

# 降雨强度与初始水分对红壤大团聚体溅蚀特性的影响

黄子轩<sup>1</sup>, 黄钰涵<sup>1</sup>, 韦娟<sup>1</sup>, 陈峰庭<sup>1</sup>,  
谭青芳<sup>1</sup>, 常志勇<sup>2</sup>, 黄有萍<sup>1</sup>, 刘伟燕<sup>1</sup>, 王乐涵<sup>1</sup>

(1.广西大学 林学院 广西森林生态与保育重点实验室,  
广西 南宁 530004; 2.广西水利电力职业技术学院, 广西 南宁 530023)

**摘要:** [目的] 探究不同初始含水率和雨强对红壤大团聚体溅蚀特征和溅蚀过程的影响,为理解和防控红壤大团聚体溅蚀过程提供科学依据。[方法] 选取红壤大团聚体(2~5 mm)为研究对象,通过人工模拟降雨试验,探讨4个雨强(30,60,90,140 mm/h)和4个初始含水率(10%,20%,30%、饱和)下团聚体溅蚀量和溅蚀率的变化规律。[结果] ①相同初始含水率下,红壤大团聚体溅蚀量在4个雨强下的变化范围分别是0.05~0.27,0.03~0.19,0.16~1.41和0.03~1.48 g。②相同雨强下,饱和和初始含水率下的团聚体溅蚀量均显著增大( $p<0.05$ )。③在4个雨强下,饱和和初始含水率下的团聚体溅蚀量相较于非饱和和初始含水率下(10%,20%和30%)的溅蚀量总和分别增大1.50,1.11,3.80,3.21倍。④初始含水率、雨强及其交互作用对团聚体溅蚀量均产生直接正向影响,效应值分别为0.646,0.415,0.361。[结论] 在20%初始含水率下,雨强增大对红壤大团聚体溅蚀作用不明显。在其他初始含水率条件下,红壤大团聚体的溅蚀量对雨强变化敏感,在强降雨(90 mm/h)或极端暴雨(140 mm/h)条件下更易受到溅蚀作用的影响。相同雨强下,饱和和初始含水率会加剧溅蚀作用的发生和强度。红壤大团聚体溅蚀量与初始含水率和雨强间呈良好的幂函数关系,初始含水率是影响溅蚀量的关键因素。

**关键词:** 极端暴雨; 饱和含水率; 红壤; 团聚体; 溅蚀量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)02-0030-08

中图分类号: S157.1

**文献参数:** 黄子轩, 黄钰涵, 韦娟, 等.降雨强度与初始水分对红壤大团聚体溅蚀特性的影响[J].水土保持通报,2025,45(2):30-37. Huang Zixuan, Huang Yuhuan, Wei Juan, et al. Effects of rainfall intensity and initial moisture on splash erosion characteristics of red soil macro-aggregates [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025,45(2):30-37. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2025.02.004; CSTR:32312.14.stbctb.2025.02.004.

## Effects of rainfall intensity and initial moisture on splash erosion characteristics of red soil macro-aggregates

Huang Zixuan<sup>1</sup>, Huang Yuhuan<sup>1</sup>, Wei Juan<sup>1</sup>, Chen Fengting<sup>1</sup>,  
Tan Qingfang<sup>1</sup>, Chang Zhiyong<sup>2</sup>, Huang Youping<sup>1</sup>, Liu Weiyan<sup>1</sup>, Wang Lehan<sup>1</sup>

(1.Guangxi Key Laboratory of Forest Ecology and Conservation,

College of Forestry, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China;

2.Guangxi Vocational College of Water Resources and Electric Power, Nanning, Guangxi 530023, China)

**Abstract:** [Objective] The effects of different initial moisture content and rainfall intensities on the splashing characteristics and processes of red soil macro-aggregates were explored, in order to provide a scientific basis for understanding and preventing the splash erosion process of red soil macro-aggregates. [Methods] Red soil macro-aggregates (2—5 mm) were selected for study. Artificially simulated rainfall experiments were conducted to explore the variation patterns of splash erosion and splash erosion rate with four rainfall

收稿日期:2024-11-05

修回日期:2024-12-30

采用日期:2024-12-30

资助项目:国家自然科学基金青年基金“不同前期含水量下地表糙度对红壤坡面流水动力特性的影响机制”(42207389)

第一作者:黄子轩(2000—),女(瑶族),广西壮族自治区桂林市恭城县人,硕士研究生。研究方向为恢复生态学。Email:2330408683@qq.com。

通信作者:黄钰涵(1992—),女(汉族),贵州省毕节市大方县人,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀机理、土壤水文与水土保持方面的研究。

