

湖北低山丘陵区侵蚀泥沙颗粒特征及其与地形因子的关系

朱方方^{1,2}, 程金花^{1,2}, 王书韬^{1,2}, 李语晨^{1,2}

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.国家林业局水土保持与荒漠化防治重点实验室,北京 100083)

摘要: 坡面地形变化是影响侵蚀泥沙颗粒特征的重要因素,深入理解地形因子与侵蚀泥沙颗粒粒径组成及分选特征的关系是研究坡面土壤侵蚀动力学的基础。采用野外降雨试验和粒径分析试验,结合 ArcGIS 系统识别和提取得到地形因子数据,研究低山丘陵地区侵蚀泥沙颗粒特征及其与地形因子的关系。结果表明:(1)在试验条件下,侵蚀泥沙中黏粒和粉粒总含量远高于砂粒,粗颗粒含量与坡度因子呈显著正相关关系($p < 0.01$),粗颗粒与洼地蓄积量呈显著负相关关系($p < 0.05$)。(2)试验样地平均质量直径 MWD 变化范围为 0.031~0.164 mm,分形维数 D 的变化范围为 2.021~2.778,MWD 和 D 的决定因素是粗颗粒含量多少。从整体来看,雨强对泥沙颗粒分选特征参数影响显著,MWD 随雨强的增大而增大, D 随雨强的增大而减小,二者与坡度因子呈显著相关关系($p < 0.05$)。(3)回归分析表明,MWD、 D 与坡度因子、洼地蓄积量呈显著幂函数关系($R^2 > 0.5$),结合相关性研究结果,将坡度因子作为侵蚀泥沙粒径模型研究的优先选择。研究结果旨在揭示地形因子对坡面侵蚀泥沙颗粒的作用机理,为土壤侵蚀模型的构建提供科学参考。

关键词: 侵蚀泥沙; 粒径分选; 地形; 函数关系

中图分类号:157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2021)04-0027-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.04.005

Characteristics of Eroded Sediment Particles and Their Relationship with Topographical Factors in the Low Mountain and Hilly Area of Hubei Province

ZHU Fangfang^{1,2}, CHENG Jinhua^{1,2}, WANG Shutao^{1,2}, Li Yuchen^{1,2}

(1.College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083;

2.Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Control, State Forestry Administration, Beijing 100083)

Abstract: Slope topography changes are the important factors that affect the characteristics of eroded sediment particles. A deep understanding of the relationship between topographic factors and eroded sediment particle size composition and sorting characteristics is the basis for studying slope soil erosion dynamics. In this study, field rainfall experiments and particle size analysis experiments were used, combined with ArcGIS system identification and extraction to obtain topographic factor data, to study the characteristics of erosion and sediment particles in the low mountain and hilly areas and their relationship with topographic factors. The results showed that: (1) Under the test conditions, the total contents of clay and silt particles in the eroded sediment were much higher than that of sand particles. The content of coarse particles had a significant positive correlation with the slope factor ($p < 0.01$), and a significantly negative correlation ($p < 0.05$) with the accumulation of depressions. (2) In this study, the average mass diameter (MWD) of the test plot varied from 0.031 to 0.164 mm, and the fractal dimension (D) varied from 2.021 to 2.778. The determining factor of the MWD and D size was the content of coarse particles. From an overall point of view, rain intensity had a significant impact on the sediment particle sorting characteristic parameters. MWD increased with the increase of rain intensities, and D decreased with the increase of rain intensities. The two have a significant correlation with the slope factor ($p < 0.05$). (3) The regression results show that the MWD and D had the significant power function relationships with the slope factor and the accumulation of depressions ($R^2 > 0.5$). Combining the results of the correlation study, the slope factor was suggested as the preferred choice for the

收稿日期:2020-12-07

资助项目:国家重点基础研究发展计划项目(2017YFC0505504,2017YFC050550401);国家自然科学基金项目(32071839)

第一作者:朱方方(1993—),女,硕士研究生,主要从事土壤侵蚀研究。E-mail:Fangf0506@163.com

通信作者:程金花(1979—),女,教授,博士生导师,主要从事水土保持研究。E-mail:jinhua_cheng@126.com

study of erosion and sediment particle size models. This study aimed to reveal the effect mechanism of topographical factors on slope erosion and sediment particles, and provide a scientific reference for the construction of soil erosion models.

