

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.012.

赵文卓, 秦富仓, 董晓宇, 等. 裸露砒砂岩区沟坡泻溜侵蚀特征与地形因子的关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 155-163.

Zhao Wenzhuo, Qin Fucang, Dong Xiaoyu, et al. Relationship Between Gully Slope Slumping Erosion Characteristics and Topographic Factors in Bare Sandstone Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 155-163.

裸露砒砂岩区沟坡泻溜侵蚀特征与地形因子的关系

赵文卓¹, 秦富仓^{1,2}, 董晓宇¹, 李龙¹, 杨振奇³, 胡雪冰⁴, 姚立强⁵

(1. 内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 呼和浩特 010018; 2. 内蒙古自治区林业科学研究院, 呼和浩特 010000;

3. 水利部 牧区水利科学研究所, 呼和浩特 010020; 4. 准格尔旗水利事业发展中心, 内蒙古 鄂尔多斯 010399;

5. 内蒙古自治区水利事业发展中心, 呼和浩特 010020)

摘要: [目的] 研究沟坡泻溜侵蚀和地形因子的关系, 可为裸露砒砂岩区沟坡泻溜侵蚀机理和侵蚀灾害监测提供理论参考。[方法] 选取泻溜侵蚀严重的砒砂岩区为研究区域, 基于野外原位监测结合三维激光扫描技术分析了沟坡泻溜侵蚀特征及地形因子的变化特征。[结果] (1) 泻溜侵蚀量与温度和风速表现为极显著相关, 相关系数分别为 0.867, 0.917。 (2) 地形因子数值总体呈增大趋势, 坡上地表粗糙度和地表起伏度波动变化较为明显, 坡中及坡下波动变化较缓, 沟壑密度无明显规律特征。 (3) 泻溜侵蚀量与地表粗糙度和地表起伏度相关性显著且呈多项式回归关系, 与沟壑密度相关性不显著。各地形因子间存在一定的相关性, 地表粗糙度和地表起伏度呈显著正相关关系, 相关系数为 0.89。[结论] 裸露砒砂岩区沟坡泻溜侵蚀量可以通过地表粗糙度和地表起伏度的数值波动来表征。

关键词: 裸露砒砂岩区; 沟坡; 泻溜侵蚀; 地形因子

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0155-09

Relationship Between Gully Slope Slumping Erosion Characteristics and Topographic Factors in Bare Sandstone Area

Zhao Wenzhuo¹, Qin Fucang^{1,2}, Dong Xiaoyu¹, Li Long¹, Yang Zhenqi³, Hu Xuebing⁴, Yao Liqiang⁵

(1. College of Desert Management, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Institute of Forestry Sciences, Hohhot 010000, China; 3. Institute of Water Resources for Pastoral Area, Ministry of Water Resources, Hohhot 010020, China; 4. Zhungeer Banner Water Conservancy Development Center, Ordos, Inner Mongolia 010399, China; 5. Inner Mongolia Autonomous Region Water Conservancy Development Center, Hohhot 010020, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to examine the relationship between gully slope slumping erosion and topographic factors, and to provide a theoretical reference for the mechanism of gully slope slumping erosion and erosion disaster monitoring in bare sandstone area. [Methods] Based on in-situ monitoring and 3D laser scanning technology, the characteristics of slumping erosion and the variation of topographic factors were analyzed. [Results] (1) The amount of slumping erosion was significantly correlated with temperature and wind speed, and the correlation coefficients were 0.867 and 0.917. (2) The topographic factor values showed an increasing trend in general, the surface roughness and surface undulations fluctuated more obviously on the slope, and the fluctuations changed slowly in the middle and lower slopes, and the gully density had no obvious regularity. (3) The amount of slumping erosion was significantly correlated with surface roughness and surface fluctuation, and the relationship was polynomial regression, there was no significant correlation with gully density. There was a certain correlation among the

收稿日期: 2023-08-28

修回日期: 2023-10-11

资助项目: 内蒙古自治区自然科学基金重大项目(2021ZD07); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2021BS04009); 国家自然科学基金项目(41807097); 国家自然科学基金项目(4196070057); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0075)

第一作者: 赵文卓(1998—), 女, 内蒙古锡林浩特人, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 841563463@qq.com

通信作者: 秦富仓(1966—), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 主要从事水土保持与荒漠化防治、林业教学与研究。E-mail: qinf@126.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

topographic factors, and the surface roughness and surface undulations showed a significant positive correlation, and the correlation coefficient was 0.89. [Conclusion] The erosion amount of gully slope in bare sandstone area can be characterized by the numerical fluctuation of surface roughness and surface fluctuation.