Email:huangyuhuan0710@foxmail.com。

intensities (30, 60, 90, and 140 mm/h) and four initial moisture content levels of moisture content (10%, 20%, 30%, and saturation). [Results] ① Under the same initial moisture content, the ranges of splash erosion amount for macro-aggregates of red soil at four different rainfall intensities were from 0.05 to 0.27 g, from 0.03 to 0.19 g, from 0.16 to 1.41 g, and from 0.03 to 1.48 g. ② At the same rainfall intensity, the splash erosion of the aggregates under saturated initial moisture conditions all increased significantly ( $p < 0.05$ ). ③ At the four rainfall intensities, the splash erosion of the aggregates under saturated initial moisture conditions increased by 1.50, 1.11, 3.80, 3.21 times, respectively, compared to the sum of the splash erosion under unsaturated initial moisture conditions (10%, 20%, and 30%). ④ The initial moisture content, rainfall intensity, and their interaction all exerted direct positive effects on the splash erosion of the aggregates, with effect sizes of 0.646, 0.415, and 0.361, respectively. [Conclusion] At an initial moisture content of 20%, an increase in rainfall intensity did not significantly impact the splash erosion of red soil macro-aggregates. Under other initial moisture content conditions, the splash erosion of the red soil macro-aggregates was sensitive to changes in rainfall intensity at the same initial moisture content. Macro-aggregates of red soil were more susceptible to the impact of splash erosion under heavy rainfall (90 mm/h) or extreme rainfall (140 mm/h). At the same rainfall intensity, the saturated initial moisture content increased the occurrence and severity of splash erosion. The initial moisture content and rainfall intensity showed significant, positive correlations with changes in red soil macro-aggregates. Additionally, the initial moisture content was a key factor influencing splash erosion.

**Keywords:** extreme rainstorm; saturated moisture content; red soil; aggregates; splash erosion

水力侵蚀是亚热带红壤区主要的侵蚀类型之一,对土壤质量和社会经济状况构成严重威胁<sup>[1]</sup>。在水力侵蚀过程中,溅蚀作为土壤剥蚀和搬运的初始阶段,直接影响入渗和径流过程,从而改变土壤侵蚀强度,对水力侵蚀演化具有重要影响<sup>[2-3]</sup>。土壤团聚体破碎是溅蚀发生的关键,大团聚体(>1 mm)比小团聚体更易发生破碎<sup>[3]</sup>。因此,研究大团聚体溅蚀特征是构建土壤侵蚀预报模型及明确土壤侵蚀治理措施的重要基础。

溅蚀主要受雨强、土壤初始含水率和团聚体粒径大小因素的影响<sup>[3-4]</sup>。D. Zumar 等<sup>[4]</sup>通过研究不同雨强对粉壤土溅蚀的影响,表明溅蚀量与雨强呈线性增长趋势。高学田等<sup>[5]</sup>通过模拟不同雨强对原状土和扰动土的溅蚀影响,也发现溅蚀量随雨强增加而增加。除雨强外,土壤初始含水率通过改变土壤孔隙度,降低颗粒间的黏附力,影响土壤的侵蚀程度<sup>[6]</sup>。有研究表明随着土壤初始含水率的增加,土壤抗溅蚀能力增强。N. Zambon 等<sup>[7]</sup>发现当含水率 $\leq 30\%$ ( $>5\%$ )时粉壤土和壤土的溅蚀量显著低于 $<5\%$ 含水率条件。但也有研究表明土壤初始含水率的增加会加剧溅蚀作用。A. K. Darvishan 等<sup>[8]</sup>通过研究不同初始含水率下沙壤土的溅蚀量,发现当含水率为40%时,溅蚀量显著高于12%含水率下的溅蚀量。所以初始含水率对溅蚀过程和溅蚀量的影响复杂且具有变异性,含水率对溅蚀的影响依赖于土壤类型和研究条件。此外,土壤团聚体作为土壤结构的基本单

元,其大小对溅蚀的抵抗能力存在明显差异。在降雨条件下红壤大团聚体(2~5 mm)破碎程度大,稳定性不强<sup>[9]</sup>。因此,在实际土壤管理和侵蚀防治中,降雨对土壤大团聚体的稳定性的影响更值得关注。

红壤是中国重要的耕作土壤之一,红壤坡耕地受高强度耕作和土壤水蚀的影响,土壤质量下降,严重制约区域农业经济发展<sup>[10]</sup>。亚热带红壤区具有明显的时空季节性变化特征和较广泛的年降雨量波动,雨季次雨强大,极端降雨事件频繁<sup>[11]</sup>。传统耕作使耕层底部形成犁底层,由于犁底层土壤透水性差,并且在长历时降雨或极端降雨条件下,可能因犁底层入渗受阻,使耕层逐渐形成饱和和土层<sup>[12]</sup>,红壤坡耕地干湿两季耕层土壤初始含水率可能从凋萎系数变化至完全饱和。由于干湿交替引起的红壤耕层土壤初始含水率剧烈变化,极易造成红壤大团聚体的溅蚀,因此系统研究不同雨强和初始含水率对红壤大团聚体溅蚀过程的影响是十分必要的。本研究的具体研究目标包括:①研究不同雨强和初始含水率下红壤大团聚体溅蚀特征;②明确降雨时间对红壤大团聚体溅蚀过程的影响;③探究初始含水率和雨强交互作用对红壤大团聚体溅蚀的影响。研究结果可为理解和完善红壤大团聚体溅蚀过程、防治红壤坡耕地土壤侵蚀提供科学参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

供试土壤于2023年6月采自广西壮族自治区崇

左市扶绥县渠黎镇广西亚热带农科新城(107°78'E, 22°51'N),为第四纪红黏土发育的红壤。野外采样时采取表层(0—20 cm)原状土供理化分析试验,其中,采用重铬酸钾外加热法测定有机质含量,吸管法测定土壤颗粒组成(美国制)。部分土壤基本性质详见表 1。