Keywords: eroded sediment; particle size sorting; micro-topography; functional relationship

坡面侵蚀是土壤水蚀的形式之一,侵蚀过程包括雨滴击溅侵蚀和径流冲刷侵蚀,此过程对坡面土壤颗粒产生分散和输移作用,具有分选性^[1-2]。泥沙粒径分布特征可以反映坡面径流与土壤颗粒间的作用机理,便于剖析泥沙在坡面侵蚀过程中对流水动力的响应机制。南方低山丘陵区以水力侵蚀为主,这是由于年降雨量较大,土层保水保肥能力差,土壤抗蚀性差^[3]。侵蚀泥沙分选特征受内外 2 种因素影响,内因是土壤性质^[4],其影响侵蚀过程中养分和污染物质的运移^[5];外因包括降雨性质^[6]、降雨前土壤条件^[7]和坡度^[8]、坡长^[9]、地表粗糙度^[10]等地形因子,其通过对泥沙迁移搬运规律的改变影响泥沙颗粒分选。

当小流域面积 $>5\text{ km}^2$ 时,地形及降雨等因子对小流域径流输沙过程影响较大^[11],地形因子对侵蚀泥沙颗粒产生作用的本质是对侵蚀过程及方式的直接或间接的改变^[12]。以往对于地形因子的研究^[13]采用人工模拟降雨试验,研究典型土壤在 4 种雨强下的颗粒组成发现,侵蚀泥沙随雨强增大朝粗颗粒化发展;张怡等^[8]通过研究 5 个坡度条件下侵蚀泥沙的粒径分布规律发现,坡度从 0 增大到 30°时,不同粒径泥沙颗粒变化存在显著差异;庞延杰等^[14]研究地表糙度对侵蚀泥沙颗粒分选特征的影响发现,糙度对泥沙搬运形式有显著影响,糙度较大时泥沙倾向于团聚体形式搬运,糙度较小时,倾向于颗粒形式搬运。泥沙颗粒分布特征主要包含泥沙流失特征、粒径分选特征等,特征参数采用平均重量直径 MWD、几何平均直

径 GMD、分形维数 D 等^[15-16]。特征参数的引入,从一维和多维的角度对侵蚀泥沙进行性度量,可推动土壤侵蚀动态过程量化^[17]。

目前,国内外泥沙颗粒的研究多采用室内或野外人工降雨方式^[18-19],对于侵蚀泥沙颗粒与地形因素之间的关系研究较少,且较为单一,大多为坡度、坡长等,缺乏全面系统的研究分析。本研究利用天然降雨,分析湖北低山丘陵区侵蚀泥沙颗粒特征,定量分析地形因子与侵蚀泥沙分选特征参数的函数关系,探讨地形因子在坡面土壤侵蚀过程中的作用,以期为湖北地区土壤侵蚀机理的定量刻画及侵蚀模型的建立提供科学参考,为土壤侵蚀径流输沙过程研究提供理论支撑。

1 研究区概况

湖北太子山流域(112°48′45″—113°03′45″E, 30°48′30″—31°02′30″N)为低山丘陵区,境内最高海拔 467.4 m,属于亚热带季风湿润性气候区,有明显的喀斯特地貌。年平均气温 16.4 °C,夏秋多雨,年平均降水量 1 094.6 mm。林场内多为森林土壤,成土母质为黄土母质,土壤主要为黏性黄棕壤,土层深厚,pH 为 5.5~6.5,呈微酸性。在林场内选择 5 个约 400 m²的坡面作为试验点,ArcGIS 系统将试验点 DEM 原始数据栅格化,利用 ArcTools box 工具箱直接提取得到 8 个常规的地形因子,样地基本情况见表 1,其坡面土壤类型、林分经营状况一致。

表 1 试验样地基本情况

样地 编号	地形 起伏度/mm	地表 粗糙度	剖面 曲率	地表切割 深度/mm	坡度 因子	坡长/ m	洼地 蓄积量/L	高程变异 系数/mm
1	12.115	1.304	29.137	6.713	10.690	16.021	72.000	0.018
2	13.681	1.478	29.553	5.089	7.850	2.710	59.000	0.020
3	14.323	1.488	16.272	6.664	8.260	4.009	189.000	0.022
4	10.153	1.161	21.777	4.322	7.270	16.464	145.000	0.016
5	5.068	1.005	53.614	1.434	4.560	0.781	137.000	0.015

2 试验设计

2.1 野外降雨试验

于 2019 年 5—9 月在湖北太子山林场选择 5 个自然坡面进行野外降雨观测试验,坡面土壤类型、林分经营状况等基本一致,采集每场降雨后坡面侵蚀泥沙样品,共 17 场降雨。试验期内测得 17 场降雨雨强分别为 19.3, 35.3, 70.1, 59.5, 21.8, 17.4, 62.8, 42.8,

19.1, 69.7, 23.6, 37.1, 56.7, 15.7, 13.1, 43.7, 40.1 mm/h,将雨强 10~25 mm/h 划分为中雨,25~50 mm/h 划分为大雨,50~100 mm/h 划分为暴雨,共 7 场中雨,5 场大雨,5 场暴雨。试验坡面布设集水措施,用 PVC 板将坡面汇流区出口围起来,出水口放置泥沙取样桶,用以采集径流和泥沙样品。每场降雨结束后将桶内水沙搅拌均匀,用 500 mL 取样瓶集满 1

