

降雨强度和坡度对东北黑土区顺坡垄体溅蚀特征的影响

张兴义^{1,2}, 乔宝玲¹, 李健宇¹, 祁志³, 严月², 甄怀才¹, 胡伟^{2*}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所黑土区农业生态院重点实验室, 哈尔滨 150081; 3. 吉林农业大学资源与环境学院, 长春 130118)

摘要: 坡耕地溅蚀特征研究可揭示和反映溅蚀的发生和发展机理, 而以往研究大多在无垄作坡面进行, 较少涉及顺坡垄体。为此, 该研究基于野外人工模拟降雨试验, 设计3个降雨强度(30、60和90 mm/h)和2个坡度(3°、5°), 研究降雨强度和坡度对典型黑土(Mollisol)农田顺坡垄体溅蚀量、溅蚀过程和溅蚀分选特征的影响。研究表明: 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。当坡度由3°增大到5°时, 总溅蚀量增加30.52%~74.08%。当降雨强度为30和60 mm/h时, 总溅蚀率随降雨历时呈迅速减小-缓慢减小-波动稳定的趋势。当降雨强度为90 mm/h时, 总溅蚀率随降雨历时呈迅速增加-迅速减小-波动稳定的趋势。整体而言, 总溅蚀量随降雨强度和坡度的增加呈幂函数关系。各试验处理下, 溅蚀分选水稳性团聚体中均以<1 mm粒级的团聚体为主, 平均占总量的79.01%, 以0.5~1 mm粒级最多, 2~5 mm粒级最少, 分别占总量的32.94%和3.36%。30和60 mm/h降雨强度下, 分别为<0.25和<2 mm的各粒级团聚体在降雨后期达到波动稳定, 其中<0.25 mm的团聚体均呈迅速降低-缓慢降低-波动稳定的变化趋势。90 mm/h降雨强度下, 1~5和<0.25 mm各粒级团聚体均呈线性平稳变化, 其中<0.25 mm的团聚体呈线性减少趋势。研究可为东北黑土区水蚀防治提供科学依据。

关键词: 土壤; 团聚体; 侵蚀; 垄体; 溅蚀过程; 溅蚀分选特征; 东北黑土区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.014

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-16-0110-08

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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.014 http://www.tcsae.org

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 (Transactions of the CSAE), 2020, 36(16): 110-117. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.16.014 http://www.tcsae.org

0 引言

雨滴溅蚀作为降雨侵蚀发生的第一步, 是雨滴打击土壤表面, 破坏土壤结构, 分散和搬运土粒的过程^[1-3]。因此, 雨滴打击对溅蚀的发生和发展起关键作用。降雨是溅蚀发生的外营力, 尤以降雨强度的影响最为显著。众多研究表明^[4-6], 降雨强度越大溅蚀量越大。程金花等^[7]研究指出溅蚀量与降雨强度呈指数函数相关, 蔡强国等^[8]的试验结果表明溅蚀量与降雨动能呈幂函数相关。此外, 坡度作为重要的地形因子, 对雨滴分散和搬运起重要作用。张科利等^[9]研究认为土壤总溅蚀量跟坡度呈二次多项式函数, 而Fu等^[10]研究发现褐土总溅蚀量与坡度呈线性函数关系。通常情况下, 溅蚀受降雨和坡度的共同影响, 如吴普特等^[11]认为溅蚀量与降雨动能和雨强乘积及坡度呈幂函数相关。吴冰^[12]研究指出溅蚀量与降雨强

度和坡度呈幂函数相关。土壤作为雨滴打击的作用对象, 其结构的基本单元是土壤团聚体^[13]。降雨过程中, 雨滴打击作用首先对土壤表层团聚体进行拆分和破碎, 当团聚体粒级和质量达到一定的范围时, 雨滴的动能将足以使其运动, 进而产生迁移^[14]。溅蚀过程是对土壤颗粒的分选过程, 降雨动能决定了颗粒是作为土壤原始颗粒或团聚体被溅蚀搬运^[15]。因此, 溅蚀搬运过程中存在对迁移团聚体范围的优先选择性和对大粒级团聚体迁移的滞后性^[4,16], 其粒径分布特征反映了雨滴打击力与土壤抗蚀力的交互作用结果^[17]。

东北黑土区是中国重要的粮仓, 近年来该区水土流失加剧, 威胁着国家的粮食安全^[18]。该区降水多以暴雨形式集中在6—9月^[19], 坡耕地多以长缓坡为主^[20]。该区旱作农业长期采用机械起垄, 多为顺坡/斜坡垄作, 这种垄作方式塑造了一个垄台疏松、垄沟紧实的垄体结构^[21], 对降雨径流进行了再分配, 高比降(坡度>45°)的垄台在雨滴打击作用下极易产生径流, 为垄沟提供泥沙物质来源^[22], 影响了坡面侵蚀形态及特征。独特的气候、地形和垄作模式决定了该区易形成集中汇流造成严重的土壤侵蚀^[23]。农作物收获后到春播之前, 农田基本处于裸露状态, 极易发生土壤侵蚀。雨滴侵蚀作为坡耕地普遍存在的侵蚀形态, 占黑土坡面总侵蚀量的72.3%~96.2%^[24]。黑土富含有机质,

收稿日期: 2020-04-01 修订日期: 2020-07-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(41701313); 国家重点研发计划项目(2017YFC0504200)