试验前将野外采集的红壤坡耕地耕层原状土自然风干,除去杂草和石块,沿自然破碎面轻轻掰开,用干筛法筛分得到 2~5 mm 大团聚体。根据所收集广西壮族自治区降雨频率和强度的资料,设置了 4 个雨强 30,60,90,140 mm/h。研究表明中国红壤区旱季初始含水率普遍低于 10%<sup>[9]</sup>,并结合室内分析得出试验区红壤质量含水量(表 1),设定了 4 个土壤初始含水率 10%,20%,30%和饱和。选取 2~5 mm 大团聚体进行人工模拟降雨试验。所有试验处理重复 3 次,累计开展模拟降雨试验 48 场次。

根据风干测得的团聚体含水率与目标含水率确定加水量,对团聚体进行雾化喷洒,而后密封静置

24 h,以使各试样达到目标含水率。制定饱和含水率时,将团聚体置于置样区内后慢速放入水中浸泡,至水面与置样区内团聚体持平,稍没过团聚体表面,浸泡 24 h。为验证该方法的可行性,进行了 4 次预试验,分别称取风干状态下 2~5 mm 大团聚体 50.27,50.13,50.45 和 50.26 g,按上述方法进行饱和含水率的制定,结果显示,经浸泡 24 h 后测得大团聚体平均含水率达 66.76%,且浸泡过程中大团聚体崩解平均丢失率仅为 0.3%,表明该方法可使红壤大团聚体充分达饱和状态且不会发生崩解现象。

试验开始前,在置样区底部覆盖一层纱布,称取率定好初始含水率的红壤大团聚体 60 g 填入溅蚀盘中装填均匀。校准模拟降雨器雨强达到目标雨强,从雨滴降落开始计时,降雨过程中每 3 min 用洗涤瓶将收集区中的红壤冲洗到滤纸中,干燥并称量,计算该阶段的团聚体溅蚀率,每场降雨时长为 60 min,间隔 3 min 收集一次样品,每场降雨共收集 20 个样品。

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 Soil physicochemical properties of tested samples

土壤质地	有机质/ (g · kg <sup>-1</sup> )	土壤质量含水量/%			颗粒组成(美国制)/%		
		初始含水率	田间持水量	饱和含水量	砂粒 (2~0.05 mm)	粉粒 (0.05~0.002 mm)	黏粒 (<0.002 mm)
黏土	43.43	9.13	33.4	62.2	9.83	14.43	75.74

## 1.2 试验装置

试验装置由人工模拟降雨系统和溅蚀盘组成。人工模拟降雨器采用西安清远测控技术有限公司的 QYJY-503 型降雨喷头。喷头距地面垂直高度 6 m;模拟降雨器有效降雨面积为 11 m×8 m,雨强变化范围为 15~200 mm/h,降雨均匀度大于 85%。

试验采用改良的 Morgan 溅蚀盘(图 1),倒圆台装置内径为 30 cm,高为 30 cm,底部直径为 15 cm。该装置由置样区,收集区和底部出水口 3 部分组成。置样区直径为 10 cm,高为 1 cm,并在底部均匀设置有 1 mm 的孔洞用于排出下渗水分。在收集区底部设置出水口,用于收集溅蚀样品。

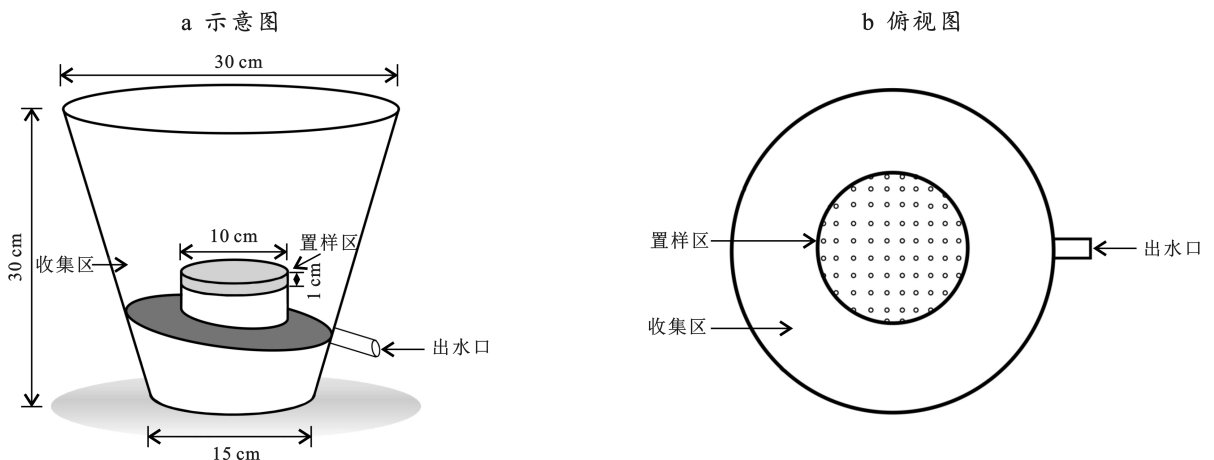


图 1 溅蚀装置示意图(a)和俯视图(b)

Fig.1 Sketches of Morgan splash pan (a) and top view(b)