瓶均匀水沙样,试验样地产沙量基本情况见表 2。

表 2 产沙量基本情况

降雨等级	雨强/ (mm·h ⁻¹)	产沙量/(t·hm ⁻²)				
		1	2	3	4	5
小雨	23.6	10.371	7.475	8.929	5.918	3.436
	13.1	3.692	2.799	2.880	1.935	0.983
	17.4	6.024	4.450	4.954	3.302	1.806
	21.8	8.990	6.518	7.656	5.080	2.909
	19.1	7.101	5.204	5.929	3.943	2.201
中雨	19.3	7.233	5.296	6.049	4.022	2.250
	15.7	5.035	3.754	4.067	2.717	1.451
	43.7	18.553	16.774	13.537	16.549	13.508
	42.8	17.799	16.091	12.985	15.874	12.957
	40.1	15.632	14.126	11.400	13.933	11.373
大雨	35.3	12.128	10.949	8.837	10.796	8.812
	37.1	13.389	12.093	9.760	11.926	9.734
	61.1	92.466	73.800	66.314	70.708	55.134
	64.7	103.984	83.053	74.661	79.544	62.123
	62.8	97.821	78.102	70.194	74.816	58.382
暴雨	56.7	79.308	63.234	56.784	60.616	47.159
	59.5	87.565	69.863	62.763	66.948	52.162

2.2 泥沙粒径分析

将野外采集的水沙样进行烘干、过筛处理,取 0.5 g 风干泥沙样品,放入烧杯中,加入 10 mL 10% H₂O₂ (去除有机质),电热板加热约 2 min 至反应完全,静置 30 min,加入 10 mL 5% NaOH (调节 pH) 后再次加热,反应完全后冷却,将烧杯内的样品移至离心管,加入蒸馏水,以 2 500 r/min 离心去除上清液,反复 3 次,直至样品为中性。加入 5 mL 0.5 mol/L 的 (NaPO₃)₆ (分析纯) 超声波 5 min 后上机测试。本试验所用仪器为马尔文 Mastersizer 3000 激光粒度仪,采用湿法测量。泥沙粒径分级根据美国制土壤质地分级标准,将泥沙颗粒按照粒径划分为黏粒 (<0.002 mm)、细粉粒 (0.002~0.02 mm)、粗粉粒 (0.02~0.05 mm)、细砂粒 (0.05~0.25 mm)、中砂粒 (0.25~0.5 mm)、粗砂粒 (0.5~1 mm)、极粗砂粒 (1~2 mm)。

本文采用平均质量直径 MWD 和分形维数 D 作为泥沙颗粒分选特征参数^[16]。MWD 随着侵蚀泥沙中粗颗粒含量增加而增大,假设各粒径颗粒密度不变,其计算公式为:

$$MWD = \sum_{i=1}^n \overline{R}_i W_i \quad (1)$$

式中: MWD 为平均质量直径 (mm); \overline{R}_i 为粒径 i 的平均直径 (mm); W_i 为粒径 i 的百分比含量 (%); n 为粒径划分的级数,本研究 $n=7$ 。

分形维数 D 值越大,表明泥沙颗粒中细小粒级

颗粒较多,其计算公式为:

$$\frac{V(r < \overline{R}_i)}{V_n} = \left(\frac{\overline{R}_i}{\overline{R}_{\max}} \right)^{3-D} \quad (2)$$

式中: D 为分形维数,无量纲; $V(r < \overline{R}_i)$ 为粒径小于 \overline{R}_i 的颗粒累计体积 (mm³); V_n 为土壤各粒级体积总和 (mm³); \overline{R}_{\max} 为最大粒径的平均直径 (mm)。

2.3 地形因子参数提取

在利用 ArcGIS 系统识别和提取之前,需要根据各类地形的识别方法确定提取流程^[20]。ArcGIS 系统将 DEM 原始数据栅格化,利用 ArcTools box 工具箱直接提取得到 8 个常规的地形因子: 坡度因子 (slope, S)、洼地蓄积量 (depression storage, DS)、地形起伏度 (relief amplitude, RA)、地表粗糙度 (roughness, R)、地表切割深度 (surface incision, SI)、高程变异系数 (elevation variation coefficient, V)、剖面曲率 (section curvature, SC) 来表征坡面地形。

(1) 坡度因子

坡度因子指在其他条件相同的情况下任意坡度下的单位面积土壤流失量与标准小区坡度下单位面积土壤流失量之比。本研究采用刘宝元等^[21]建立的公式计算缓坡坡度因子和陡坡坡度因子:

$$S = \begin{cases} 10.8 * \sin \theta + 0.03 & (\theta \leq 5^\circ) \\ 16.8 * \sin \theta - 0.50 & (5^\circ < \theta \leq 14^\circ) \\ 20.91 * \sin \theta - 0.90 & (\theta > 14^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