作者简介: 张兴义, 博士, 研究员, 主要从事黑土生态研究。

Email: zhangxy@iga.ac.cn

*通信作者: 胡伟, 博士, 助理研究员, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。

Email: huwei@iga.ac.cn

其团聚体含量(>0.25 mm)高达 80%^[25],是有别与中国其他土壤的重要特征。周一杨等^[26]基于溅蚀盘研究发现,黑土溅蚀主要拆分为>1.0 mm 粒级团聚体,主要迁移<1.0 mm 粒级的团聚体。然而,目前多数学者对黑土溅蚀的研究集中在无垄作坡面,不能很好地反映该区垄作模式的真实规律,尤其是对垄台溅蚀特征的研究有所欠缺。此外,该区现有研究多注重侵蚀过程中的团聚体流失特征,关于溅蚀对团聚体的分选迁移过程鲜见报道,有待进一步加强。因此,本研究以顺坡农田垄体为研究对象,通过改进的溅蚀板收集溅蚀,分析降雨强度和坡度对垄体溅蚀特征及其分选特征的影响,以期深化溅蚀过程研究,为东北黑土区水土保持措施的布设提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验布设在中国科学院海伦水土保持监测研究站(47°21'16.95"N, 126°49'56.43"E),位于黑龙江省中部松嫩平原黑土地带,海拔为 226 m,坡度介于 3°~8°,主要土壤类型为黑土。气候类型属温带大陆性季风气候,冬季寒冷干燥,夏季高温多雨,雨热同期,降雨集中在 5—9 月份(88%),年均气温 1.5℃,年均降水量 530 mm,平均蒸发量 2 300 mm,平均风速 1.8 m/s,年均有效积温 2 450℃,无霜期 125 d^[27]。该区位于东北黑土区的中心,是中国大型商品粮基地,属于东北典型黑土区。土壤类型属于广义黑土范畴中的典型黑土^[19,28],在美国土壤分类中属于 Mollisol,土壤特点为分层明显,黑土层厚度约为 30 cm,具有很好的代表性和典型性。其中,耕层土壤主要理化性状详见表 1。

表 1 研究区土壤理化性状							
Table 1 Soil physical and chemical properties in study area							
土层 Soil layer /cm	容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	田间持 水量 Field moisture capacity/%	饱和含 水量 Saturation moisture content/%	砂粒 Sand /%	粉粒 Silt /%	黏粒 Clay /%	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)
0~20	1.13	34.9	44.2	31.6	30.8	37.6	42.1

1.2 试验装置与材料

降雨设备为侧喷式人工模拟降雨装置(中国科学院水利部水土保持研究所研制)。降雨高度为 7.5 m,降雨强度通过调节供水压力和降雨器孔板的孔径实现,变化范围为 30~165 mm/h^[29],降雨均匀度大于 85%。

野外实地考察结果和相关文献显示^[23,30],黑土顺坡垄作条件下垄高为 20 cm,垄间距为 70 cm,具有较好的典型性和代表性。据此,微小区规格实际为:长×宽=100 cm×70 cm。小区边沿采用钢板隔离,深入土层 30 cm,高出垄面 20 cm。

溅蚀板基于 Ellison 溅蚀板^[31]进行了改进,规格为:长×高=100 cm×70 cm,底部收集槽规格为:长×宽×高=100 cm×3.5 cm×3.5 cm。降雨前将溅蚀板分别置于垄台左右两侧,收集槽距离垄台 1 cm,距离垄沟 2 cm(图 1)。

1.3 试验设计与方法

詹敏等^[32]指出黑土区土壤流失是由短历时高强度降

雨所引起,且降雨持续时间一般不超过 1 h;张宪奎等^[33]指出黑土区中度侵蚀的雨强标准为 0.71 mm/min(42.6 mm/h),其中实测短历时瞬时雨强最大达 1.72 mm/min(103.2 mm/h)。中国暴雨统计参数图集^[34]中东北地区降雨重现期资料显示,多年平均最大 1 和 6 h 降雨量分别为 30 和 50~70 mm(平均为 60 mm),100 年一遇最大 1 h 降雨量为 80~100 mm(平均为 90 mm)^[35]。结合课题组降雨监测资料(最大 5 min 雨强, I₅), 30、60 和 90 mm/h 降雨强度在试验区均有出现,频率分别为 19.6%、5.4%和 4.7%。本研究中设计降雨强度为 30、60 和 90 mm/h。

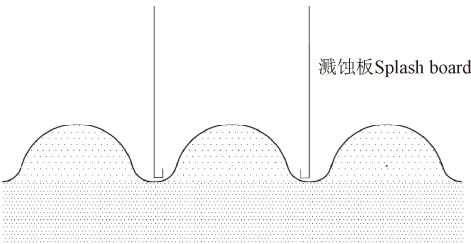


图 1 垄台溅蚀收集装置示意图
Fig.1 Schematic diagram of splash board of ridge body

根据东北典型黑土区长坡长、缓坡度的地形特点,水土流失严重区的地表坡度一般集中于 3°~5°农耕地上,个别地方可达 8°以上^[36]。3°是研究区农耕地的代表性坡度,5°是该区侵蚀严重农耕地的代表性坡度(中国科学院东北地理与农业生态研究所资料)。考虑到该区特殊的地形特征,故选择了 3°和 5°作为试验研究农耕地的坡度,每一个试验处理重复 3 次(表 2)。

表 2 试验设计			
Table 2 Design of experimental treatments			
坡度 Slope gradient/(°)	降雨强度 Rainfall intensity/(mm·h ⁻¹)	降雨历时 Rainfall duration /min	试验重复 次数 Replication
3	30	60	3
	60		
	90		
5	30	60	3
	60		
	90		

根据试验场地的实际情况,根据当地坡耕地人工起垄方式做顺坡垄,土壤容重控制在 1.00~1.10 g/cm³ 内。起垄完毕后,自沉降 48 h。正式降雨前一天,用纱网覆盖试验土槽,然后用 30 mm/h 雨强进行预降雨直至坡面产流为止,以保证试验前期土壤条件的一致性。预降雨结束后,为防止试验土槽土壤水分蒸发和减缓结皮形成,用塑料布覆盖试验土槽,静置 24 h 后正式降雨。

为了确保模拟降雨的均匀性和准确性,试验开始前对降雨强度进行率定,当降雨均匀度大于 85%,实测降雨强度与目标降雨强度的差值小于 5%时方可进行正式降雨。降雨开始后,左右两侧溅蚀泥沙样品需取全样,降雨强度为 30、60 和 90 mm/h 的取样间隔分别为 10、6 和 6 min。将采集的溅蚀泥沙样品进行湿筛分析,依次通

过孔径为 5、2、1、0.5 和 0.25 mm 的套筛, 将得到 6 个粒级团聚体 (>5、>2~5、>1~2、>0.5~1、0.25~0.5 和 <0.25 mm) 放入 105 °C 烘箱中烘 24 h 后称质量。

1.4 数据分析与处理

总溅蚀量为左右两侧溅蚀量之和。侧向溅蚀量为左右两侧溅蚀量之和的平均值。

采用 SPSS 21.0、SigmaPlot 12.5 和 Matlab R 2010b 进行数据处理与分析: 采用 SPSS 21.0 中单因素方差分析 (One-way ANOVA), 多重比较 (LSD) 和独立样本 *t* 检验, 进行显著性水平检验 ($P < 0.05$)。采用 SigmaPlot 12.5 绘图, 采用 Matlab R 2010b 中 Curve Fitting Tool 对总溅蚀率与降雨强度和坡度的关系进行拟合, 同时考虑方程的物理意义。