Keywords: bare sandstone area; gully Slope; slumping erosion; topographical factor

泻溜侵蚀是指陡峭坡面的表层土因冬春冻融变化以及物理风化作用所产生的岩屑在重力作用下沿坡面滚动到坡脚形成锥状堆积物的一种侵蚀方式^[1-3],其是一种比较连续持久的侵蚀方式,主要发生在 35° 以上由松散物质组成的斜坡上,尤其是黄土及易风化的破碎岩组成的裸露坡面。泻溜侵蚀作为一种严重的土壤侵蚀方式,不仅破坏黄河流域的生态健康,还严重威胁着当地人民的生产生活。内蒙古鄂尔多斯高原丘陵区是砗砂岩广泛分布的地区,其中准格尔旗的砗砂岩分布面积占全旗总面积的70%以上。根据野外调查可知裸露砗砂岩区鲍家沟流域沟坡陡峭,加之砗砂岩结构松散、基岩裸露程度较高、抗蚀性能差,每年被侵蚀的砗砂岩所形成的泥砂成为黄河流域粗砂来源的重要组成部分,使得裸露砗砂岩区成为黄土高原砗砂岩区侵蚀最剧烈、治理难度最大的地方^[4],通过长期监测不断确认后可知此流域重力侵蚀类型以泻溜侵蚀为主,因此研究裸露砗砂岩区鲍家沟流域泻溜侵蚀对实现沟坡侵蚀防控,积极推动黄河流域高质量发展具有重要意义。

泻溜侵蚀影响因素复杂多样,以重力为主导营力,并经常与其他侵蚀方式相叠加加剧彼此的侵蚀。王斌科^[4]研究海东区泻溜侵蚀发生条件,认为干燥剥蚀、冻融及风化是影响泻溜侵蚀发生的基本动力。曾伯庆等^[5]研究发现坡度、冻融和风力等因素与泻溜侵蚀强度均有密切关系,且岩性是决定泻溜侵蚀的内在因素。涂安千^[6]和柴亚凡^[7]等认为泻溜侵蚀主要受岩性、降雨、地形等因素影响,其形成过程包括裂隙形成—松散土层形成—泻溜发生3个阶段。事实上,地表因子在一定程度上对侵蚀有着重要的影响^[8]。近年来,很多学者主要通过地形因子的量化来表征地表变化特征,从而分析地形因子与土壤侵蚀间的关系。常用的地形因子包括地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度、沟壑密度等。张健文等^[9]以地表切割深度和地表粗糙度为主要参数对侵蚀现象做出判断。王莹等^[10]在横垄坡面以地表粗糙度为主要参数对坡面侵蚀量做出预测。上述研究主要集中在泻溜侵蚀的成因及侵蚀过程,但对沟坡侵蚀过程中地形因子与泻溜侵蚀的关系的研究未见报道。鉴于此,本研究以内蒙古准格尔旗裸露砗砂岩区沟坡为研究对象,选取地表粗糙度、地表起伏度、沟壑密度3个宏观地形因子作为区域尺度研究的地

形指标,通过三维激光扫描方法和 ArcGIS 软件分析沟坡泻溜侵蚀量以及地形指标的变化特征,揭示地形因子与泻溜侵蚀的相关关系,以为裸露砗砂岩区沟坡泻溜侵蚀防控、生态建设提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水乡鲍家沟流域($110^{\circ}31'—110^{\circ}35'E$, $39^{\circ}46'—39^{\circ}48'N$) (图1),该区天然沟坡以斜坡及基岩裸露面积较大的陡坡为主。气候干旱,太阳辐射较强烈,气温急剧变化,年平均气温一般在 $7.8^{\circ}C$ 左右,降雨主要集中在7—9月且降雨类型多为暴雨,降雨量占全年总降雨量75%左右;土壤基岩主要为砗砂岩,结构松散为小颗粒状,具有遇水快速崩解的特性。研究区的植被以多年生草本植物为主,还有少量的灌木和乔木,包括羊草(*Leymus chinensis*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)等。