式中: S 为坡度因子,无量纲; θ 为坡度,单位为 (°)。

(2) 洼地蓄积量

洼地蓄积量指填满坡面洼地所需的体积,常用 Jensen 等^[20]算法将坡面洼地填平,直至流域中任何栅格上的水位都足以流向小流域出口,用填充过的 DEM 减去原始 DEM,求所有栅格 DEM 差值的均值,将该均值与坡面面积相乘,即得到洼地蓄积量 (L)。

(3) 地形起伏度

地形起伏度反映在一个特定区域内,高程最大值与最小值的差值。地形起伏度计算公式为:

$$RA = H_{\max} - H_{\min} \quad (4)$$

式中: RA 为地形起伏度 (mm); H_{\max} 为分析窗口内 DEM 最大值 (mm); H_{\min} 为分析窗口内 DEM 最小值 (mm)。

(4) 地表粗糙度

地表粗糙度反映坡面凹凸不平的程度。地表粗糙度对土壤侵蚀的增加、减少作用同时存在^[11-12]。本研究采用多重指标量化地表粗糙度:

$$R = 1 / \cos(S * \pi / 180) \quad (5)$$

式中: R 为地表粗糙度,是地表单元曲面面积与投影面积之比,无量纲; S 为坡度因子,无量纲。

(5) 地表切割深度

地表切割深度指地表径流对坡面土壤进行冲击造成的沟道深度,为单元内高程平均值与最小值之差,公式为:

$$SI = H_{\text{mean}} - H_{\text{min}} \quad (6)$$

式中:SI 为地表切割深度(mm); H_{mean} 为分析窗口内平均高程值(mm); H_{min} 为分析窗口内最小高程值(mm)。

(6) 高程变异系数

高程变异系数常用于反映地貌特征差异性,是分析窗口内的高程点的标准差与平均高程的比值,是反映数据平均值分散程度的变量,计算公式为:

$$V = H_{\text{std}} - H_{\text{mean}} \quad (7)$$

式中:V 为分析窗口内的高程变异系数,无量纲; H_{std} 为高程标准差; H_{mean} 为分析窗口内平均高程值(mm)。

(7) 剖面曲率

剖面曲率用于描述地表曲线或曲面在垂直方向的弯曲变化情况,对剖面曲率的提取实际上是对 DEM 进行坡度的二次求取(对坡度层再求坡度),计算公式为:

$$SC = - \frac{p^2 r + 2pq s + q^2 t}{(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

式中:p 为 x 方向高程变化率;q 为 y 方向高程变化率; $r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}$,为 x 方向高程变化率的变化率;s =

$\frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$,为 x 方向高程变化率在 y 方向上的变化率;t =

$\frac{\partial^2 z}{\partial y^2}$,为 y 方向高程变化率的变化率。

(8) 坡长因子

坡长通常指在地面上沿水流方向到其流向起点间的最大地面距离在水平面上的投影长度。本文利用坡长直接算法,运用 Spatial Analyst Tools 中栅格计算器 Raster Calculator 计算栅格图层。

2.4 数据处理

采用 Sigmaplot 12.5 和 SPSS 21.0 软件对数据平均值进行记录、统计、分析及制图,利用数理统计学中皮尔逊相关系数 r 进行相关性分析。

3 结果与分析

3.1 侵蚀泥沙颗粒粒径组成变化特征

侵蚀泥沙颗粒粒径变化可以直观反映降雨条件下泥沙对地形变化的响应,试验样地泥沙颗粒含量见图 1。不同雨强下,坡面泥沙颗粒含量存在明显差异。

中雨强下,黏粒和粉粒总含量变化范围为 66.98%~95.63%。其中,5 号样地内黏粒和粉粒总含量最高

为 95.636%,1 号样地最低为 66.981%,4 号样地黏粒含量最高为 52.574%,3 号样地细粉粒含量最高为 46.906%,5 号样地粗粉粒含量最高为 20.831%。大雨强下,黏粒和粉粒总含量变化范围为 70.758%~89.088%。其中,5 号样地内黏粒和粉粒总含量最高为 89.088%,1 号样地最低为 70.758%,2 号样地黏粒含量最高为 36.084%,3 号样地细粉粒含量最高为 43.100%,1 号样地粗粉粒含量最高为 17.072%。暴雨雨强下,黏粒和粉粒总含量变化范围为 36.482%~77.920%。其中,5 号样地内黏粒和粉粒总含量最高为 77.920%,1 号样地最低为 36.482%;4 号样地黏粒含量最高为 23.906%,5 号样地细粉粒、粗粉粒含量最高分别为 42.964%,17.072%。