2 结果与分析

2.1 降雨强度和坡度对溅蚀量的影响

不同降雨强度和坡度对顺坡农田垄体溅蚀量的影响存在显著差异 (表 3, $P < 0.05$)。相同坡度下, 各溅蚀分量和总溅蚀量均随着降雨强度的增大而增加。当坡度为 3° 时, 降雨强度从 30 mm/h 增加到 90 mm/h 时, 各溅蚀分量和总溅蚀量分别显著增加 2.3~14.3 倍和 2.5~14.0 倍; 当坡度为 5° 时, 降雨强度从 30 mm/h 增加到 90 mm/h 时, 各溅蚀分量和总溅蚀量分别显著增加 3.6~21.6 倍和 3.7~17.9 倍。在相同降雨强度下, 各溅蚀分量和总溅蚀量均随着坡度的增大而增加。当坡度从 3° 增加到 5° 时, 各溅蚀分量和总溅蚀量分别显著增加 57.28%~94.26% 和 30.52%~74.08%。

通过对总溅蚀率和降雨强度及坡度进行多元回归分析, 得到以下方程

$$Es = 5.448 \times 10^{-6} I^{3.893} S^{0.978}, r^2 = 0.978, n = 18 (P < 0.000 1)$$

(1)

式中 Es 为总溅蚀率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$; I 为降雨强度, mm/h ; S 为坡度, ($^\circ$); n 为样本数。

由回归方程可知, 总溅蚀量与降雨强度和坡度呈二元幂函数关系。溅蚀量与二者均呈现显著正相关关系。由幂函数指数可知, 雨强的幂指数高于坡度的幂指数, 说明在

该试验条件下, 雨强对溅蚀量的影响大于坡度的影响。

表 3 不同降雨强度和坡度条件下溅蚀量

Table 3 Splash erosion under different rainfall intensity and slope gradient

降雨强度 Rainfall intensity/ (mm·h ⁻¹)	坡度 Slope gradient (°)	左侧溅蚀量 Left splash erosion (g·m ⁻²)	右侧溅蚀量 Right splash erosion (g·m ⁻²)	平均溅蚀量 Average splash erosion (g·m ⁻²)	总溅蚀量 Total splash erosion (g·m ⁻²)
30	3	2.99±0.34cB	3.39±0.24cA	3.19±0.29cB	6.39±0.57cB
	5	4.71±0.19cA	3.64±0.21bA	4.17±0.20cA	8.34±0.40cA
60	3	11.15±0.75bB	11.34±0.91bA	11.25±0.83bB	22.49±1.66bB
	5	21.66±2.26bA	17.49±9.96bA	19.58±3.85bA	39.15±7.69bA
90	3	44.06±2.58aB	51.97±4.54aB	48.02±3.56aB	96.03±7.12aB
	5	75.72±11.48aA	82.1±9.36aA	78.91±10.42aA	157.82±20.83aA

注: 相同坡度下数值后不同小写字母表示各指标在不同降雨强度处理间差异显著 ($P < 0.05$), 相同降雨强度下数值后大写字母表示各指标在 3° 和 5° 处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Note: Different lowercase letters at the same slope gradient indicate a difference of significance at the $P < 0.05$ among different rainfall intensity treatments. Different capital letters at the same rainfall intensity indicate a difference of significance at the $P < 0.05$ between 3° and 5° treatments.

2.2 降雨强度和坡度对溅蚀过程的影响

不同降雨强度下, 总溅蚀率随降雨历时的变化过程存在差异, 而不同坡度下, 总溅蚀率随降雨历时的变化过程相似 (图 2)。当降雨强度为 30 和 60 mm/h 时, 总溅蚀率随降雨历时呈迅速减小-缓慢减小-波动稳定的趋势; 而当降雨强度为 90 mm/h 时, 溅蚀率随降雨历时呈迅速增加-迅速减小-波动稳定的趋势。例如 30 mm/h 降雨强度及 3° 坡度下, 前 20 min 溅蚀率迅速降低, 从 10 min 的 14.43 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降低到 20 min 的 6.31 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 20 min 之后溅蚀率在 4.47 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 上下波动。在 60 mm/h 降雨强度下 5° 坡度下, 前 24 min 溅蚀率迅速降低, 从 6 min 的 68.82 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降低到 24 min 的 22.55 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 之后呈稳定波动变化。而 90 mm/h 降雨强度及 5° 坡度下, 前 12 min 溅蚀率迅速增加, 在 12 min 时达到峰值 213.96 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 在 12~30 min 溅蚀率由 159.89 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 降低为 64.96 $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$, 之后趋于波动稳定。

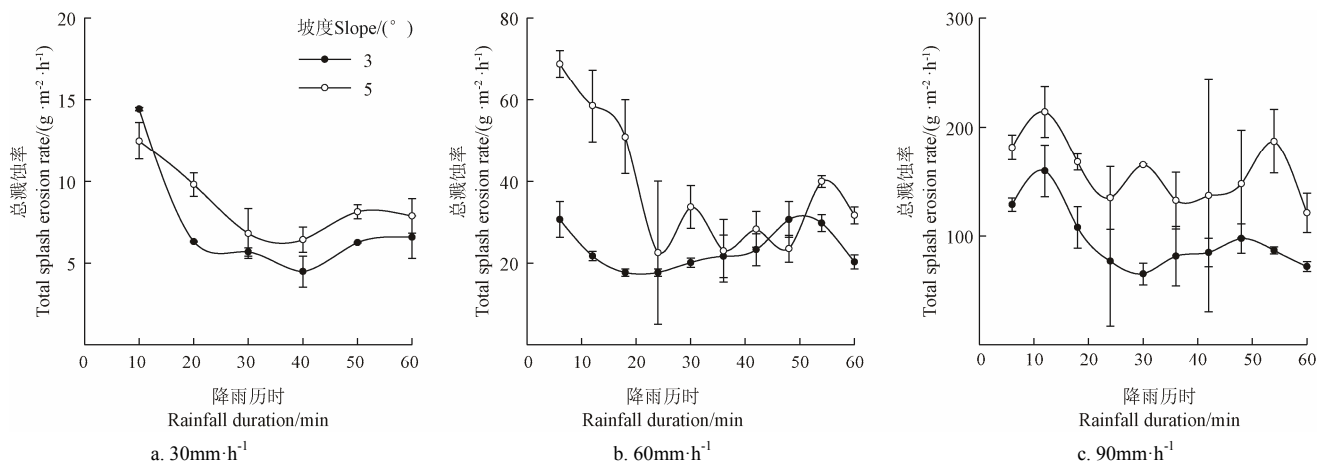


图 2 不同降雨强度下总溅蚀率随降雨历时的变化

Fig.2 Temporal variation of total splash erosion rates under different rainfall intensity

