

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.20220309.001.

王涵, 赵怡凯, 陈祥伟, 等. 降雨强度和坡度对黑土坡耕地团聚体流失特征的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(1): 11-17.  
WANG Han, ZHAO Yikai, CHEN Xiangwei, et al. Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on the Characteristics of Soil Aggregate Loss in Black Soil Sloping Field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1): 11-17.

# 降雨强度和坡度对黑土坡耕地团聚体流失特征的影响

王 涵, 赵怡凯, 陈祥伟, 付 玉

(东北林业大学 林学院, 哈尔滨 150040)

**摘 要:**为量化雨强和坡度对团聚体流失特征的影响,以黑土坡耕地表层土壤(0—10 cm)为研究对象,采用室内模拟降雨的研究方法,对比了不同雨强(78, 127 mm/h)及坡度(2°, 4°, 6°)下团聚体流失特征,并计算了雨强和坡度对团聚体流失量的贡献率。结果表明:(1)相同雨强条件下,团聚体流失总量随坡度的增加显著增加 0.70~1.42 倍;相同坡度条件下团聚体流失总量随雨强的增加在坡度 4°和 6°时分别显著增加 1.94, 2.41 倍。雨强是团聚体流失总量的主要影响因子,贡献率为 52.44%;(2)随坡度增加,流失团聚体 MWD 显著减少, *D* 值仅在雨强 78 mm/h 时显著增加;随雨强增加流失团聚体 MWD, *D* 无显著差异;(3)随坡度增加,粒径 5~1, 1~0.25, 0.25~0.053 mm 团聚体流失量呈先增加后减少的趋势,粒径<0.053 mm 团聚体流失量显著增加。随雨强的增加,小粒径团聚体流失量呈增加趋势,大粒径团聚体流失量仅在高坡度条件下明显增加;(4)雨强是粒径 1~0.25, 0.25~0.053, <0.053 mm 团聚体流失量的主要影响因素,贡献率为 27.42%~47.09%;坡度是粒径 5~1 mm 团聚体流失量的主要影响因素,贡献率为 45.59%。研究结果可为明晰水力侵蚀过程中黑土坡耕地质量演变规律和防治水土流失提供参考。

**关键词:**坡面侵蚀; 团聚体流失; 模拟降雨; 雨强; 坡度; 黑土

中图分类号: S157.1      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2023)01-0011-07

## Effects of Rainfall Intensity and Slope Gradient on the Characteristics of Soil Aggregate Loss in Black Soil Sloping Field

WANG Han, ZHAO Yikai, CHEN Xiangwei, FU Yu

(College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

**Abstract:** To quantify the impact of rainfall intensity and slope gradient on characteristics of aggregate losses, black soil slope surface soil (0—10 cm) was selected as the research object, the research method of the simulated rainfall was adopted to compare the aggregate loss characteristics, and calculate the contributions of rainfall intensity and slope gradient to the aggregate loss under different rainfall intensities (78, 127 mm/h) and the slope gradients (2°, 4°, 6°). The results showed that: (1) under the same rainfall intensity, the total losses of aggregates increased by 0.70~1.42 times with the increase of slope gradient; under the same slope condition, the total losses of aggregates increased by 1.94 times and 2.41 times with the increase of rainfall intensity at the slope of 4° and 6°, respectively; (2) with the increase of rainfall intensity, MWD and *D* had no significant difference; with the increase of slope, the MWD of runoff aggregates decreased significantly, and the *D* value only increased significantly when the rainfall intensity was 78 mm/h; (3) with the increase of slope, losses of the 5~1 mm, 1~0.25 mm, 0.25~0.053 mm of aggregates presented the trend of increase at first and then decrease, loss of <0.053 mm aggregate increased significantly; with the increase of rainfall intensity, the loss of small aggregates increased, while the loss of large aggregates only increased significantly under the condition of high slope gradient; (4) rainfall intensity was the main influence factor on losses of

the 1~0.25 mm, 0.25~0.053 mm, <0.053 mm aggregate, and the contribution rate was 27.42%~47.09%; slope was the main affecting factor on the loss of 5~1 mm aggregate, and the contribution rate was 45.59%. These results can provide the references for clarifying the evolution of the quality of black sloping farmland and preventing soil erosion during hydraulic erosion.