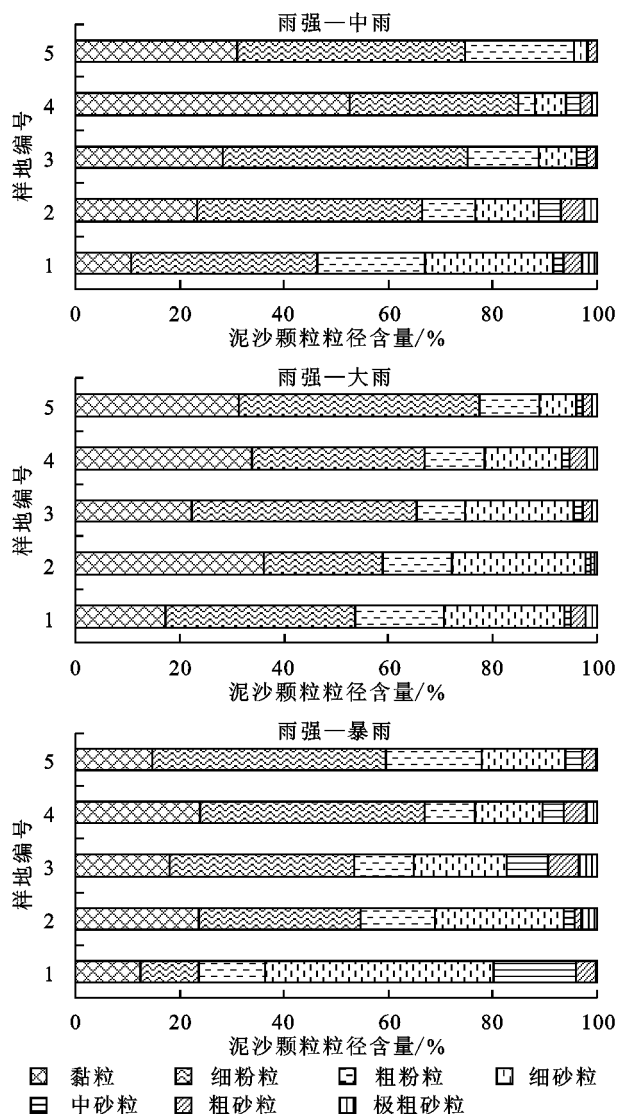


图 1 侵蚀泥沙颗粒粒径组成

对泥沙颗粒含量与地形因子参数进行相关性分析,整体结果为:黏粒、粉粒含量与地形起伏度、地表切割深度、坡度因子存在负相关关系,黏粒含量与坡长呈正相关关系,粗粉粒含量与坡长因子呈现显著负相关关系($p < 0.05$),黏粒和粉粒含量对地形因子变

化响应不一致;砂粒含量与地形起伏度、地表粗糙度、地表切割深度、坡度因子、坡长因子、高程变异系数呈正相关关系,其中细砂粒含量与坡度因子呈显著正相关关系($p < 0.05$),不同粒径的砂粒含量对地形因子变化响应一致。不同雨强下各粒径颗粒含量与地形因子的相关性研究结果显示,在中雨强下,粗粉粒含量与坡长因子呈显著负相关关系($p < 0.05$),中砂粒含量与坡度因子呈显著正相关关系($p < 0.05$),极粗砂粒含量与洼地蓄积量呈显著负相关关系($p < 0.01$);大雨强下,黏粒含量与坡度呈显著负相关关系($p < 0.05$),细粉粒含量与地表粗糙度呈显著负相关关系($p < 0.05$),细砂粒含量与剖面曲率呈显著负相关关系($p < 0.05$),与地表切割深度呈显著正相关关系($p < 0.05$),粗砂粒、极粗砂粒与洼地蓄积量呈显著负相关关系($p < 0.01$);暴雨雨强下,细粉含量与坡度因子呈显著负相关关系($p < 0.05$),粗粉粒含量与剖面曲率呈显著正相关关系($p < 0.05$)。

3.2 侵蚀泥沙分选特征

平均质量直径 MWD 可以从二维角度描述泥沙粒径大小, MWD 数值越大,表示侵蚀泥沙中大粒径颗粒含量越高。分形维数 D 是对不规则物力进行描述的主要指标,可以度量几何对象粗糙性或复杂性,从三维角度描述泥沙粒径分选特征^[15]。平均质量直径 MWD 和分形维数 D 这 2 个分选特征参数可以对泥沙颗粒粒径分选特征进行更加全面系统的描述。