2.3 溅蚀对水稳性团聚体的分选特征

溅蚀分选搬运不同粒级团聚体的比例在不同降雨强

度和坡度下的规律基本相似 (表 4, $P < 0.05$), >5 mm 粒级的团聚体未发生迁移, 溅蚀主要搬运 <1 mm 粒级的团聚

体，占总量的 75.13%~87.73%（平均为 79.01%），其中以 0.5~1 mm 粒级最多，<0.25 mm 粒级次之，>2~5 mm 粒级最少，分别平均占总量的 32.94%，23.27%和 3.36%。溅蚀对水稳性团聚体的分选特征受降雨强度影响明显，而受坡度影响不明显（表 4）。当降雨强度为 30 mm/h 时，溅蚀搬运<0.25 mm 粒级的团聚体最多，平均占总量的 29.61%，当降雨强度为 60 和 90 mm/h 时，溅蚀主要搬运>0.5~1 mm 粒级的团聚体，分别占总量的 27.14%和 44.78%。随着降雨强度的增加，>1~2 mm 和<0.25 mm 粒级的团聚体分别平均减少了 25.23%和 32.11%，而>0.5~1 和 0.25~0.5 mm 粒级的团聚体分别平均增加了 33.70%和 23.31%。

表 4 不同降雨强度和坡度条件下溅蚀分选团聚体特征
Table 4 Selective characteristics of water stable aggregates during splash erosion under different rainfall intensity and slope gradient

降雨强度 Rainfall intensity (mm·h ⁻¹)	坡度 Slope gradient (°)	水稳性团聚体比例 Proportion of water stable aggregates/%				
		>2~ 5 mm	>1~2 mm	>0.5~ 1 mm	0.25~0.5 mm	<0.25 mm
30	3	-	22.66aA	28.97bA	24.82aA	23.55aA
	5	5.12abD	19.75aB	24.82bBC	14.65aC	35.66aA
60	3	4.22aB	19.53abAB	26.76bA	24.45aA	25.04aA
	5	7.61aA	16.20aA	27.51bA	26.95aA	21.73bA
90	3	1.08aE	11.19bD	43.74aA	25.22aB	18.77aC
	5	2.11bD	16.50aC	45.82aA	20.72aB	14.85bC

注：同一列数值后小写字母表示相同粒径团聚体在同一坡度不同降雨强度处理间差异显著（ $P < 0.05$ ），同一行数值后不同大写字母表示同一处理下各粒径团聚体间差异显著（ $P < 0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate a difference of significance at the $P < 0.05$ among different rainfall intensity treatments under the same slope gradient. Different capital letters in the same row indicate a difference of significance at the $P < 0.05$ among different proportion of water stable aggregates.

2.4 溅蚀对各粒级水稳性团聚体的分选过程

溅蚀对各粒级水稳性团聚体的分选过程在不同降雨强度下差异明显，而在不同坡度下变化规律相似（图 3）。30 mm/h 降雨强度下，随降雨历时增加，>1~2、>0.5~1 和 0.25~0.5 mm 粒级的团聚体呈波动变化，波动幅度分别为 10.28%~40.11%、5.29%~40.33%和 8.20%~52.59%；而<0.25 mm 粒级的团聚体呈迅速降低-缓慢降低-波动稳定趋势。60 mm/h 降雨强度下，随降雨历时增加，>2~5 mm 粒级的团聚体比例呈波动变化，波动幅度为 0%~16.65%，而其他粒级的团聚体均在降雨中后期达到波动稳定阶段，其>1~2、>0.5~1 和 0.25~0.5 mm 粒级的团聚体分别呈迅速减少-波动稳定，迅速增加-波动稳定，迅速增加-迅速减少-波动稳定的趋势，<0.25 mm 粒级的团聚体比例呈迅速降低-缓慢降低-波动稳定趋势。90 mm/h 降雨强度下，随降雨历时增加，>2~5、>1~2 和<0.25 mm 粒级的团聚体比例呈线性平稳变化，而>0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 粒级的团聚体比例呈波动变化，变动幅度分别为 35.33%~51.30%和 17.09%~29.52%。因此，随着降雨强度的增加，溅蚀搬运团聚体比例达到稳定的时间越早，在稳定期的变化幅度逐渐减弱。以<0.25 mm 粒级的微团聚体为例，在雨强为 60 mm/h 坡度为 5°条件下，微团聚体比例在前 12 min 从 44.97%迅速降低到 20.88%，在 12~24 min 呈缓慢降低阶段，微团聚体比例从 20.88%降低到 12.39%，之后在 21.73%上下波动。当坡度为 5°时，雨强从 30 mm/h 增加到 90 mm/h 时，溅蚀搬运微团聚体比例达到稳定的时间从 40 min 提早到 18 min。