**Keywords:** slope erosion; aggregate loss; simulated rainfall; rainfall intensity; slope gradient; black soil

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,在土壤养分的储存和转化过程中具有至关重要的作用<sup>[1-2]</sup>。土壤侵蚀过程中团聚体的破碎和迁移是侵蚀物质的主要来源。在降雨驱动下,团聚体受雨滴打击破碎并被径流搬运发生迁移<sup>[3]</sup>,其破碎迁移过程对土壤侵蚀的强度有重要的影响<sup>[4]</sup>。研究<sup>[5-7]</sup>指出坡面侵蚀过程对团聚体具有分选作用,大团聚体破碎为小团聚体后被径流搬运。Jia等<sup>[8]</sup>研究表明降雨强度和坡度对团聚体的分选作用有显著影响,粒径<0.25 mm 团聚体是土壤团聚体损失的主要粒级。卢嘉等<sup>[9]</sup>研究发现,随雨强增加,粒径>0.25 mm 团聚体流失量呈增加趋势,粒径<0.25 mm 团聚体流失量呈减少趋势;但也有研究发现<sup>[10]</sup>,在坡面径流搬运能力较弱的条件下,粒径>0.25 mm 团聚体流失量随雨强的提高呈增加趋势。Shi等<sup>[11]</sup>研究指出,坡度的增加会提高径流对大团聚体的输移能力,大团聚体的流失比例明显提高。张怡等<sup>[12]</sup>研究则表明,随着坡度的增加径流泥沙中粒径>0.25 mm 团聚体含量无明显变化,而粒径<0.25 mm 团聚体含量明显增加。综上,目前关于不同雨强和坡度下团聚体流失特征的变化还存在争议,有必要明确雨强和坡度对土壤团聚体流失特征的影响,这对于揭示黑土坡耕地土壤侵蚀机理具有重要的科学价值<sup>[13]</sup>。

东北黑土区作为我国重要的商品粮生产基地,由于不合理的耕作及过度开垦,土壤侵蚀日益加剧<sup>[14]</sup>,其中坡耕地水力侵蚀尤为严重,其水土流失面积已经达到黑土区水土流失总面积的 46.39%<sup>[15]</sup>,严重威胁黑土区水土资源质量安全以及农业经济发展<sup>[16]</sup>。为揭示黑土坡耕地土壤侵蚀的内在规律,目前已经开展大量关于黑土坡耕地侵蚀过程中团聚体流失特征的研究,但多数研究仅表明雨强和坡度对团聚体流失量影响的一般定性规律,缺乏对于雨强和坡度以及两者之间交互作用贡献率的进一步探讨。因此本文以黑土坡耕地表层土壤(0—10 cm)为研究对象,采用室内模拟降雨的研究方法,分析比较不同雨强和坡度之间团聚体流失量的差异,计算雨强和坡度以及两者之间交互作用的贡献率,以期综合评价雨强和坡度对团聚体流失量的影响,揭示黑土坡耕地团聚体流失特征,为进一步研究黑土水力侵蚀过程中坡耕地质量的演变规律提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

土壤样品于 2020 年 9 月采自黑龙江省哈尔滨市宾县地区耕地表层土壤,采样前清除土壤表层枯落物等杂物并将土壤表层修整平整,将自制土槽(长 40 cm×宽 10 cm×高 10 cm)放在修平整的土壤表层,用土壤刀修整土槽底部周围的土壤并把土槽缓慢按压直至完全没入土壤中;从土中取出土槽后,将装满原状土后用纱布和海绵包裹取样器后盖上下底盖,以保证取样器中的土壤不变形,并且减少样品运输过程中土壤样品的扰动,共取 18 个土槽用于模拟降雨试验。采样地表层土壤容重( $1.15 \pm 0.07$ ) g/cm<sup>3</sup>,含水率为( $27.02 \pm 0.31$ )%,pH 值为( $5.50 \pm 0.12$ ),有机质( $33.70 \pm 3.82$ ) g/kg,土壤机械组成为砂粒( $27.20 \pm 3.95$ )%、粉粒( $41.53 \pm 3.61$ )%、黏粒( $31.26 \pm 3.42$ )%。

### 1.2 试验设计与方法

模拟降雨试验于 2020 年 10 月在东北林业大学帽儿山实习基地降雨实验室开展,采用自制针头式模拟降雨装置,由水泵、降雨器、径流冲刷槽、坡度调节支架和径流泥沙收集器组成。降雨器为针头下滴式,其形状为上部开口的长方体,规格长 40 cm×宽 10 cm×高 20 cm,其中等间距垂直插入 50 个针头,通过不同的水头高度和针头型号来调节降雨强度;坡度可调节范围 0~12°;试验土槽规格长 40 cm×宽 10 cm×高 10 cm。

在我国东北黑土区,主要降雨类型为短历时高强度降雨,降雨历时大多小于 1 h<sup>[17]</sup>,所以将降雨历时设定为 30 min。由于黑土区降雨较为集中在 6 月、7 月、8 月份,因此分别选择降雨最为丰富的 7 月(120~150 mm)及降雨量次之的 6 月、8 月(60~120 mm)的平均值为降雨强度选择依据<sup>[18]</sup>,结合降雨器可以稳定的降雨强度并进行多次率定,确定本试验雨强为 78,127 mm/h。由于黑土区地形多为漫川漫岗,地形起伏变化较小,坡度范围主要在 1°~8°<sup>[9]</sup>,因此设计 2°,4°,6°共 3 个坡度。每种降雨强度和坡度的组合试验设计 3 个重复。

