)4 种粒径黑土团聚体的溅蚀量随初始含水率的增加呈先减小后增大的趋势。4 种粒径黑土团聚体的溅蚀量均在初始含水率 4%时溅蚀量最大,其中初始粒径<0.25 mm 的黑土团聚体溅蚀量最大,是相同降雨能量下其他 3 种粒径溅蚀量的 1.21～5.50 倍。随初始含水率的增加团聚体溅蚀量呈减小趋势,初始含水率>25%后呈增大现象。

(2)4 种初始粒径黑土团聚体的溅蚀量随降雨能量的增加而增大。降雨能量增加到 909 J/(m^2 · h)(5 m)时,不同初始粒径黑土团聚体的溅蚀量相比降雨能量 305 J/(m^2 · h)(1 m)分别增加 15.37～20.70(<0.25 mm),52.30～417.60(0.25～1 mm),51.58～359.36(1～3 mm),68.73～777.99 倍(3～5 mm)。同时,不同初始粒径黑土团聚体溅蚀量存在明显的阈值,当降雨能量达到 529 J/(m^2 · h)(2 m)后,不同降雨能量梯度下的溅蚀量表现出显著差异。

(3)降雨能量是影响溅蚀量的关键因素。降雨能量对溅蚀量的直接效应为 0.811,存在显著正向影响,且相关程度最高;初始含水率和团聚体初始粒径的直接效应分别为 0.193 和 0.352,存在显著负向影响。

参考文献:

[1]　李海茹,广彗冰,刘刚,等.有机质影响溅蚀破坏土壤团聚体的主要作用机制[J].土壤学报,2021,58(1):106-114.
LI H R, GUANG H B, LIU G et al. Mechanism of effects of soil organic matter on splash erosion disintegrating aggregates[J]. Acta Pedologica Sinica,2021,58(1):106-114.

[2]　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 hillslope soil erosion processes[J]. Scientia Geographica Sinica,2003,23(2):230-235.

[3]　JOMAA S, BARRY D A, BROVELLI A, et al. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments[J].Catena,2012,92:38-48.

[4]　杜昕鹏,吕刚,傅昕阳,等.辽西褐土和棕壤溅蚀效应与团聚体分选特征[J].中国水土保持科学,2020,18(3):39-47.
DU X P, LÜ G, FU X Y, et al. Splash erosion effect and aggregate sorting characteristics of cinnamon soil and brown soil in the western Liaoning Province[J]. Science of Soil and Water Conservation,2020,18(3):39-47.

[5] MESHESHA D T, TSUNEKAWA A, HAREGEWEYN N. Influence of raindrop size on rainfall intensity, kinetic energy, and erosivity in a sub-humid tropical area: A case study in the northern Highlands of Ethiopia [J].Theoretical and Applied Climatology,2019,136(3):1221-1231.

[6] 胡伟,郑粉莉,边锋.降雨能量对东北典型黑土区土壤溅蚀的影响[J].生态学报,2016,36(15):4708-4717.
HU W, ZHENG F L, BIAN F. Effects of raindrop kinetic energy on splash erosion in the typical black soil region of Northeast China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016,36(15):4708-4717.

[7] 高学田,包忠谟.降雨特性和土壤结构对溅蚀的影响[J].水土保持学报,2001,15(3):24-26,47.
GAO X T, BAO Z M. Study on Effects of rainfall and soil structure on raindrop splash[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(3):24-26,47.

[8] 郭威震,胡斐南,谭滔滔,等.土壤表面电场对黑土团聚体破碎和侵蚀的影响[J].应用生态学报,2020,31(8):2644-2652.
GUO W Z, HU F N, TAN T T, et al. Effects of soil surface electric field on aggregates breakdown and water erosion in black soil region of northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(8):2644-2652.

[9] 秦越,程金花,张洪江,等.雨滴对击溅侵蚀的影响研究[J].水土保持学报,2014,28(2):74-78.
QIN Y, CHENG J H, ZHANG H J, et al. A study of the raindrop impact to splash erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2014,28(2):74-78.

[10] VAEZI A R, AHMADI M, CERDÀ A. Contribution of raindrop impact to the change of soil physical properties and water erosion under semi-arid rainfalls [J].The Science of the Total Environment,2017,583:382-392.

[11] 刘目兴,聂艳,于婧.不同初始含水率下粘质土壤的入渗过程[J].生态学报,2012,32(3):871-878.
LIU M X, NIE Y, YU J. The infiltration process of clay soil under different initial soil water contents[J]. Acta Ecologica Sinica,2012,32(3):871-878.

[12] REJMAN J, HELMING K, DE BICKI R. Effect of surface conditions of runoff and soil loss for chernozem soil[J]. International Agrophysics,2001,15(1):55-58.

[13] RUDOLPH A, HELMING K, DIESTEL H. Effect of antecedent soil water content and rainfall regime on microrelief changes[J].Soil Technology,1997,10(1):69-81.

[14] 赵晓光,吴发启.单雨滴击溅规律及其对溅蚀土粒的分选作用[J].水土保持学报,2001,15(1):43-45,49.
ZHAO X G, WU F Q. Single raindrop splash law and its selection role on soil particles splashed[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2001,15(1):43-45,49.