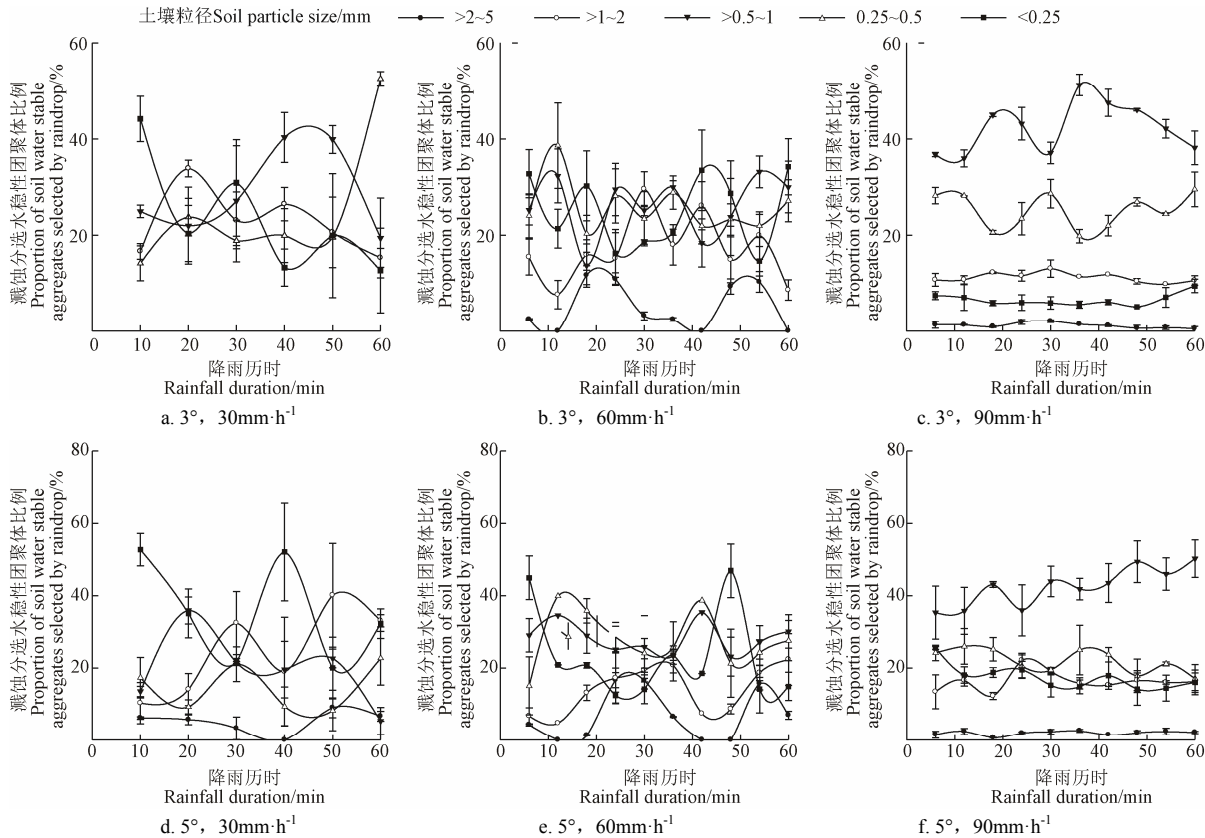


图 3 不同降雨强度和坡度条件下溅蚀分选过程

Fig.3 Selective processes of splash erosion under different rainfall intensity and slope gradient

3 讨论

3.1 降雨强度和坡度对溅蚀特征的影响

以往研究表明, 消散作用和黏粒膨胀作用是黑土团聚体在降雨过程中破碎的主要机制^[13]。本研究中, 黑土为湿润状态, 团聚体的消散作用和自身粘结力减弱, 其破碎过程主要受雨滴打击的机械破坏作用影响^[37]。随着降雨强度的增加, 总溅蚀量显著增加了 2.5~17.9 倍。这与安娟^[24]的研究结论相似, 雨滴打击地表产生的冲击力是黑土坡耕地发生溅蚀的直接动力。与无垄作坡面相比^[10], 在雨滴溅蚀过程中, 雨滴打击力主要作用于垄台, 其侧向剪切分力起主导作用^[9,11]。随着降雨强度的增加, 雨滴的打击力增强, 其分离土壤颗粒的能力增大, 产生更多的松散颗粒物质供溅蚀搬运^[7,38]。因此, 在农耕休闲期应加强地表覆盖消除雨滴打击。坡度对溅蚀影响也较为明显, 本研究中总溅蚀量随着坡度的增大增加了 30.52%~74.08%。调查资料^[23,29]显示黑土顺坡垄体的垄台坡度大于 45°, 明显高于垄体自身的坡度。随着坡度的增加, 垄台倾斜度增加, 垄台斜面土壤在重力作用下粘结力减弱, 坡面物质稳定性降低^[39], 加之雨滴侧向剪切分力增加, 致使土壤抗溅蚀分散能力减弱, 溅蚀搬运量增大^[8]。以往的研究指出总溅蚀量与降雨强度呈幂函数或者指数函数正相关^[4,7,8], 而溅蚀与坡度呈二次多项式函数^[9]或线性函数^[10,40]。本研究中溅蚀量与降雨强度和坡度呈二元幂函数正相关, 雨强对溅蚀量的影响大于坡度, 这与吴普特等^[11]和吴冰^[12]的研究结论相似。

总溅蚀率随降雨历时的变化过程在不同降雨强度下差异明显。在 30 和 60 mm/h 雨强下, 总溅蚀率呈迅速减小-缓慢减小-波动稳定的趋势。可能的原因是, 降雨初期, 在较弱的雨滴打击作用下, 溅蚀优先搬运垄体表面较多的松散颗粒, 随着可被搬运的松散土粒的减少, 溅蚀率迅速降低^[41]。随着降雨的继续, 雨滴打击作用下垄台表面形成临时性结皮层^[42], 部分填洼处出现水层, 在一定程度上阻碍了溅蚀的搬运, 溅蚀率缓慢减小并趋于波动稳定的趋势。在 90 mm/h 雨强下, 溅蚀率呈迅速增加-迅速减小-波动稳定的趋势。可能的原因是, 较大雨强下, 降雨初期大部分雨滴能量用于分散破坏土壤团聚体, 分配给溅蚀搬运物质的能量较少; 随土壤含水率的增加, 土壤抗蚀性降低, 土壤结构破坏严重, 垄体松散物质增多, 溅蚀搬运量增加; 降雨后期, 雨滴打击作用下部分地表形成临时结皮, 同时填洼处水层厚度增加, 可供溅蚀搬运的土粒减少, 导致溅蚀率呈逐渐下降并趋于波动稳定的趋势^[43]。

3.2 溅蚀对水稳性团聚体的分选作用

黑土团聚体含量高^[25], 未降雨前, 黑土表面基本上都为大团聚体。降雨过程中, 雨滴打击、径流搬运和团聚体稳定机制共同决定了溅蚀对黑土坡面团聚体的分选特征^[13,44]。溅蚀搬运的颗粒物质一部分来源于坡面已有的松散物, 另一部分来源于新破碎的大团聚体^[44-45]。本研究中, 不同降雨强度和坡度下溅蚀主要搬运<1 mm 粒级的团聚体, 这与周一杨等^[26]对黑土溅蚀的研究结果一致,