每次试验前将土槽内土壤水分达到饱和。降雨开始前用挡板盖住土槽,并对雨强进行多次率定,确定雨强达到试验标准后,撤掉挡板,开始降雨并计时。降雨

过程中待坡面产流时记录产流时间,并以每 5 min 收集一次的频率接取径流泥沙,降雨结束后将接取的径流泥沙通过湿筛法得到到粒径 $>5, 5\sim1, 1\sim0.25, 0.25\sim0.053$  mm 这 5 个粒径,并转移至铝盒中在 $40^{\circ}\text{C}$ 下烘干 24 h 后称重,得到各粒径团聚体流失质量 $m_i$ 。

### 1.3 指标计算

(1) 各粒径团聚体流失量的计算方法如下:

$$M_i = \frac{m_i}{A} \quad (1)$$

式中: $M_i$  为 $i$  粒径团聚体流失量( $\text{g}/\text{m}^2$ ); $m_i$  为径流泥沙中 $i$  粒径团聚体质量( $\text{g}$ ); $A$  为土槽面积( $A=0.04 \text{ m}^2$ );团聚体流失总量为各粒径团聚体流失量之和。

(2) 团聚体平均重量直径(MWD)是评价团聚体特征的指标,其值越大则团聚体稳定性越高,计算公式为:

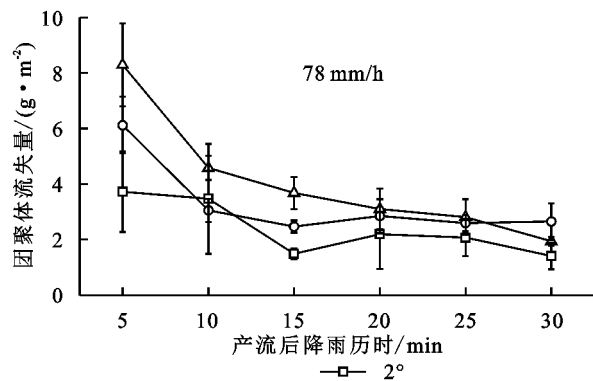
$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{r_{i-1} + r_i}{2} \times m_i \quad (2)$$

式中: $r_i$  为每个网筛的孔隙大小( $\text{mm}$ ), $r_0 = r_1$  以及 $r_n = r_{n+1} + 1$ ;  $m_i$  为 $i$  级网筛中团聚体的质量百分数; $n$  为网筛编号。

(3) 团聚体分形维数( $D$ )是反映团聚体分散程度的指标,其值越大则团聚体分散程度越高<sup>[19]</sup>,计算公式为:

$$\frac{M(r < R_i)}{M_T} = \left( \frac{R_i}{R_{\max}} \right)^{3-D} \quad (3)$$

式中: $M(r < R_i)$  为尺寸 $r$  土壤颗粒累积量小于相对的尺寸 $R_i$  的累积量; $M_T$  为总颗粒含量; $R_i$  为筛子孔的尺寸; $R_{\max}$  为由最大筛子孔定义的最大颗粒尺寸。



(4) 根据曹晓娟等<sup>[20]</sup>采用的各因子贡献率计算方法,利用 SPSS 软件进行方差分析,通过下式计算得到各因子的贡献率( $P_F$ ):

$$P_F = \frac{\text{SS}_F - (\text{DOF}_F \times V_{\text{Er}})}{\text{SS}_T} \times 100 \quad (4)$$

式中: $P_F$  为因子贡献率(%); $\text{SS}_F$  为因子的Ⅲ型平方和; $\text{DOF}_F$  为因子的自由度; $V_{\text{Er}}$  为误差平方和; $\text{SS}_T$  为总离差平方和。

### 1.4 数据分析方法

数据通过 Excel 2016 进行整理;采用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)进行显著性分析( $p < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同雨强和坡度下团聚体流失总量

测定结果表明(图 1),不同雨强及坡度下团聚体流失量在降雨产流后 0~5 min 内有最大值,随后在 5~10 min 内迅速减少,并在 10~30 min 内趋于平稳。相同雨强条件下,随坡度的增加,在 0~5 min 内团聚体流失量的最大值显著增加 1.08~1.79 倍( $p < 0.05$ );团聚体流失量在 10~30 min 内趋于的稳定值显著增加 0.88~2.39 倍( $p < 0.05$ )。相同坡度条件下,当雨强由 78 提高至 127 mm/h 时,在 0~5 min 内团聚体流失量的最大值显著增加 1.28~1.88 倍( $p < 0.05$ );团聚体流失量在 10~30 min 内趋于的稳定值在坡度 $2^{\circ}$ 条件下随雨强的增加无显著差异( $p > 0.05$ ),在坡度 $4^{\circ}$ 和 $6^{\circ}$ 条件下分别显著增加 1.58 倍和 3.74 倍( $p < 0.05$ )。