[15] YANG W, LI Z X, CAI C F, et al. Tensile strength and friability of ultisols in sub-tropical China and effects on aggregate breakdown under simulated rainfall [J].Soil Science,2012,177(6):377-384.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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):1-9,18.
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):1-9,18.

[19] 马仁明,蔡崇法,李朝霞,等.前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2014,30(3):95-103.
MA R M, CAI C F, LI Z X, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozem[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(3):95-103.

[20] XIAO H, LIU G, ZHANG Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2018,178:150-158.

[21] 牟金泽.雨滴速度计算公式[J].中国水土保持,1983(3):42-43.
MU J Z. Calculation formula of raindrop velocity[J]. Soil and Water Conservation in China,1983(3):42-43.

[22] 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.

[23] 刘婧芳,胡斐南,杨志花,等.土粒表面电场对土壤团聚体破碎及溅蚀的影响[J].农业工程学报,2020,36(7):149-156.
LIU J F, HU F N, YANG Z H, et al. Effects of soil surface electric field on the breakdown and splash erosion of soil aggregate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36(7):149-156.

[24] MA R T, HU F N, LIU J F, et al. Evaluating the effect of soil internal forces on the stability of natural soil aggregates during vegetation restoration[J].Journal of Soils and Sediments,2021,21(9):3034-3043.

[25] MA R T, GUO W Z, HU F N, et al. Effects of soil internal forces on splash detachment and transport of

aggregate fragments in Mollisols of Northeast China [J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(4): e13273.

[26] 吴普特,周佩华.地表坡度对雨滴溅蚀的影响[J].水土保持通报,1991,11(3):8-13, 28.
WU P T, ZHOU P H. The effect of land slope upon raindrop splash erosion[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,1991,11(3):8-13, 28.

[27] 相莹敏,张洪江,程金花,等.华北土石山区土壤溅蚀影响因素分析[J].中国水土保持科学,2016,14(2):120-126.
XIANG Y M, ZHANG H J, CHENG J H, et al. Factors influencing soil splash erosion in rocky mountain area of Northern China[J]. Science of Soil and Water Conservation,2016,14(2):120-126.

[28] 王晨沣,张守红,王彬,等.不同土壤前期含水量对土壤分离临界水动力学特性及其抗剪强度的影响[J].水土保持学报,2017,31(1):91-96,102.
WANG C F, ZHANG S H, WANG B, et al. Study on critical hydraulic characteristic of soil detachment and soil shear strength under different antecedent soil moisture contents[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(1):91-96,102.

[29] 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.

[30] LIN X, HU Q H, CHEN Z H, et al. Changes in water vapor adsorption and water film thickness in clayey materials as a function of relative humidity[J]. Vadose Zone Journal,2020,19(1):e20063.

[31] 郭霞,傅强,田锐,等.动态光散射技术测定土壤/粘土胶体的 Hamaker 常数[J].西南大学学报(自然科学版),2016,38(6):74-81.
GUO X, FU Q, TIAN R, et al. Dynamic light scattering technology determination the hamater constant of soil/clay colloids[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition),2016,38(6):74-81.

[32] 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.

[33] AN J, ZHENG F L, LU J, et al. Investigating the role of raindrop impact on hydrodynamic mechanism of soil erosion under simulated rainfall conditions[J]. Soil Science,2012,177(8):517-526.

(上接第 67 页)

[35] 汤立群.坡面降雨溅蚀及其模拟[J].水科学进展,1995,6(4):304-310.
TANG L Q. Soil erosion caused by impacts of raindrop on the sloping land and its simuation[J]. Advances in Water Science,1995,6(4):304-310.

[36] 范昊明,王铁良,周丽丽,等.不同坡形坡面径流流速时空分异特征研究[J].水土保持学报,2007,21(6):35-38.
FAN H M, WANG T L, ZHOU L L, et al. Study on temporal and spatial variation of current velocity on different form slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2007,21(6): 35-38.

[37] 丁文峰,李占斌,丁登山.坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J].水土保持学报,2002,16(3):72-75.
DING W F, LI Z B, DING D S. Study on hydrodynamic characters of runoff in rill erosion process on slope [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 (3):72-75.

[38] ALI M, STERK G, SEGER K M, et al. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland flow over erodible beds [J]. Hydrology and Earth System Sciences,2012,16(2):591-601.

[39] 周凡凡,高建恩,王照润,等.坡面降雨径流侵蚀输沙的不平衡特性研究[J].水土保持学报,2021,35(6):95-100.
ZHOU F F, GAO J N, WANG Z R, et al. Study on unbalance characteristics of sediment transport by rainfall runoff erosion on slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2021,35(6):95-100.

[40] XU X M, ZHENG F L, WILSON G V. Flow hydraulics in an ephemeral gully system under different slope gradients, rainfall intensities and inflow conditions[J]. Catena,2021,203:e105359.

[41] 李宏伟,王文龙,车小力,等.非恒定流对浅沟侵蚀产沙及水动力参数的影响[J].中国水土保持科学,2011,9(6):14-21.
LI H W, WANG W L, CHE X L, et al. Effects of non-state discharge on ephemeral gully erosion sediment and hydraulic parameters[J]. Science of Soil and Water Conservation,2011,9(6):14-21.

[42] WELLS R R, MOMM H G, BENNETT S J, et al. A measurement method for rill and ephemeral gully erosion assessments[J]. Soil Scieence Society of America Journal,2016,80(1):203-214.