雨滴溅蚀主要分散拆分>1 mm 粒级的团聚体。可能原因是溅蚀优先选择搬运细颗粒泥沙, 而对大颗粒泥沙的搬运具有滞后性^[45]。随着降雨强度的增加, 溅蚀搬运最多的团聚体粒级由<0.25 mm 变为>0.5~1 mm, 且粒级为>0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 的团聚体比例增加, 而粒级为>1~2 mm 和<0.25 mm 的团聚体比例减少。可能的原因是较小雨强(30 mm/h)下, 雨滴能量不足以破坏较大的团聚体并使其发生迁移^[7], 溅蚀搬运最多的是内聚力大且不易发生破碎的微团聚体^[7]。当雨强增大到 60 和 90 mm/h 时, 一方面雨滴具有足够的能量搬运本身质量较大的大粒级团聚体^[16], 另一方面雨滴打击力增强, 致使垄体表面内聚力相对较小的大粒级团聚体发生破碎^[5], 较强的径流搬运能力使得不易发生击溅的>1 mm 粒级团聚体被径流搬运, 相应的<1 mm 粒级的团聚体优先被溅蚀搬运^[44-45]。

降雨强度不同, 雨滴打击和径流的选择搬运作用不同^[7,16,46]。本研究中, 不同降雨强度下, 随降雨历时呈波动变化的团聚体粒级大小不同; 降雨强度的增加加速了溅蚀搬运团聚体达到稳定的时间, 并减弱了其在稳定期的变化幅度。可能的原因是, 小雨强(30 mm/h)下, 雨滴能量不能够完全破坏大团聚体^[26], 加之径流搬运能力相对较弱^[7], 故 0.25~1 mm 各粒级的团聚体呈大幅波动变化趋势。当雨强增大到 60 mm/h 时, 尽管雨滴能量增加, 雨滴打击作用仍不能完全破坏>2~5 mm 粒级的团聚体; 但径流能量的增加, 促使溅蚀搬运<2 mm 各粒级的团聚体达到稳定的时间相对提前。当雨强增大到 90 mm/h 时, 雨滴打击和径流搬运能力增强, 受选择性搬运的影响,>0.5~1 mm 和 0.25~0.5 mm 粒级团聚体呈波动变化, 而其他粒级的团聚体呈现相对平稳的变化, 其内在机理有待进一步深入研究。微团聚体(<0.25 mm)在不同降雨强度下均呈现降低-稳定趋势, 可能的原因是, 降雨初期, 垄面存在大量松散物质可供溅蚀搬运^[41]; 随着降雨的进行, 雨滴分散作用产生的微团聚体被径流优先搬运^[7], 致使垄面存有较多的未经分选破碎的大粒级团聚体^[13], 供溅蚀搬运的微团聚体来源减少; 降雨后期, 雨滴打击作用和径流的搬运能力达到一个相对稳定状态^[4,16]。综上所述, 雨滴打击和径流搬运对黑土不同粒级团聚体的分离和搬运有显著影响, 有待进一步深入研究。

4 结论

1) 总溅蚀量和侧向溅蚀量均随降雨强度及坡度的增大而增大, 其中降雨强度对溅蚀量的影响显著大于坡度。在相同坡度下, 当降雨强度由 30 mm/h 增加到 60、90 mm/h 时, 总溅蚀量增加 2.5~17.9 倍。在相同降雨强度下, 当坡度由 3°增大到 5°时, 总溅蚀量显著增加 30.52%~74.08%。

2) 当降雨强度为 30 和 60 mm/h 时, 总溅蚀率随降雨历时呈迅速减小-缓慢减小-波动稳定的趋势。当降雨强度为 90 mm/h 时, 总溅蚀率随降雨历时呈迅速增加-迅速减小-波动稳定的趋势。总溅蚀量与降雨强度和坡度呈幂函数关系。

3) 溅蚀分选团聚体中均以<1 mm 粒级的团聚体为

主, 占总量的 79.01%, 其中以 $>0.5\sim 1\text{ mm}$ 粒级最多, $<0.25\text{ mm}$ 粒级次之, $>2\sim 5\text{ mm}$ 粒级最少, 分别占总量的 32.94%, 23.27%和 3.36%, 而 $>5\text{ mm}$ 粒级的团聚体未发生迁移。随着降雨强度的增加, $>1\sim 2$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 粒级的团聚体分别平均减少了 25.23%和 32.11%, 而 $>0.5\sim 1\text{ mm}$ 和 $0.25\sim 0.5\text{ mm}$ 粒级的团聚体分别平均增加了 33.70%和 23.31%。

4) 溅蚀对各粒级水稳性团聚体的分选过程在不同降雨强度下差异明显, 30 mm/h 和 60 mm/h 降雨强度下, 分别为 <0.25 和 $<2\text{ mm}$ 的各粒级团聚体在降雨后期达到波动稳定, 其中 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体均呈迅速降低-缓慢降低-波动稳定的变化趋势。而 90 mm/h 降雨强度下, $1\sim 5$ 和 $<0.25\text{ mm}$ 各粒级团聚体均呈线性平稳变化, 其中 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体呈线性减少趋势。随着降雨强度的增加, 溅蚀搬运团聚体比例达到稳定的时间越早, 在稳定期的变化幅度逐渐减弱。

[参 考 文 献]