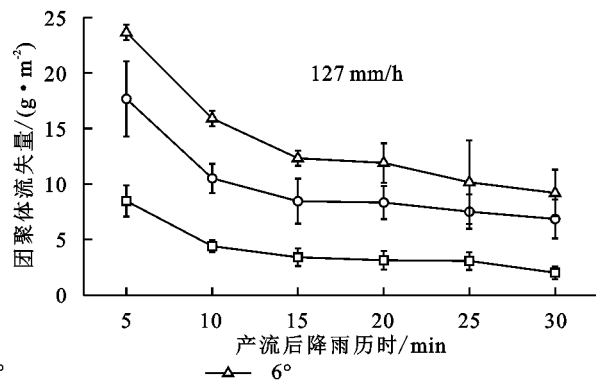


图 1 不同雨强及坡度下团聚体流失过程

此外,由图 2 可知,对于雨强 78 mm/h 条件下,当坡度由 $2^{\circ}$ 增加至 $6^{\circ}$ 时团聚体流失总量显著提高 0.70 倍( $p < 0.05$ ),团聚体流失总量在坡度 $4^{\circ}$ 时与坡度 $2^{\circ}$ 和 $6^{\circ}$ 时无显著差异( $p > 0.05$ ),但从整体来看,随坡度的增加团聚体流失总量呈增加的趋势;对于雨强 127 mm/h 条件下,当坡度由 $2^{\circ}$ 提高至 $4^{\circ}$ 时团聚体流失总量显著增加 1.42 倍( $p < 0.05$ ),当坡度由 $4^{\circ}$ 提高

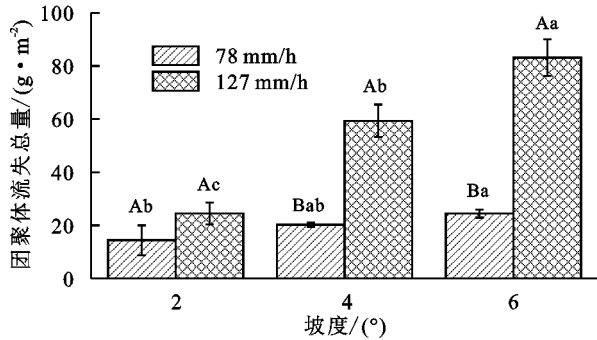
至 $6^{\circ}$ 时团聚体流失总量显著增加 0.40 倍( $p < 0.05$ )。相同坡度条件下,当雨强由 78 增加至 127 mm/h 时,在坡度 $2^{\circ}$ 条件下团聚体流失总量无显著变化( $p > 0.05$ ),但从整体来看团聚体流失总量增加 0.71 倍;在坡度 $4^{\circ}$ 和 $6^{\circ}$ 条件下团聚体流失总量分别显著增加 1.94, 2.41 倍( $p < 0.05$ ),这表明坡度越大,团聚体流失总量随雨强的增加幅度越大。

2.2 不同雨强和坡度下各粒径团聚体流失量

测定结果表明(表 1),该试验条件下粒径>5 mm 团聚体流失量为 0,各粒径团聚体中<0.053 mm 团聚体流失量最大,流失比例达到 68.27%~92.08%(见表 2)。相同雨强条件下,不同坡度之间粒径 5~1,0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失量有显著差异( $p<0.05$ )。对于雨强 78 mm/h 条件下,当坡度由 2°增加至 4°时粒径 5~1 mm 团聚体流失量减少 23.21%,而 0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失量分别增加 0.28 倍和 0.57 倍;当坡度由 4°增加至 6°时粒径 5~1,0.25~0.053 mm 团聚体流失量分别减少 79.07%,41.60%,而粒径<0.053 mm 团聚体流失量增加 0.37 倍。对于雨强 127 mm/h 条件下,当坡度由 2°增加至 4°时粒径 5~1,0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失量分别增加 0.94 倍、5.32 倍和 1.28 倍;当坡度由 4°增加至 6°时粒径 5~1,0.25~0.053 mm 团聚体流失量分别减少 89.47%,48.57%,而粒径<0.053 mm 团聚体流失量增加 0.65 倍。

对于坡度 2°条件下,当雨强由 78 提高至 127 mm/h 时各粒径团聚体流失量无明显变化( $p>0.05$ ),但从整体来看,粒径<0.053 mm 团聚体流

量增加 0.99 倍;对于坡度 4°条件下,随雨强的增加粒径 0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失量分别显著增加 4.12 倍和 1.87 倍( $p<0.05$ ),粒径 5~1,1~0.25 mm 团聚体流失量无显著差异( $p>0.05$ );对于坡度 6°条件下,随雨强的增加粒径 1~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失量分别显著增加 0.94 倍、3.51倍和 3.48 倍( $p<0.05$ ),粒径 5~1 mm 团聚体流失量无显著差异( $p>0.05$ )。以上研究表明团聚体的分选受雨强和坡度的综合影响,且不同雨强和坡度组合对团聚体分选的影响差异显著。



注:不同大写字母(A,B)表示相同坡度条件下不同雨强之间差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母(a,b)表示相同雨强条件下不同坡度之间差异显著( $p<0.05$ ),下同。