### 1.3 溅蚀率计算

$$D_s = \frac{S}{A_s t} \quad (1)$$

式中: $D_s$  为红壤溅蚀率,表示雨滴在单位时间单位面积内从置样区中击溅的红壤质量 $[g/(m^2 \cdot min)]$ ;  $S$  为红壤溅蚀量(g);  $A_s$  为置样区面积( $m^2$ );  $t$  为溅蚀时间(min);  $S$  为 3 min 内收集的红壤溅蚀量, $t$  为 3 min。

### 1.4 数据处理

试验数据运用 SPSS 21.0 (SPSS Inc. Chicago, USA) 软件进行相关性分析和统计描述,图表分别采用 Origin 2018 (OriginLab Inc. Northampton, USA) 和 Microsoft Excel 2010 完成。

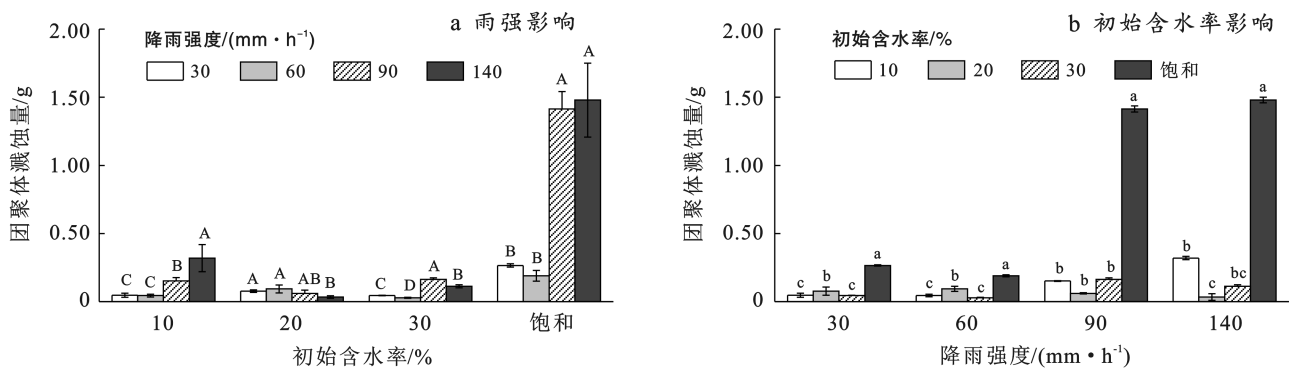
## 2 结果与分析

### 2.1 红壤大团聚体溅蚀量的变化特征

试验结果表明,在 10%,30% 和饱和初始含水率下,团聚体溅蚀量在 90,140 mm/h 雨强下相较于 30 mm/h 雨强显著增大(图 2a,  $p < 0.05$ )。在 10% 条件下,30,60,90,140 mm/h 雨强下的团聚体溅蚀量

分别为 0.05,0.05,0.15 和 0.32 g。在 30% 条件下,30,60,90,140 mm/h 雨强下的团聚体溅蚀量分别为 0.05,0.03,0.16 和 0.11 g。在饱和条件下,30,60,90,140 mm/h 雨强下的团聚体溅蚀量分别为 0.27,0.19,1.41 和 1.48 g。在 20% 初始含水率下,团聚体溅蚀量相近且无显著差异( $p > 0.05$ ),团聚体溅蚀量范围是 0.03~0.09 g。

雨强一定时,红壤大团聚体在饱和和初始含水率下的溅蚀量均最大(图 2b)。在 30,60,90,140 mm/h 雨强下,饱和和初始含水率下的团聚体溅蚀量分别为 0.27,0.19,1.41 和 1.48 g。非饱和和初始含水率中,在 30,60 mm/h 雨强下,团聚体溅蚀量随含水率增加呈先增大后降低的趋势,且 30% 初始含水率下的溅蚀量最小,分别为 0.05 和 0.03 g;在 90 mm/h 雨强下,10%,20% 和 30% 初始含水率条件下的团聚体溅蚀量无显著差异,分别为 0.15,0.06,0.16 g;在 140 mm/h 雨强下,团聚体溅蚀量在 10% 至 20% 含水率时减小( $p < 0.05$ ),在 20% 至 30% 含水率时无显著差异( $p > 0.05$ ),其中,20% 初始含水率下的溅蚀量为 0.03 g。



注:①误差线为标准差;②不同大写字母表示相同初始含水率下不同雨强之间的红壤团聚体溅蚀量差异显著( $p < 0.05$ ),不同小写字母表示相同雨强下,不同初始含水率的红壤团聚体溅蚀量差异显著( $p < 0.05$ )。

图 2 不同雨强(a)和初始含水率(b)下的红壤大团聚体溅蚀量

Fig.2 Splash erosion of red soil macroaggregates at different rainfall intensities(a) and initial moisture contents(b)

### 2.2 红壤大团聚体溅蚀率随降雨时间的变化特征

在饱和和初始含水率下,团聚体溅蚀量随降雨时间的增加呈持续波动趋势,且在 90,140 mm/h 雨强下,团聚体溅蚀率在降雨过程中均显著大于 30,60 mm/h 雨强(图 3,  $p < 0.05$ )。在非饱和和初始含水率下(10%,20% 和 30%),团聚体溅蚀率随降雨时间的增加呈波动至平稳的趋势,且在 30,60 mm/h 雨强下,团聚体溅蚀量随降雨时间增加波动相近,未出现明显峰值;在 20% 初始含水率下,140 mm/h 雨强下的团聚体溅蚀量在降雨过程中均相较于其他 3 个雨强小。