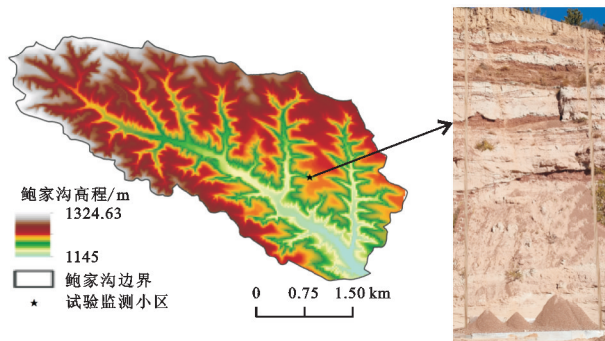


图1 研究区位置

Fig. 1 Location map of the research area

1.2 试验设计

原状基岩在取样和运输过程中容易出现裂缝并且重塑土不能准确还原基岩的岩性。为了保证试验结果科学性,本研究基于野外原位试验观测裸露砗砂岩区沟坡泻溜侵蚀特征。本试验于2022年6月开始准备,经实地勘察裸露砗砂岩区沟坡的平均坡度 $65^{\circ}—80^{\circ}$,以基岩裸露面积较大的陡坡为主,并且砗砂岩岩石结构特殊散,成岩程度低,沙粒间胶结程度差,在沟坡坡面上岩石颗粒以滑动的形式向下运动,此监测场紧挨河道,每年被侵蚀的砗砂岩所形成的泥砂流入河道,成为黄河流域粗砂来源的重要组成部分。故本文选取平均坡度 80° 的天然裸露沟坡布设

规格为 15 m(长)×7 m(宽)的监测场 1 个。由于受沟坡坡度和施工难度的限制,沟坡特定区域周围用麻绳框选监测边界。根据研究区砒砂岩历史资料以及前期试验结果,选取沟坡表面 0—5 cm 的土壤作为采样点,试验前用环刀在监测场的坡上(监测小区底端 10 m 至顶端)、坡中(监测小区底端 5—10 m 处)、坡下(监测小区底端 5 m 处)各平均取有代表性的 5 个

取样点,共取样 15 个,将取样的土壤样品装入塑封袋封存编号,在室内实验室测定土壤容重用于侵蚀量的计算,以上指标进行 3 次重复试验。试验测得监测场平均土壤容重为 1.643 g/cm³。

在监测场旁边设有一台由美国 HOBO 公司设计制造的型号为 U30 的气象监测仪器,每隔 2 min 采集研究区的降雨、温度及风速等气象数据(表 1)。

表 1 研究区环境因子基本特征

Table 1 Basic characteristics of environmental factors in the study area

监测时间	平均气温/℃	温差/℃	平均风速/(m·s ⁻¹)	最大风速/(m·s ⁻¹)	平均太阳辐射/(W·m ⁻²)	降雨量/mm
TD ₁	24.705	17.003	1.993	3.001	184.816	19.200
TD ₂	25.849	22.649	2.796	3.663	228.199	17.000
TD ₃	21.701	16.672	1.607	2.735	237.604	1.000
TD ₄	24.431	18.309	2.061	3.082	255.781	15.000
TD ₅	24.854	24.991	1.433	2.606	256.312	1.800
TD ₆	26.328	24.129	2.520	3.360	280.873	18.600

注:TD₁ 代表 2022 年 6 月 25 日—7 月 4 日;TD₂ 代表 2022 年 7 月 4 日—7 月 11 日;TD₃ 代表 7 月 11 日—7 月 22 日;TD₄ 代表 7 月 22 日—7 月 26 日;TD₅ 代表 7 月 26 日—8 月 1 日;TD₆ 代表 8 月 1 日—8 月 6 日。