图 2 不同雨强及坡度下团聚体流失总量

表 1 不同雨强和坡度下各粒径团聚体流失量的测定结果

雨强/ (mm·h <sup>-1</sup> )	坡度/(°)	各粒径团聚体流失量/(g·m <sup>-2</sup> )			
		5~1 mm	1~0.25 mm	0.25~0.053 mm	<0.053 mm
78	2	1.12±0.35Aa	1.92±0.21Aa	1.07±0.11Aab	10.24±6.10Ab
	4	0.86±0.54Aab	1.83±0.43Aa	1.37±0.27Ba	16.12±1.30Bab
	6	0.18±0.07Ab	1.40±0.14Ba	0.80±0.07Bb	22.02±1.59Ba
127	2	1.27±0.43Aab	1.77±0.27Aa	1.11±0.25Ab	20.35±4.09Ac
	4	2.47±0.92Aa	3.52±1.18Aa	7.02±3.35Aa	46.31±9.49Ab
	6	0.26±0.19Ab	2.71±0.26Aa	3.61±0.40Aab	76.56±6.45Aa

注:不同大写字母(A,B)表示相同坡度条件下不同雨强之间差异显著( $p<0.05$ );不同小写字母(a,b)表示相同雨强条件下不同坡度之间差异显著( $p<0.05$ )。

2.3 不同雨强和坡度下流失团聚体特征参数

由图 3 可知,相同雨强条件下,当坡度由 2°增加至 6°时两组雨强下流失团聚体 MWD 分别显著降低 81.44%和 79.68%( $p<0.05$ ),从整体来看,随坡度的增加流失团聚体 MWD 呈减少的趋势。相同坡度条件下,两组雨强之间流失团聚体 MWD 无显著差异( $p<0.05$ ),但从整体来看,随雨强的增加流失团聚体 MWD 呈减小的趋势。

在雨强 78 mm/h 条件下,当坡度由 2°增加至 6°时流失团聚体  $D$  值显著增加 0.03 倍( $p<0.05$ ),在坡度 4°时流失团聚体  $D$  值与坡度 2°和 6°时无显著差异( $p>0.05$ ),但从整体来看,随坡度的增加流失团聚体  $D$  值呈增大的趋势;在雨强 127 mm/h 条件下,不同坡度之间流失团聚体

$D$  值无显著差异( $p>0.05$ )。相同坡度条件下,两组雨强之间流失团聚体  $D$  值无显著差异( $p>0.05$ )。

这表明随坡度的增加,流失团聚体的稳定性显著降低;随雨强的增加,流失团聚体的稳定性呈降低趋势但并不明显。

2.4 雨强和坡度对团聚体流失量的贡献率

本研究发现(表 2)降雨强度、坡度和降雨强度与坡度的交互作用对团聚体流失总量皆有极显著影响( $p<0.01$ ),贡献率分别为 52.44%,29.77%和 14.73%,其他影响因素的贡献率较小,这表明雨强是团聚体流失总量的主要影响因素。

雨强对各粒径团聚体流失量均有显著影响( $p<0.05$ ),对粒径 5~1,1~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm 团



团聚体流失量变化的贡献率分别为 9.79%,27.42%,28.09%和 47.09%。坡度对粒径 5~1,0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失量有显著影响( $p<0.05$ ),贡献率分别为 45.59%,21.89,33.46%。降雨强度与坡度的交互作用对粒径 0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失量有显著影响( $p<0.05$ ),贡献率分别为 16.26%和 13.90%。雨强是粒径 1~0.25,0.25~0.053,<0.053 mm 团聚体流失的主要影响因素,且贡献率随团聚体粒径减小而提高;而坡度是粒径 5~1 mm 团聚体流失的主要影响因素。

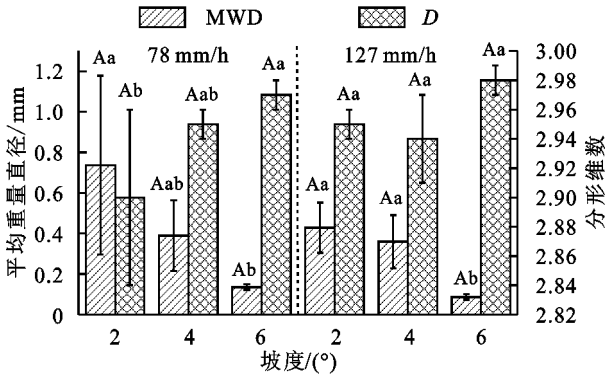


图 3 不同雨强及坡度下团聚体特征参数

表 2 各影响因子对团聚体流失量影响的显著性及贡献率

团聚体 粒径/mm	降雨强度		坡度		降雨强度×坡度		误差
	Sig	$P_F$	Sig	$P_F$	Sig	$P_F$	
5~1	0.046 *	9.79	0.004 *	45.59	0.064	12.52	35.10
1~0.25	0.01 *	27.42	0.099	11.80	0.072	15.06	45.72
0.25~0.053	0.004 **	28.09	0.021 *	21.89	0.038 *	16.26	33.76
<0.053	0.000 ***	47.09	0.000 **	33.46	0.000 **	13.90	5.55
总	0.000 ***	52.44	0.000 ***	29.77	0.000 ***	14.73	3.06