- [1] Ellison W D. Soil erosion study-Part II: Soil detachment hazard by raindrop splash[J]. *Agricultural Engineering*, 1947, 28: 197-201.
- [2] Ellison W D. Soil erosion study-Part V: Soil transport in the splash process[J]. *Agricultural Engineering*, 1947, 28: 349-351, 353.
- [3] 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 Fenli, Gao Xuetian. Research processes in hillslope soil erosion processes[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(2): 230-235. (in Chinese with English abstract)
- [4] 李叶鑫, 吕刚, 傅昕阳, 等. 降雨特性和坡度对辽西低山丘陵区坡耕地褐土溅蚀的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(4): 37-43.
Li Yexin, Lü Gang, Fu Xinyang, 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. (in Chinese with English abstract)
- [5] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion[J]. *Catena*, 2020, 185: 104342.
- [6] Liu T, Luo J, Zhang Z C, et al. Effects of rainfall intensity on splash erosion and its spatial distribution under maize canopy[J]. *Natural Hazards*, 2016, 84: 233-247.
- [7] 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 Jinhua, Qin Yue, Zhang Hongjiang, 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. (in Chinese with English abstract)
- [8] 蔡强国, 陈浩. 降雨特性对溅蚀影响的初步试验研究[J]. *中国水土保持*, 1986 (6): 32-35, 41.
- [9] 张科利, 细山田健三. 坡面溅蚀发生过程及其与坡度关系的模拟研究[J]. *地理科学*, 1998, 18(6): 561-566.
Zhang Keli, Hosoyamada K. Splash erosion process and its relation to slope gradient[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1998, 18(6): 561-566. (in Chinese with English abstract)
- [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: 29-34.
- [11] 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 Pute, Zhou Peihua. The effect of land slope upon raindrop splash erosion[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1991, 11(3): 8-13, 28. (in Chinese with English abstract)
- [12] 吴冰. 黄土坡面片蚀动力学过程试验研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2018.
Wu Bing. Experimental Study on Dynamic Process of Sheet Erosion on Loess Hillslope[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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.
Lu Jia, Zheng Fenli, An Juan, et al. An experimental study of Mollisol aggregate loss characteristics during rainfall erosion processes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(8): 2264-2273. (in Chinese with English abstract)
- [14] Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y, et al. Splash distance and size distributions for various soils[J]. *Geoderma*, 2005, 124: 279-292.
- [15] 申艳, 张晓平, 梁爱珍, 等. 黑土坡耕地土壤流失形态分析—以一次降雨为例[J]. *干旱地区农业研究*, 2008, 26(6): 224-229.
Shen Yan, Zhang Xiaoping, Liang Aizhen, et al. Study on properties of soil loss from sloping farmland of black soil based on a runoff event[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(6): 224-229. (in Chinese with English abstract)
- [16] Mahmoodabadi M, Sajjadi S A. Effects of rain intensity, slope gradient and particle size distribution on the relative contributions of splash and wash loads to rain-induced erosion[J]. *Geomorphology*, 2016, 253: 159-167.
- [17] Kinnell P I A. Raindrop-induced saltation and the enrichment of sediment discharged from sheet and interrill erosion areas[J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26: 1449-1456.
- [18] 刘宝元, 阎百兴, 沈波, 等. 东北黑土区农地水土流失现状与综合治理对策[J]. *中国水土保持科学*, 2008, 6(1): 1-8.
Liu Baoyuan, Yan Baixing, Shen Bo, et al. Current status and comprehensive control strategies of soil erosion for cultivated land in the Northeastern black soil area of China[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2008, 6(1): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [19] 范昊明, 蔡强国, 王红闪. 中国东北黑土区土壤侵蚀环境[J]. *水土保持学报*, 2004, 18(2): 66-70.
Fan Haoming, Cai Qiangguo, Wang Hongshan. Condition of soil erosion in phaeozem region of northeast china[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(2): 66-70. (in Chinese with English abstract)
- [20] 郑粉莉, 张加琼, 刘刚, 等. 东北黑土区坡耕地土壤侵蚀特征与多营力复合侵蚀的研究重点[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 314-319.
Zheng Fenli, Zhang Jiaqiong, Liu Gang, et al. Characteristics

- of soil erosion on sloping farmlands and key files for studying compound soil erosion caused by multi-forces in Mollisol region of Northeast China[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(4): 314-319. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张天宇. 垄作耕地浅沟深度的测量和换算[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(5): 138-144.
Zhang Tianyu. Measurement and calibration of ephemeral gully depth in ridge-tillage cropland[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(5): 138-144. (in Chinese with English abstract)
- [22] 宋玥, 张忠学. 不同耕作措施对黑土坡耕地土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2011, 18(2): 14-16, 25.
Song Yue, Zhang Zhongxue. The effect of different tillage measures on soil erosion in slope farmland in black soil region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(2): 14-16, 25. (in Chinese with English abstract)
- [23] 王磊, 师宏强, 刘刚, 等. 黑土区宽垄和窄垄耕作的顺坡坡面土壤侵蚀对比[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 176-182.
Wang Lei, Shi Hongqiang, Liu Gang, et al. Comparison of soil erosion between wide and narrow longitudinal ridge tillage in black soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(19): 176-182. (in Chinese with English abstract)
- [24] 安娟. 东北黑土区土壤侵蚀过程机理和土壤养分迁移研究[D]. 北京: 中国科学院, 2012.
An Juan. Processes and Mechanisms of Soil Erosion and Nutrient Transportation in the Black Soil Region of Northeast China[D]. Beijing: Chinese Academy of Sciences, 2018. (in Chinese with English abstract)
- [25] Sun T, Chen Q, Chen Y, et al. A novel soil wetting technique for measuring wet stable aggregates[J]. *Soil & Tillage Research*, 2014, 141: 19-24.
- [26] 周一杨, 王恩姮, 陈祥伟. 不同开垦年限黑土溅蚀与团聚体分选特征[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2411-2416.
Zhou Yiyang, Wang Enheng, Chen Xiangwei. Splash erosion of black soil with different reclamation years and its relations to soil aggregates selective characteristics[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(10): 2411-2416. (in Chinese with English abstract)
- [27] 胡伟, 张兴义, 严月. 不同土地利用方式下冻融期黑土水热过程观测研究[J]. *土壤与作物*, 2018, 7(3): 312-323.
Hu Wei, Zhang Xingyi, Yan Yue. Dynamics of soil water and soil temperature during freezing and thawing period under different types of land use in Mollisols[J]. *Soils and Crops*, 2018, 7(3): 312-323. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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 Baixing, Yang Yuhong, Liu Xingtu, 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. (in Chinese with English abstract)
- [29] 陈文亮. 组合侧喷式野外人工模拟降雨装置[J]. *水土保持通报*, 1984, 4(5): 43-47.
Chen Wenliang. Combination of field artificial rainfall simulation devices[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1984, 4(5): 43-47. (in Chinese with English abstract)
- [30] 赵玉明, 刘宝元, 姜洪涛. 东北黑土区垄向的分布及其对土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(5): 1-6.
Zhao Yuming, Liu Baoyuan, Jiang Hongtao. Distribution of tillage-induced direction and its effect on soil erosion in black soil area of Northeast China[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(5): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [31] Fernandez-Raga M, Palencia C, Keesstra S, et al. Splash erosion: A review with unanswered questions[J]. *Earth-Science Reviews*, 2017, 171: 463-477.
- [32] 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 Min, Li Zhancai, Xin Yulin. On the relationship between precipitation parameter and soil erosion[J]. *Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College*, 1998, (1): 40-43. (in Chinese with English abstract)
- [33] 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): 9-18.
Zhang Xiankui, Xu Jinghua, Lu Xiuqin, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang province[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1992, 12(4): 9-18. (in Chinese with English abstract)
- [34] 水利部水文局, 南京水利科学研究院. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- [35] Liu Y X, Xin Y, Xie Y, et al. Effects of slope and rainfall intensity on runoff and soil erosion from furrow diking under simulated rainfall[J]. *Catena*, 2019, 177: 92-100.
- [36] 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 Xiaoping, Liang Aizhen, Shen Yan, et al. Erosion characteristics of black soils in Northeast China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2006, 26(6): 687-692. (in Chinese with English abstract)
- [37] 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: 1329-1340.
- [38] Michał B, Magdalena R, Agata S, et al. The mass ratio of splashed particles during raindrop splash phenomenon on soil surface[J]. *Geoderma*, 2019, 347: 40-48.
- [39] 沈海鸥, 肖培青, 李洪丽, 等. 黑土坡面不同粒级泥沙流失特征分析[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(20): 111-117.
Shen Haiou, Xiao Peiqing, Li Hongli, et al. Analysis of sediment particle loss at different gradations on Mollisol hillslopes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(20): 111-117. (in Chinese with English abstract)
- [40] 郭维敏, 李晓丽, 王文, 等. 坡度对紫红色砒砂岩击溅侵蚀的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2019, 17(1): 1-9.
Guo Luomin, Li Xiaoli, Wang Wen, et al. Influence of slope on the splash erosion of mauve Pisha-sandstone in bare areas[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2019, 17(1): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [41] 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.