### 2.3 初始含水率和雨强与溅蚀量的回归关系

对团聚体溅蚀量和雨强及初始含水率进行多元

回归分析,经计算后发现雨强和初始含水率有数量级的差异,故将雨强进行换算,单位从 mm/h 转换为 mm/min,得到以下方程:

$$S_2 = 2.39 X_i^{1.18} X_m^{2.95} \quad (R^2 = 0.82, p < 0.01) \quad (2)$$

式中: $S_2$  为红壤大团聚体溅蚀量;  $X_i$  为雨强;  $X_m$  为初始含水率。

回归方程决定系数( $R^2$ )为 0.82,表明红壤大团聚体溅蚀量与雨强和初始含水率之间呈幂函数关系。由幂函数指数可知,初始含水率的幂指数(2.95)高于雨强的幂指数(1.18),表明初始含水率对团聚体溅蚀量的影响大于雨强。为明确初始含水率和雨强及其交互作用对红壤大团聚体的影响,构建结构方程,结果表

明,初始含水率和雨强以及其交互作用对红壤大团聚体溅蚀量均具有显著直接正影响( $p < 0.01$ ) (图 4)。其中初始含水率对红壤大团聚体溅蚀量的直接正影

响最高,标准化路径系数(SPC)为 0.646;其次是初始含水率和雨强的交互作用,SPC 为 0.415;雨强对红壤大团聚体溅蚀量的直接正影响最低,SPC 为 0.361。

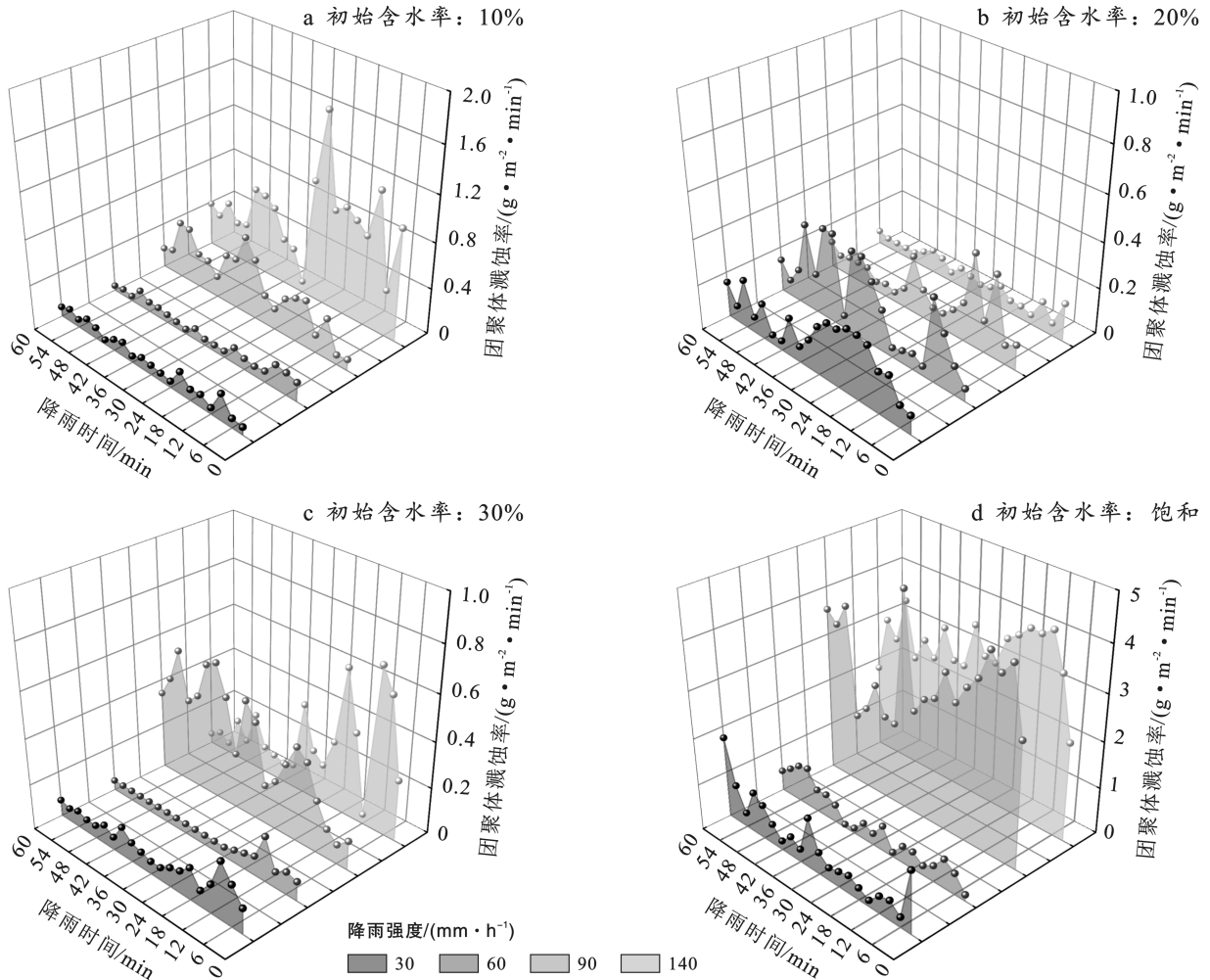
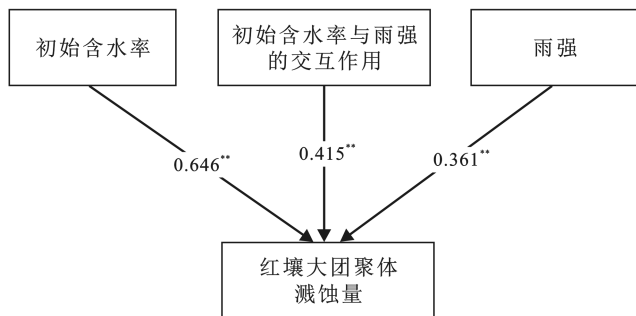