注:\*\*\*表示  $p<0.001$ ; \*\*表示  $p<0.01$ ; \*表示  $p<0.05$ 。

3 讨论

3.1 雨强和坡度对团聚体流失总量及特征参数的影响

在降雨初期由于雨滴的击溅分散作用将地表存在大量被剥蚀的团聚体供给于径流搬运,团聚体流失量在降雨初期达到最大值;随后由于土壤表层微小团聚体受水流影响进入土壤孔隙,临时形成结皮,减弱径流对土壤的冲刷、剥离作用<sup>[21]</sup>,同时坡面薄层径流的形成减弱了雨滴的击溅作用,导致地表松散沉积物减少,侵蚀物质补给能力减弱,团聚体流失量降低;随着降雨历时的延长,在雨滴扰动下径流的剥蚀能力与坡面抗蚀能力达到平衡,因此团聚体流失量变化趋于平稳<sup>[22]</sup>。

研究结果表明(见图 2)随坡度的提高,团聚体流失总量显著增加,与郝好鑫的研究结果相符<sup>[23]</sup>;随雨强的增加,在 4°和 6°时团聚体流失总量显著增加 1.94,2.41 倍,这表明坡度越大,团聚体流失总量随雨强的增加幅度越大<sup>[24]</sup>。但是在坡度 2°时,团聚体流失总量随雨强的增加变化并不显著,这是因为本试验为蓄满产流,坡面产流过程中有降雨填洼这一阶段<sup>[25]</sup>,同时由于低坡度时径流搬运能力较弱,部分团聚体在坡面低洼处沉积,导致在坡度 2°条件下团聚体流失总量随雨强增加并不显著。此外,雨强和坡度以及两者之间的交互作用对团聚体流失总量均有极显著影响( $p<0.01$ ),其中雨强对团聚体流失总量的影响程度最大,与周春红等<sup>[26]</sup>的研究结果相符。

本研究中(图 3),流失团聚体的稳定性随坡度的提高而降低,随雨强的提高呈降低趋势但并不明显,

与卢嘉等<sup>[9]</sup>研究结果有所不同。这是由于在降雨产流过程中,坡面始终存在积水层<sup>[25]</sup>,削弱了雨滴对水层下团聚体的打击分散作用<sup>[27]</sup>,导致雨强对流失团聚体稳定性的影响并不明显。

3.2 雨强和坡度对各粒径团聚体流失量的影响

雨强和坡度对各粒径团聚体流失量的影响有所不同(表 1)。本研究中,随坡度的增加,粒径 5~1 mm 团聚体在雨强 78 mm/h 时流失量显著减少,在雨强 127 mm/h 时流失量呈先增加后减少的趋势;粒径 0.25~0.053 mm 团聚体流失量在两组雨强下均随坡度的增加呈先增加后减少的趋势,但 Jia 等<sup>[8]</sup>指出各粒径团聚体流失量皆随雨强的提高而增加,与本文的研究结果有所不同。这是由于在雨强 127 mm/h 条件下,当坡度由 2°提高至 4°时径流搬运能力增强,粒径 5~1,0.25~0.053 mm 团聚体尚未被完全破碎就随径流流失,导致其流失量增加,而当坡度由 4°提高至 6°时,径流流速大幅提高的同时径流受雨滴的扰动作用,径流紊动性增加<sup>[28]</sup>,此时径流对团聚体的分离作用增强,粒径 5~1,0.25~0.053 mm 团聚体破碎为更小的粒径并随径流流失;而在雨强 78 mm/h 时径流量相对较小,径流层厚度较薄,对于大粒径团聚体搬运能力较弱<sup>[29]</sup>,部分粒径 5~1 mm 团聚体在坡面沉积;同时随着坡度的增加,在雨滴打击和径流分离的耦合作用下,粒径 5~1 mm 团聚体破碎程度提高,导致以该粒径流失的团聚体减少。

随雨强的增加,各坡度条件下小粒径团聚体流失量皆明显增加,安娟等<sup>[30]</sup>对于褐土坡耕地的研究也得出类

似结论,但本研究发现大粒径团聚体流失量仅在高坡度条件下明显增加,这与已有研究有所不同。这是由于在斜坡方向重力分力以及惯性的作用,大粒径团聚体在坡度较大的条件下更容易以滚动的形式被径流搬运<sup>[31]</sup>,此时雨强对大团聚体流失量的影响更为明显。