本研究中侵蚀泥沙分选特征参数见表 3。平均质量直径 MWD 变化范围为 0.031~0.164 mm,分形维数 D 的变化范围为 2.021~2.778。从整体来看,雨强对泥沙颗粒分选特征参数影响显著, MWD 随雨强增大而增大, D 随雨强增大而减小。不同雨强下样地泥沙平均质量直径 MWD 均表现为 1 号样地最大, 5 号样地最小。

2 个参数值对试验样地的地形变化相关性显著。研究试验样地泥沙分选特征参数与地形因子参数的相关性可知,分选特征参数与部分地形因子参数之间存在显著相关性,平均质量直径 MWD 与坡度因子呈显著正相关关系($p < 0.01$),与地表切割深度呈显著正相关关系($p < 0.05$);分形维数 D 与坡度因子呈显著负相关关系($p < 0.05$)。从公式(9)和公式(10)可知,泥沙颗粒分选特征参数 MWD 和 D 与细粉粒、粗粉粒、细砂粒、中砂粒、粗砂粒、极粗砂粒含量密切相关,细砂粒含量是 MWD 和 D 的决定性因素。

经过多元线性回归分析得到侵蚀泥沙分选特征参数 MWD、 D 与各粒径组分百分比的关系式为:

$$\text{MWD} = 0.218 C_{\text{细粉}} - 0.058 C_{\text{粗粉}} + 0.509 C_{\text{细砂}} + 0.498 C_{\text{中砂}} + 0.110 C_{\text{粗砂}} + 0.435 C_{\text{极粗砂}} \quad (9)$$

$$D = -0.074 C_{\text{细粉}} - 0.024 C_{\text{粗粉}} - 0.469 C_{\text{细砂}} - 0.386 C_{\text{中砂}} - 0.351 C_{\text{粗砂}} - 0.022 C_{\text{极粗砂}} \quad (10)$$

式中: $C_{\text{细粉}}$ 为细粉粒组分百分比(%); $C_{\text{粗粉}}$ 为粗粉粒组分百分比(%); $C_{\text{细砂}}$ 为细砂粒组分百分比(%); $C_{\text{中砂}}$ 为中砂粒组分百分比(%); $C_{\text{粗砂}}$ 为粗砂粒组分百分比(%); $C_{\text{极粗砂}}$ 为极粗砂粒组分百分比(%).

表 3 侵蚀泥沙颗粒分选特征参数

雨强	样地 编号	分选特征参数	
		MWD/mm	D
中雨	1	0.126±0.007	2.300±0.024
	2	0.113±0.016	2.507±0.044
	3	0.045±0.007	2.702±0.024
	4	0.057±0.004	2.778±0.011
	5	0.031±0.003	2.746±0.012
大雨	1	0.104±0.006	2.639±0.021
	2	0.063±0.006	2.444±0.172
	3	0.075±0.010	2.606±0.048
	4	0.090±0.019	2.573±0.035
	5	0.053±0.010	2.703±0.019
暴雨	1	0.164±0.001	2.021±0.028
	2	0.108±0.002	2.475±0.014
	3	0.161±0.004	2.320±0.012
	4	0.106±0.004	2.526±0.017
	5	0.072±0.007	2.513±0.018

注:表中数据为平均值±标准差。

3.3 侵蚀泥沙分选特征参数与地形因子参数的量化关系

坡面地形变化可以显著影响泥沙颗粒平均质量直径 MWD 和分形维数 D 。进一步分析表明,泥沙颗粒平均质量直径 MWD 与坡面地形因子参数存在显著幂函数关系($0.545 4 \leq R^2 \leq 0.943 2$)(表 2),地表起伏度、地表粗糙度、坡面曲率、地表切割深度、坡度因子、坡长因子、高程变异系数与 MWD 呈幂函数增长关系,剖面曲率、洼地蓄积量与 MWD 呈现幂函数递减关系。分形维数 D 与洼地蓄积量呈现显著幂函数增长关系,与坡度因子呈现显著幂函数递减关系($0.568 6 \leq R^2 \leq 0.825 7$)(表 4)。

4 讨论

土壤颗粒组成是影响土壤抗蚀性的重要因素,地形变化对泥沙颗粒组成影响显著,各粒级泥沙颗粒含量与地形因子参数显著相关。本试验样地中,黏粒和粉粒含量远高于砂粒,且随着雨强增大,细颗粒含量