图 3 不同初始含水率和降雨强度下红壤大团聚体溅蚀率随降雨时间的变化  
Fig.3 Changes of splash erosion rate of red soil macroaggregate with rainfall duration at different initial moisture contents and rainfall intensities



注:①箭头上数值表示标准化路径系数(SPC);②实线表示系数为正数;③\*\*表示显著性水平( $p < 0.01$ )。

图 4 初始含水率、雨强及其两者交互作用对红壤大团聚体溅蚀量的影响结构方程模型

Fig.4 Structural equation model depicting effects of initial moisture content, rainfall intensity, and their interaction on splash erosion of red soil macro-aggregates

### 3 讨论

#### 3.1 降雨条件对团聚体溅蚀特征的影响

本研究结果表明,在 10%,30%和饱和初始含水率下,团聚体溅蚀量随雨强增加而增大。与 A. R. Vaezi 等<sup>[13]</sup>研究雨强增大导致 2~4.7 mm 沙壤土团聚体溅蚀量增大的研究结论一致,即随着雨强的增大,雨滴打击力增强,分离大团聚体的能力增大,为溅蚀作用提供大量可搬运的物质。本试验结果中,在饱和初始含水率下,团聚体溅蚀量随雨强增大(从 30 mm/h 到 90 mm/h,140 mm/h)分别增大 6.44 和 6.78 倍。与张兴义等<sup>[14]</sup>在研究黑土团聚体溅蚀量时得出的结果相似,即雨强从 30 mm/h 增加到 90 mm/h 时,团聚体的溅蚀量增加了近 10 倍。在强降雨或极

端暴雨条件下,红壤大团聚体更容易受到溅蚀作用的影响,从而增加土壤流失的风险。在 20% 初始含水率条件下,随雨强的增大,团聚体溅蚀量无显著差异 ( $p > 0.05$ )。综上所述,除 20% 初始含水率外,团聚体溅蚀量在同一初始含水率下对雨强变化敏感,在强降雨或极端暴雨条件下,红壤大团聚体更容易受到溅蚀作用的影响,加剧土壤侵蚀。

降雨过程中,在饱和初始含水率下,团聚体溅蚀率随降雨时间呈快速增长至波动的趋势。P. Shi 等<sup>[15]</sup>在研究粉砂壤土的溅蚀量随降雨时间的增长中也得到类似的结论,即较高初始含水率条件下的团聚体抗溅蚀能力弱,随着雨强的增大,雨滴打击力增强导致团聚体快速破碎,溅蚀量增大。研究表明,饱和含水率下的团聚体极易受侵蚀<sup>[16]</sup>。在雨强作用下,团聚体溅蚀率快速增长,并且团聚体间的黏结力不随降雨时间的增长而增强<sup>[17]</sup>,团聚体表现出极低的抗溅蚀能力。在非饱和初始含水率下(10%, 20% 和 30%),中小雨强(30 mm/h, 60 mm/h)中的团聚体溅蚀率随降雨时间呈先增大后降低最后波动至平稳的趋势。与 Xiao Yan 等<sup>[18]</sup>和 Leng Nuan 等<sup>[19]</sup>得出的红壤团聚体溅蚀率在中小雨强下随降雨时间的波动结果一致。降雨初期,由于雨强相对较小,雨滴打击力较弱,溅蚀优先搬运溅蚀盘中分散的土壤颗粒。随着可搬运土壤颗粒的减少,溅蚀率随之降低<sup>[20]</sup>。在强降雨(90 mm/h)和极端暴雨(140 mm/h)下,团聚体溅蚀率则呈现先降低后增大最后波动至平稳的趋势。在较大雨强条件下,降雨初期大部分雨滴能量用于分散破坏团聚体,用于搬运破碎团聚体的能量则相对减少,溅蚀率降低<sup>[21]</sup>。在降雨中期,随团聚体含水率的增加,团聚体抗溅蚀能力降低,使得溅蚀率增大<sup>[22]</sup>。在降雨后期,雨滴反复打击使团聚体表面产生小凹陷,凹陷中的薄层积水阻碍雨滴直接作用于团聚体表面,团聚体稳定性增大<sup>[19]</sup>,其溅蚀率逐渐下降并波动至平稳。综上所述,在饱和初始含水率下,降雨时间对红壤大团聚体的抗溅蚀能力几乎无影响,在非饱和初始含水率下,延长降雨时间有助于增大团聚体稳定性,减弱溅蚀作用。