基于对不同雨强及坡度下各粒径团聚体流失量的方差分析可知(见表2),大粒径团聚体流失量对坡度变化的响应较为敏感,小粒径团聚体流失量对雨强变化的响应较为敏感。这是由于各粒径团聚体的输移方式不同导致的。张相等<sup>[32]</sup>指出较小粒径的团聚体以悬浮/跃移的形式搬运,而较大粒径的团聚体以滚动的形式搬运,团聚体的流失受控于水流剪切力、水流功率、径流层厚度、团聚体粒径等多种因素的影响。流失的小粒径团聚体主要来源于雨滴对坡面土壤团聚体的破碎分散,径流优先搬运破碎的小粒径团聚体,雨强可以通过改变雨滴打击能力影响团聚体的破碎程度,从而进一步影响小团聚体的流失量。大粒径团聚体由于沉降速度较快,当径流搬运能力较弱时易在坡面沉积<sup>[33]</sup>,坡度可以改变坡面薄层水流拖曳力,显著影响径流的搬运能力<sup>[28]</sup>,因此小粒径团聚体流失量对雨强变化的响应更为敏感,而大粒径团聚体流失量对坡度的变化响应更为敏感。

## 4 结论

(1) 相同雨强条件下,团聚体流失总量随坡度增加显著增加 0.70~1.42 倍( $p < 0.05$ );相同坡度条件下,团聚体流失总量随雨强增加在坡度 2°时无显著变化,在坡度 4°和 6°条件下分别显著增加 1.94, 2.41 倍( $p < 0.05$ ),这表明坡度越大,团聚体流失总量随雨强的增加幅度越大。雨强是团聚体流失总量的主要影响因子,贡献率为 52.44%。

(2) 相同坡度条件下,流失团聚体 MWD 随坡度增加显著减少( $p < 0.05$ ), $D$  值在仅雨强 78 mm/h 时随坡度增加显著增加( $p < 0.05$ );相同坡度条件下两组雨强之间流失团聚体 MWD, $D$  值无显著差异( $p > 0.05$ );这表明坡度的增加会降低流失团聚体稳定性,雨强对流失团聚体稳定性没有显著的影响。

(3) 粒径 5~1 mm 团聚体流失量在雨强 78 mm/h 时随坡度增加显著减少,在雨强 127 mm/h 时随坡度增加呈先增加后减少的趋势;粒径 0.25~0.053 mm 团聚体流失量在两组雨强下随坡度的增加呈先增加后减少的趋势。各坡度条件下小粒径团聚体流失量皆随雨强明显增加,大粒径团聚体流失量仅在高坡度条件下随雨强明显增加。

(4) 雨强是粒径 1~0.25, 0.25~0.053, <0.053

mm 团聚体流失的主要影响因素,贡献率分别为 27.42%, 28.09% 和 47.09%;坡度是粒径 5~1 mm 团聚体流失的主要影响因子,贡献率为 45.59%。这表明小粒径团聚体流失量对雨强变化的响应更为敏感,而大粒径团聚体流失量对坡度变化的响应更为敏感。

综上,本文研究结果在前人基础上进一步探讨雨强和坡度对黑土坡耕地团聚体流失特征的影响及影响程度,可为今后进一步研究黑土侵蚀退化和质量演变规律提供依据。

## 参考文献:

- [1] 朱家琪,满秀玲,张頔,等.大兴安岭北部针叶林土壤团聚体酶活性研究[J].森林工程,2020,36(4):1-11.
- [2] 王小云.土壤团聚体与土壤侵蚀关系研究进展[J].安徽农业科学,2016,44(23):106-108.
- [3] 安娟,卢嘉,郑粉莉,等.不同地表条件下黑土区坡耕地侵蚀过程中土壤团聚体迁移[J].水土保持学报,2011,25(6):100-104.
- [4] An J, Wu Y Z, Wu X Y, et al. Soil aggregate loss affected by raindrop impact and runoff under surface hydrologic conditions within contour ridge systems[J]. Soil & Tillage Research, 2021, 209: 104937. DOI: 10.1016/j.still.2021.104937.
- [5] Meyer L D, Line D E, Harmon W C. Size characteristics of sediment from agricultural soils[J]. Journal of Soil & Water Conservation, 1992, 47(1):107-111. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9437(1992)118:1(192).
- [6] Wairuri M, Lal R. Soil organic carbon in relation to cultivation and topsoil removal on sloping lands of Kolombangara, Solomon Islands[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 70(1):19-27. DOI:10.1016/S0167-1987(02)00116-2.
- [7] Xin Q, He J, Cai Q G, et al. Soil erosion and deposition characteristics of slope surfaces for two loess soils using indoor simulated rainfall experiment[J]. Soil & Tillage Research, 2020, 204: 104714. DOI: 10.1016/j.still.2020.104714.
- [8] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of North-east China[J]. Soil & Tillage Research, 2016, 161: 79-85. DOI:10.1016/j.still.2016.04.002.
- [9] 卢嘉,郑粉莉,安娟,等.降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J].生态学报,2016,36(8):2264-2273.
- [10] 曹丹妮,杜一凡,郝好鑫,等.人工模拟降雨条件下红壤团聚体流失特征研究[J].水土保持学报,2017,31(4):141-147.
- [11] Shi Z H, Fang N F, Wu F Z, et al. Soil erosion processes and sediment sorting associated with transport mechanisms on steep slopes[J]. Journal of Hydrology, 2012,