明显降低,这是由于雨强增大导致雨滴动能与径流动能增大,表层土壤中质量较大的粗颗粒在雨滴击溅侵蚀作用下易剥离原土壤,随即被径流搬运,侵蚀泥沙中粗颗粒含量增加^[22]。黏粒含量随坡长因子增大而降低,粗粉粒含量随坡长因子增大而减小,这是由于泥沙颗粒运移受重力和水流挟沙力的影响,侵蚀泥沙在输移过程中会进行一定的沉淀,在重力作用下,较粗的泥沙颗粒被输送的距离较短^[23]。细砂粒、中砂粒含量与坡度因子呈显著正相关关系($p < 0.05$),黏粒和粉粒与坡度因子呈显著负相关($p < 0.05$),这与吴凤至等^[18]的研究结果相一致。坡度因子对泥沙颗粒的影响,主要通过坡面径流剪切力变化。泥沙量与坡度呈显著正相关关系($p < 0.05$),这是由于坡度增大导致径流系数增大,坡面径流流速和流量增大^[2],携沙能力增强。根据水量平衡公式,坡度较大的坡面在降雨期间坡面土壤表层含水量较小,表层土壤黏结力较大,土壤抗蚀性较大,黏粒不易被径流剪切力剥离原土,更容易起动和搬运大颗粒泥沙^[24]。

表 4 泥沙颗粒特征参数与坡面地形因子参数函数关系

地形因子	MWD/mm		D	
	函数关系	R^2	函数关系	R^2
地形起伏度	$y = 0.0242x^{0.6727}$	0.6948	$y = 2.9683x^{-0.0580}$	0.4290
地表粗糙度	$y = 0.0809x^{1.5222}$	0.5527	$y = 2.6872x^{-0.1500}$	0.4468
剖面曲率	$y = 0.8030x^{-0.5800}$	0.5641	$y = 2.3439x^{0.0302}$	0.1275
地表切割深度	$y = 0.0567x^{0.4983}$	0.8321	$y = 2.6707x^{-0.0840}$	0.3292
坡度因子	$y = 0.0152x^{1.0158}$	0.8500	$y = 3.7336x^{-0.2280}$	0.5686
坡长因子	$y = 0.0547x^{0.2035}$	0.9432	$y = 2.6935x^{-0.0230}$	0.1374
洼地蓄积量	$y = 8.5028x^{-1.0380}$	0.7353	$y = 0.9730x^{0.1815}$	0.8257
高程变异系数	$y = 49.8280x^{1.5029}$	0.5454	$y = 2.6935x^{-0.0230}$	0.1374

黏粒和粉粒含量与地形因子特征参数的关系随雨强变化而产生差异。在大雨强和暴雨强降雨条件下,细粉粒含量随地表粗糙度增大而降低,而在中雨条件下,二者呈现正相关关系。雨强与泥沙量存在显著正相关关系($p < 0.01$),大雨强导致雨滴直径增大,径流冲刷量增大。降雨对泥沙颗粒的影响主要分为 2 个方面,雨滴击打表土层使泥沙颗粒剥离原土,径流冲刷搬运泥沙颗粒,雨滴击溅侵蚀剥离的土壤颗粒在输移中易沉淀,因此降雨对泥沙颗粒的影响主要体现在径流搬运能力的强弱^[24]。雨强较大时,径流不易被分散,地表凸起处的细颗粒土壤被径流剪切力剥离和搬运至凹陷处沉积;雨强较小时,地表凹凸起伏导致径流分散,径流剪切力在克服摩擦阻力做功的同时被减弱,粒径较大的砂粒不易被搬运^[10]。坡面坑洼处蓄积水量大,降低雨滴对坡面的击打作用,粗颗粒不易剥离原土壤,因此极粗颗粒与洼地蓄积量呈显

著负相关关系($p < 0.01$)。

平均质量直径 MWD 越大,表示粗颗粒含量越高,分形维数 D 值越大,表明泥沙颗粒中细小粒级颗粒较多^[19]。在本试验条件下 MWD 和 D 的大小主要取决于粗颗粒含量的多少。径流侵蚀力随坡度增大而增大,易对土壤表层粗颗粒做功^[15],粗颗粒含量增加导致 MWD 增大, D 减小。地表切割深度越大,表示地表被侵蚀情况越严重^[25],细颗粒早已被径流冲刷带走,粗颗粒含量大,MWD 越大。

地形因子参数是从多个角度对坡面地形进行描述,选择合适的地形因子参数,对土壤侵蚀模型的建立尤为重要。根据函数关系式和相关性分析结果可知,坡度因子和洼地蓄积量因子均可作为本流域泥沙粒径模型研究的对象。选用地形因子进行评价时应优先选择坡度因子,然后选择为洼地蓄积量因子,其余地形因子相关系数不同时满足 > 0.5 的条件,尽量不要选择,以免所得到的泥沙粒径预测结果误差过大。根据泥沙颗粒含量、泥沙颗粒粒径特征参数与地形因子参数的相关性分析可知,坡度因子与泥沙颗粒含量、泥沙粒径特征相关性显著($p < 0.01$)。选择坡度因子作为泥沙粒径模型研究的重要地形因子具有科学依据。