### 3.2 初始含水率对团聚体溅蚀量的影响

本试验结果中,在相同雨强下,饱和初始含水率下的团聚体溅蚀量均显著增大 ( $p < 0.05$ )。在 30 mm/h 雨强下,饱和初始含水率下的团聚体溅蚀量相较于 10%, 20% 和 30% 含水率分别增大 5.40, 3.37 和 5.40 倍。在 60 mm/h 雨强下,分别增加 3.80, 2.11 和 6.33 倍。在 90 mm/h 雨强下,分别增加为 9.40, 23.5 和 8.81 倍。在 140 mm/h 雨强下,分别增加 4.63,

49.33 和 13.45 倍。在完全饱和的土壤中,缺乏水膜产生的表面张力对土壤团聚体稳定性的影响,导致团聚体间的凝聚力减弱<sup>[23]</sup>,进而溅蚀量增大。当土壤初始含水率达饱和和初始含水率时,团聚体稳定性低,易加剧溅蚀作用的发生和强度。在非饱和初始含水率下(10%, 20% 和 30%),团聚体溅蚀量比饱和和初始含水率下的溅蚀量低。与相莹敏等<sup>[24]</sup>研究不同前期含水率(4.6%~24.2%)对褐土溅蚀影响的研究结果一致,即低含水率下(10% 和 20%),团聚体吸水使其黏结力增强,团聚体稳定性增大。而当初始含水率达 30% 时,初始含水率接近试验红壤的田间持水量,土壤胶体和矿物颗粒表面的结合力较强,团聚体稳定性最大<sup>[15]</sup>,溅蚀量降低。综上所述,相同雨强下,红壤大团聚体在饱和和初始含水率下的稳定性低,易加剧溅蚀作用的发生和强度;而在非饱和初始含水率下(10%, 20% 和 30%),团聚体稳定性相较于饱和和初始含水率增强,团聚体溅蚀量低。

本研究中,红壤大团聚体的溅蚀量与初始含水率和雨强之间呈良好的幂函数关系。与 D. Zumar 等<sup>[4]</sup>研究雨强和初始含水率与团聚体溅蚀量的函数关系一致,回归方程中,初始含水率的幂指数(2.94)高于雨强的幂指数(1.17),表明初始含水率对团聚体溅蚀量的影响大于雨强。Y. Le Bissonais<sup>[25]</sup>在团聚体稳定性和可蚀性评价综述中表明,即使没有雨滴的作用,仅由于崩解或消散作用,团聚体也可能发生破裂。研究表明,当团聚体初始含水率增大时,团聚体黏结力随之降低,团聚体在降雨的作用下迅速破碎<sup>[26]</sup>。在团聚体破碎后,雨滴的作用促使团聚体内部的有机碳和黏粒流失,导致团聚体的团聚作用逐渐降低<sup>[27]</sup>,含水率表现出比雨强对团聚体更大的破坏作用。综上,初始含水率对溅蚀的影响大于雨强。

### 3.3 初始含水率和雨强的交互作用对团聚体溅蚀量的影响

结构方程结果显示,初始含水率和雨强的交互作用对红壤大团聚体溅蚀量有显著正向效应,且效应值为 0.436。与 Wang Lun 等<sup>[28]</sup>和张转敏等<sup>[3]</sup>研究雨强和初始含水率共同对团聚体溅蚀有正向作用的研究结果一致。相同降雨条件下,随降雨时间的增加,雨滴打击力累积增大导致溅蚀量增加。同时,含水率不断提高,团聚体的黏结力减小导致溅蚀量增大<sup>[26]</sup>。研究表明,雨强产生的雨滴打击力与团聚体快速湿润同时发生,两者共同作用导致团聚体破碎<sup>[29]</sup>。但本试验中,初始含水率对红壤大团聚体溅蚀的影响大于两者的交互作用。与 M. Lado 等<sup>[30]</sup>研究初始含水率对砂质壤土团聚体稳定性的研究结果一致,研究结果

表明团聚体溅蚀量会受到土壤先前含水量的强烈影响。当雨滴作用在初始含水率低的土壤表面时,空气压缩下的消散作用、雨滴打击下的机械作用和土壤矿物非均匀膨胀作用均达峰值,进而对团聚体产生巨大的破坏<sup>[25]</sup>。综上所述,降雨溅蚀过程实际上是土壤初始含水率与雨强相互作用的结果,且初始含水率对红壤大团聚体的影响大于两者的交互作用。因此,在制定土壤保护措施时,必须综合考虑土壤结构特性、初始含水率和雨强等多方面因素的影响,采取针对性的干预策略,有效降低侵蚀与退化的风险。

## 4 结论

(1) 20%初始含水率下,雨强增大对红壤大团聚体溅蚀作用不明显。其他初始含水率条件下,红壤大团聚体的溅蚀量均对雨强变化敏感,尤其在强降雨(90 mm/h)或极端暴雨(140 mm/h)条件下,红壤大团聚体更容易受到溅蚀作用的影响

(2) 在相同雨强下,饱和初始含水率会加剧溅蚀作用的发生和强度,而在非饱和初始含水率下(10%, 20%和30%),团聚体稳定性相较于饱和初始含水率增强,团聚体溅蚀量低。在饱和初始含水率下,降雨时间对红壤大团聚体的抗溅蚀能力几乎无影响,而在非饱和初始含水率下,延长降雨时间有助于增大团聚体稳定性,减弱溅蚀作用。