- 454/455(1):123-130.
- [12] 张怡,丁迎盈,王大安,等.坡度对侵蚀产沙及其粒径分布的影响[J].水土保持学报,2015,29(6):25-29.
- [13] 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.
- [14] 尹哲睿.黑龙江省拜泉县侵蚀沟分布的时空格局及影响因素研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2016.
- [15] 王计磊,李子忠.东北黑土区水力侵蚀研究进展[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):389-397.
- [16] 张瑜,徐子棋,杨献坤,等.吉林省山地丘陵区典型坡面水土保持措施适宜性研究[J].森林工程,2021,37(6):25-33,38.
- [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.
- [18] 朱伟峰,刘潇,李芳花,等.黑龙江省基于降雨的干旱时空分布及玉米灌溉需水规律研究[J].节水灌溉,2018(3):63-67,73.
- [19] 杨培岭,罗远培,石元春.用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J].科学通报,1993,38(20):1896-1899.
- [20] 曹晓娟,谢林好,张风宝,等.沙层特性对沙盖黄土坡面产流产沙变化贡献的定量分析[J].地理学报,2019,74(5):962-974.
- [21] 郑子成,秦凤,李廷轩.不同坡度下紫色土地表微地形变化及其对土壤侵蚀的影响[J].农业工程学报,2015,31(8):168-175.
- [22] 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.
- [23] 郝好鑫,郭忠录,王先舟,等.降雨和径流条件下红壤坡面细沟侵蚀过程[J].农业工程学报,2017,33(8):134-140.
- [24] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产流产沙特征[J].农业工程学报,2018,34(17):143-150.
- [25] 杨海,姜月华,周权平,等.太湖流域平原水文试验区降雨产流过程特征研究[J].河海大学学报:自然科学版,2021,49(6):506-514.
- [26] 周春红,张风宝,刘宝元,等.细沟间侵蚀影响因子交互作用定量分析[J/OL].土壤学报:1-11[2022-02-16].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20210101.1118.002.html>.
- [27] Gao B, Walter MT, Steenhuis TS, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: Theory and experiments[J]. Journal of Hydrology, 2004,295(1/4):291-304. DOI:10.1016/j.jhydrol.2004.03.026.
- [28] 张宽地,王光谦,孙晓敏,等.坡面薄层水流水动力学特性试验[J].农业工程学报,2014,30(15):182-189.
- [29] 朱秀迪.地表粗糙度对坡面侵蚀过程及泥沙分选搬运过程的影响[D].武汉:长江科学院,2017.
- [30] 安娟,陈新军,宋红丽.近地表水文条件对横坡垄作坡面褐土团聚体流失的影响[J].土壤学报,2020,57(6):1411-1421.
- [31] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(3):917-929. DOI:10.2136/sssaj2014.10.0415.
- [32] 张相,李肖,林杰,等.南方红壤丘陵区侵蚀沟道内土壤团聚体及有机碳特征[J].农业工程学报,2020,36(19):115-123.
- [33] 胡亚鲜, Nikolaus J K.利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J].土壤学报,2017,54(5):1115-1124.



(上接第 10 页)

- [46] 周玮,查同刚,孙怀宁,等.北京八达岭地区典型林分林地土壤抗蚀性分析[J].中国水土保持科学,2016,14(4):84-93.
- [47] 刘宽梅,周秋文.典型喀斯特森林土壤的抗蚀性[J].生态学报,2020,40(2):568-577.
- [48] 任改.重庆四面山主要植物群落土壤抗侵蚀性研究[D].北京:北京林业大学,2010.
- [49] 于大炮,刘明国,邓红兵,等.辽西地区林地土壤抗蚀性分析[J].生态学杂志,2003,22(5):10-14.
- [50] 陈翠翠.岷江上游山地森林/干旱河谷交错带坡面径流侵蚀研究[D].成都:四川农业大学,2010.
- [51] 丁海容,李勇,闫亮,等.汶川地震驱动的危害链对岷江上游输沙量的影响[J].成都理工大学学报:自然科学版,2013,40(6):712-720.
- [52] 田雨,方自力,谢强,等.岷江上游植被在汶川地震中的损毁及灾后恢复状况[J].长江流域资源与环境,2014,23(5):735-740.
- [53] 贾磊,姚顺波,邓元杰,等.渭河流域土壤侵蚀时空特征及其地理探测[J].生态与农村环境学报,2021,37(3):305-314.
- [54] 燕玲玲,巩杰,徐彩仙,等.子午岭地区土壤保持服务时空变化及其影响因素[J].水土保持学报,2021,35(1):188-197.
- [55] 常梦迪,王新军,李娜,等.基于 CSLE 模型的天山北坡中段山区水力侵蚀时空变化特征及影响因素研究[J].干旱区研究,2021,38(4):939-949.