5 结论

(1)地形变化影响侵蚀泥沙颗粒粒径变化,黏粒和粉粒总含量远高于砂粒含量,其中坡度因子、坡长因子、地表粗糙度、剖面曲率和洼地蓄积量对泥沙粒径组成影响显著。侵蚀泥沙平均质量直径 MWD 和分形维数 D 与坡度、洼地蓄积量呈显著幂函数关系($0.5686 \leq R^2 \leq 0.8500$),泥沙颗粒 MWD 和 D 均由粗颗粒含量多少决定。粗颗粒含量与坡度因子呈显著正相关关系($p < 0.05$),坡度增大,坡面土壤入渗量减少,表面土壤黏结力大,颗粒较小的黏粒不易剥离土壤表层,粒径较大的砂粒在径流剪切力作用下易被搬运,MWD 值较大, D 值较小。

(2)地形因子与侵蚀泥沙分选特征参数存在函数关系,综合分析地形因子参数与侵蚀泥沙颗粒相关性,确定地形因子的优先等级尤为重要。坡度因子是研究泥沙颗粒特征模型的优先选择,其次是洼地蓄积量因子。地形因子与泥沙颗粒特征参数之间呈幂函数关系,但是这种函数关系仅仅只能建立在坡度因子、洼地蓄积量因子这 2 个地形因子上(同时满足 $R^2 \geq 0.5$)。地形因子对坡面产流产沙、泥沙颗粒粒径影响显著,将地形因子与坡面产流产沙过程、泥沙颗粒粒径变化过程相结合,建立一个全面系统的低山丘陵地区土壤侵蚀过程预测模型是下一步需要研究的内容。

参考文献:

- [1] Morgan R P C. A simple approach to soil loss prediction: A revised Morgan-Morgan-Finney model[J]. *Catena*, 2001, 44(4): 305-322.
- [2] 周柱栋,程金花,杨帆,等.北方土石山区植株密度对坡面流粒径分选的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(1): 96-102.
- [3] 黄坤.红壤侵蚀区植被因子提取及小流域水土流失快速监测方法[D].福州:福建师范大学, 2011.
- [4] Wu X L, Wei Z Y, Wei Y J, et al. Effects of soil type and rainfall intensity on sheet erosion processes and sediment characteristics along the climatic gradient in central-south China[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 621: 54-66.
- [5] 周梦玲,郭建斌,崔明,等.喀斯特坡地侵蚀泥沙养分流失与粒径分布的关系[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 54-60, 71.
- [6] Kiani H M, Sadeghi S H, Asadi H. Comparing grain size distribution of sediment and original soil under raindrop detachment and raindrop-induced and flow transport mechanism [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2018, 63(2): 312-323.
- [7] Warrington D N, Mamedov A I, Bhardwaj A K, et al. primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(1): 84-93.
- [8] 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.
- [9] Gilley J E, Finkner S C, Spomer R G, et al. Size distribution of sediment as affected by corn residue [J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 1986, 29(5): 1273-1277.
- [10] 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.
- [11] Vrieling A, Sterk G, Beaulieu N. Erosion risk mapping: A methodological case study in the Colombian Eastern Plains[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 57(3): 158-163.
- [12] Darboux F, Huang C H. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers? [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(3): 748-756.
- [13] 薛孟君,马岚,张栋,等.雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 11-17.
- [14] 庞延杰,丁文峰,李清溪,等.粗糙度对坡面侵蚀及泥沙分选性影响试验研究[J]. *人民长江*, 2017, 48(17): 28-33.
- [15] 杨帆,程金花,张洪江,等.坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(5): 129-137.
- [16] 郝燕芳,刘宝元,杨扬,等.中国5种典型土壤的侵蚀泥沙粒径分布特征[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 150-159.
- [17] 张秦岭,李占斌,徐国策,等.丹江鹦鹉沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 244-249.
- [18] 吴凤至,史志华,岳本江,等.坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1235-1240.
- [19] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 127-133.
- [20] Jenson S K, Domingue J O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, 54(11): 1593-1600.
- [21] 刘宝元,史培军. WEPP 水蚀预报流域模型[J]. *水土保持通报*, 1998, 18(5): 6-12.
- [22] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China [J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512(5): 168-176.
- [23] 陈永宗,朱同新,张勋昌,等.晋西离石县王家沟流域坝地淤积物岩性特征分析[C]//山西省水土保持研究所.中国—加拿大晋西黄土高原土壤侵蚀实验规律研究文集.北京:水利电力出版社, 1990: 126-133.
- [24] 李清溪,丁文峰,朱秀迪,等.雨强和地表粗糙度对坡面微地形及侵蚀的影响[J]. *长江科学院院报*, 2019, 36(1): 41-47.
- [25] 张晖,王晓峰,余正军.基于 ArcGIS 的坡面复杂度因子提取与分析:以黄土高原为例[J]. *华中师范大学学报(自然科学版)*, 2009, 43(2): 323-326.