(3) 红壤大团聚体溅蚀量对初始含水率和雨强的响应呈幂函数关系。初始含水率对团聚体溅蚀量存在显著正向影响,且初始含水率对溅蚀的影响大于雨强和两者的交互作用,初始含水率是影响红壤大团聚体溅蚀量的关键因素。

## 参考文献(References)

- [1] Borrelli P, Robinson D A, Fleischer L R, et al. An assessment of the global impact of 21st century land use change on soil erosion [J]. *Nature Communications*, 2017,8:2013.
- [2] Fu Yu, Li Guanglu, Zheng Tenghui, et al. Splash detachment and transport of loess aggregate fragments by raindrop action [J]. *Catena*, 2017,150:154-160.
- [3] 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.
- [4] Zumdorf D, Mützenberg D V, Neumann M, et al. Experimental setup for splash erosion monitoring: Study of silty loam splash characteristics [J]. *Sustainability*, 2020,12(1):157.
- [5] 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.  
Gao Xuetian, Bao Zhongmo. Study on effects of rainfall and soil structure on raindrop splash [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2001,15(3):24-26.
- [6] Beczek M, Ryzak M, Sochan A, et al. The mass ratio of splashed particles during raindrop splash phenomenon on soil surface [J]. *Geoderma*, 2019,347:40-48.
- [7] Zambon N, Johannsen L L, Strauss P, et al. Rainfall parameters affecting splash erosion under natural conditions [J]. *Applied Sciences*, 2020,10(12):4103.
- [8] Darvishan A K, Banasik K, Sadeghi S H, et al. Effects of rain intensity and initial soil moisture on hydrological responses in laboratory conditions [J]. *International Agrophysics*, 2015,29(2):165-173.
- [9] Yang Wei, Li Zhaoxia, Cai Chongfa, 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.
- [10] 张跃彬,樊仙,毛均,等.中国主产蔗区气候生态空间分布特征研究[J].*西南农业学报*,2021,34(10):2281-2288.  
Zhang Yuebin, Fan Xian, Mao Jun, et al. Ecological region division for China's main sugarcane producing area through meteorological and ecological characters [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2021,34(10):2281-2288.
- [11] Ma Rentian, Guo Weizhen, Hu Feinan, 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.
- [12] Huang Yuhua, Li Fahu, Wang Wei, et al. Rill erosion processes on a constantly saturated slope [J]. *Hydrological Processes*, 2020,34(20):3955-3965.
- [13] 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]. *Science of the Total Environment*, 2017,583:382-392.
- [14] 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 Xingyi, Qiao Baoling, Li Jianyu, 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.

- [15] Shi P, Thorlacius S, Keller T, et al. Soil aggregate breakdown in a field experiment with different rainfall intensities and initial soil water contents [J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(6): 853-863.
- [16] Kemper W D, Trout T J, Brown M J, et al. Furrow erosion and water and soil management [J]. *Transactions of the ASAE*, 1985, 28(5): 1564-1572.
- [17] Cernuda C F, Smith R M, Vicente-Chandler J. Influence of initial soil moisture condition on resistance of macroaggregates to slaking and to water-drop impact [J]. *Soil Science*, 1954, 77(1): 19-28.
- [18] Xiao Yan, Ma Zhanlong, Jiang Yunan, et al. A study on soil aggregate stability and splash erosion under exogenous electrolyte conditions in the karst region of Southwest China [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2024, 53: 101817.
- [19] Leng N, Deng Y, Huang J, et al. Stability and splash erosion characteristics of lateritic red soil aggregates in the South Subtropical Zone of China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 78(5): 440-453.
- [20] 刘柏玲, 蔡强国, 史志华, 等. 模拟降雨条件下壤土的溅蚀特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(5): 29-33. Liu Boling, Cai Qiangguo, Shi Zhihua, et al. Rain-simulated experiment study on the splash erosion characteristics of Lou soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(5): 29-33.
- [21] 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 Renming, Wang Junguang, Li Zhaoxia, 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.
- [22] Fu Yu, Li Guanglu, Zheng Tenghui, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion [J]. *Catena*, 2020, 185: 104342.
- [23] Jayarathne J R R N, Chamindu Deepagoda T K K, Clough T J, et al. Effect of aggregate size distribution on soil moisture, soil-gas diffusivity, and N<sub>2</sub>O emissions from a pasture soil [J]. *Geoderma*, 2021, 383: 114737.
- [24] 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 Yingmin, Zhang Hongjiang, Cheng Jinhua, 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.
- [25] Le Bissonnais Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 425-437.
- [26] Moragoda N, Kumar M, Cohen S. Representing the role of soil moisture on erosion resistance in sediment models: Challenges and opportunities [J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 229: 104032.
- [27] 汪零, 吴文泉, 倪世民, 等. 溅蚀过程中红壤团聚体周转路径的定量表征[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(8): 115-123. Wang Ling, Wu Wenxiao, Ni Shimin, et al. Quantitative characterization of the turnover path of red soil aggregate in the splash process [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(8): 115-123.
- [28] Wang Lun, Zheng Fenli, Hu Wei, et al. Interactive effects of rainfall intensity, kinetic energy and antecedent soil moisture regime on splash erosion in the Ultisol region of South China [J]. *Catena*, 2023, 222: 106863.
- [29] An Juan, Zheng Fenli, Lu Jia, 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.
- [30] 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.