- 29-33. (in Chinese with English abstract)
- [42] 程琴娟, 蔡强国. 我国水土流失典型区土壤溅蚀特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(1): 17-21.
Cheng Qinjuan, Cai Qiangguo. Splash erosion by raindrops in typical soil and water loss region of China[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(1): 17-21. (in Chinese with English abstract)
- [43] 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 Wei, Zheng Fenli, Bian Feng. 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. (in Chinese with English abstract)
- [44] Ramos M C, Nacci S, Pla I. Effect of raindrop impact and its relationship with aggregate stability to different disaggregation forces[J]. Catena, 2003, 53(4): 365-376.
- [45] 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.
Fu Yu, Li Guanglu, Zheng Tenghui, et al. Effects of raindrop splash on aggregate particle size distribution of soil plough layer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(3): 155-160. (in Chinese with English abstract)
- [46] Chang A, Yang P L, Zeng W Z, et al. Impact of raindrop diameter and polyacrylamide application on runoff, soil and nitrogen loss via raindrop splashing[J]. Geoderma, 2019, 353.

Effects of rainfall intensity and slope on splash erosion characteristics of downslope ridge on farmland in black soil areas of Northeast China

Zhang Xingyi^{1,2}, Qiao Baoling¹, Li Jianyu¹, Qi Zhi³, Yan Yue², Zhen Huaicai¹, Hu Wei^{2*}

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Key Laboratory of Mollisols Agroecology, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Harbin 150081, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Splash erosion is the initial stage of soil erosion by water, particularly an important process of hillslope erosion. The main cause of splash erosion can be resulted from the destructive force of rain drops, when acting on soil surface aggregates. As such, the splash erosion strongly depends on the rainfall intensity and slope gradient. Most previous studies focused on the characteristics of splash erosion, and dominated affecting factors, in order to reveal the specific mechanism of splash erosion. Moreover, most current studies on splash erosion were usually conducted on non-ridge slope in the farmland. However, little information is available on the up-down ridged slope, especially for the distribution of soil water stable aggregates during splash erosion process in the typical black soil region of Northeast China. Therefore, in this study, an in-situ field simulated rainfall experiment was conducted to investigate the effects of rainfall intensity and slope gradient on the characteristics of splash erosion, and the distribution of soil water stable aggregates in the process of splash erosion. Three rainfall intensities (30, 60, 90 mm/h) of representative erosive rainfall, and two slope gradients (5° and 10°) were set, where all treatments were replicated three times. The soil in this experiment was a Mollisol (USDA System of Soil Taxonomy), with 31.6% sand (> 50 μm), 30.8% silt (50 to 2 μm), and 37.6% clay (< 2 μm). The field study was conducted in the Hailun Monitoring and Research Station of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences (47°21'16.95"N, 126°49'56.43"E), located at the Hailun city, Heilongjiang Province, the center of the typical Mollisols zone in Northeast China. An up-down ridge system was used, where the ridged interval on the farmland was 70 cm, and the vertical height difference between ridge and furrow was 20 cm. In addition, the splash board was applied to measure splash erosion. The results showed that the total splash erosion increased by 2.5 to 17.9 times, as the rainfall intensity increased from 30 mm/h to 90 mm/h, whereas, the total splash erosion significantly increased by 30.65% to 64.34% ($P < 0.05$), as the slope gradient increased from 3° to 5°. The relationship between splash erosion with rainfall intensity and slope gradient can be expressed as a power function. Besides, at the rainfall intensities of 30 mm/h and 60mm/h, the splash erosion rate first rapidly decreased, then gradually decreased, and finally reached a steady state. At the rainfall intensity of 90 mm/h, the splash erosion rate first rapidly increased to the maximum, then rapidly decreased, and finally reached a steady state. Furthermore, the <1mm soil aggregate was the main fraction of aggregate size that detached by raindrop splash, accounting for 79.01% of total splash erosion. Specifically, the proportion of 0.5-1 mm soil aggregate was the most, accounting for 32.94% of total splash erosion, while, the proportion of 2-5 mm soil aggregate was the least, accounting for 3.36% of total splash erosion. In addition, at the rainfall intensities of 30 mm/h and 60mm/h, the <0.25 mm and <2 mm soil aggregates reached the steady state at the end of rainfall, respectively. The proportion of micro aggregates first rapidly increased, then slowly increased, and finally reached a relatively stable stage. At the rainfall intensity of 90 mm/h, the 1-5 mm and <0.25 mm soil aggregates showed a linear trend, whereas, the proportion of micro aggregates showed a decrease trend. This study can provide a sound scientific basis to control water erosion in the typical black soil region of Northeast China.

Keywords: soils; aggregates; erosion; ridge body; splash erosion processes; splash selective characteristics; black soil region of Northeast China