1.3 沟坡扫描与分析

野外试验为了收集分析区域沟坡泻溜侵蚀的重量,需要对坡下土壤堆积体进行收集称重,操作较困难,难度大,所以利用三维激光扫描仪对研究区沟坡形态特征进行扫描。试验所用的三维激光扫描仪为 RIEGL VZ-400,100 m 范围内扫描精度为±2 mm,为了保证每次扫描条件的一致性,在距离小区底部 10 m 处设立一个扫描站点。同时选取 10 个固定点作为每次扫描数据的拼接参考点,最后将三维激光扫描仪用三脚架(距地面高度为 100 cm)固定在站点上同时刻对小区进行扫描(图 2),共获取 14 次小区沟坡点云数据。扫描结束后,首先用 RICAN PRO 软件将扫描的点云数据进行降噪和拼接处理,设置三维点坐标属性并导出“.txt”的点坐标数据,再将三维点坐标数据导入 ArcGIS 软件中进行空间校准,将校准后的点云数据生成 Tin 矢量数据,利用转换工具将 Tin 矢量数据转换成高精度的地表数字高程模型(M-DEM,精度 1 cm×1 cm)。通过 3 D 分析模块对不同时期的 DEM 数据做差,计算得到沟坡空间点侵蚀前后的高差值,再利用空间分析模块的空间叠加分析工具和栅格计算器对栅格数据进行叠加相减得到侵蚀面积,再乘以土壤容重与高差值,可得到不同时期下沟坡侵蚀量的变化。

汇流阈值关系着整个沟谷网络的计算范围,如果阈值设置太小,沟壑过于密集;设置太大,沟壑过于稀疏,因此数据处理的关键在于选取合理阈值。本研究通过 ArcGIS 软件水文分析模块设置初始阈值 25,

之后以 25 为间距探讨不同汇流阈值与沟壑密度的变化关系,由图 3 可以看出沟壑密度随着汇流阈值增大呈幂函数趋势减小,相关性系数为 0.997 4,符合统计学检验。为了使提取数据接近最真实沟壑形态,通过均值变点分析法^[11]确定曲线由陡变缓的唯一一点为最佳阈值点,即图 4 所示汇流阈值为 300 时为最佳阈值点。其次通过 ArcGIS 软件生成不同时期的数字高程模型,根据高程值进行重分类,划分出侵蚀区与沉积区^[12]并提取侵蚀深度,即高程值小于 0 时为侵蚀区,对应的高程值为侵蚀深度。采用邻域分析模块的栅格分析窗口(邻域设置像元大小 3 cm×3 cm)以及地图代数工具对地表粗糙度、地表起伏度进行提取和分析。

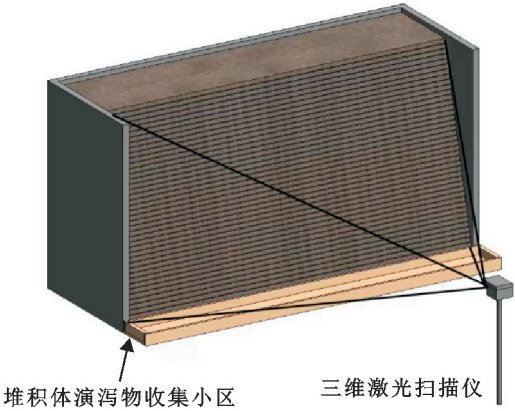


图 2 扫描小区示意图

Fig. 2 Scan plot schematic diagram

1.4 数据处理

(1) 侵蚀区面积(TEA)的计算公式为:

$$TEA = n \times A \quad (1)$$

式中:TEA 为分析区域内侵蚀区面积(m^2); n 为侵蚀区的栅格总数量; A 为分析区域内单个栅格的面积(m^2)。

(2) 地表粗糙度(R)是指地表单元曲面面积与投影面积的比值^[13-14],地表粗糙度可以用来表示地表

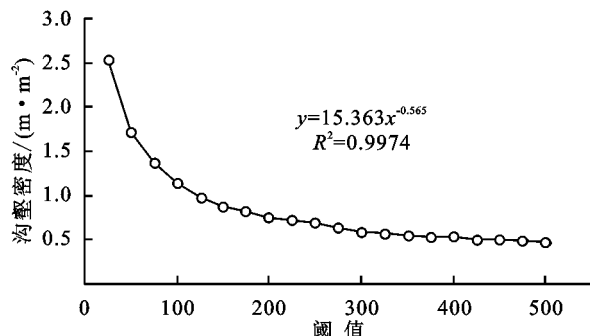


图 3 沟壑总长度随汇流阈值变化

Fig. 3 The total length of the gully varies with the confluence threshold

(3) 地表起伏度(RA)也称为相对海拔高差,是指在一定区域范围内,最大高程值与最小高程值的差值,能直观地表示出土壤在侵蚀过程中地表的高低起伏状况。采用邻域分析模块的焦点统计工具进行提取,其表达式为:

$$RA = H_{\max} - H_{\min} \quad (3)$$

式中: RA 为地表起伏度(m); H_{\max} 为分析区域内最大高程值(m); H_{\min} 为分析区域内最小高程值(m)。

(4) 沟壑密度(D_s)是指在一定单位面积内沟壑的总长度,沟壑密度越大,地面切割越破碎,侵蚀越剧烈^[16]。采用水文分析模块进行提取和计算,其表达式为:

$$D_s = \frac{\sum L}{A} \quad (4)$$

式中: D_s 为沟壑密度(m/m^2); $\sum L$ 为分析区域内沟壑总长度(m); A 为分析区域表面积(m^2)。

(5) 均值变点分析法是指系统模型或输出序列在某未知时刻突然变化,该时刻即为变点^[17]。 S 和 S_i 的差值会因变点的存在而变大,因此可通过 $S - S_i$ 值的变化来确定变点的位置。主要计算过程为:

$$S_i = \sum_{t_1=1}^{i-1} (x_{t_1} - \bar{x}_{i_1})^2 + \sum_{t_2=i}^N (x_{t_2} - \bar{x}_{i_2})^2 \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 \quad (6)$$

式中: S_i 为两段样本方差之和; S 为总体方差; $i = 1, \dots, N$, N 为沟壑密度总样本数; x_i 为不同阈值下沟壑密度值; \bar{x} 为总样本沟壑密度值的算数平均值;第 i 个样本将序列分成两段: $t_1 = 1, 2, \dots, i-1$; $t_2 = i, i+1, \dots, N$; \bar{x}_{i_1} 和 \bar{x}_{i_2} 分别为前一段和后一段样本沟壑密度值的算数平均值。

的破碎程度,在水土保持工作治理上有很高的应用价值^[15]。采用 Spatial Analysis 模块下的栅格计算器进行计算,其表达式为:

$$R = 1 / \cos(S \cdot \pi / 180) \quad (2)$$

式中: R 为地表粗糙度; S 为分析区域内图层的坡度($^\circ$)。

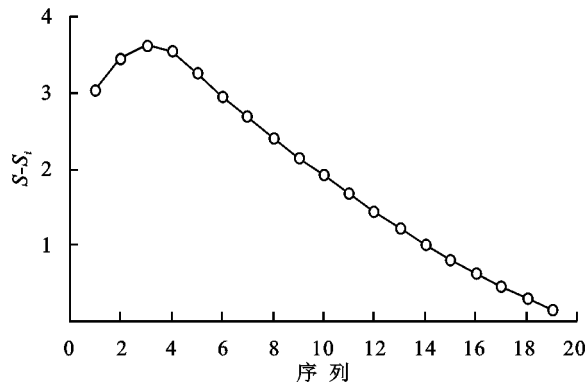


图 4 均值变点分析

Fig. 4 Mean change point analysis

采用 Microsoft Excel 2016 对数据进行统计分析。运用 RISCAN PRO 和 ArcGIS 10.8 软件对泻溜侵蚀量和地形因子进行提取分析,使用 R 语言中“corrplot”软件包制作地形因子和泻溜侵蚀量相关性可视化图以及利用 Pearson 分析研究两者的相关性,通过 Origin 2019 软件进行图表制作。

2 结果与分析

2.1 裸露砭砂岩区沟坡泻溜侵蚀特征分析

从表 2 可以看出,在整个监测周期泻溜侵蚀量呈现出先增加后减少再逐渐增加的趋势,且监测周期的总侵蚀量之比为 0.68 : 0.98 : 0.50 : 0.67 : 0.62 : 1。侵蚀深度在 0.23~0.34 cm。侵蚀面积在 23.52~56.84 m^2 ,其中第三次监测后裸露沟坡平均侵蚀深度为 0.28 cm,侵蚀区面积为 23.52 m^2 ,仅占总面积的 22.40%,而第二次监测后其侵蚀面积最大,为 56.84 m^2 ,像元数为 12 520 个,占整个坡面总面积的 54.13%。裸露砭砂岩区沟坡泻溜侵蚀具有空间差异性,且侵蚀发生规模与其在坡面上发生位置具有一定的关系。通过图 5 的 Tin 数据可以看出研究区不同时期坡面侵蚀变化特征。裸露沟坡在侵蚀过后坡顶侵蚀波动较为明显,坡中次之,坡下侵蚀最弱,整个监测周期侵蚀剧烈区域多发生在坡顶,可见沟坡上部地势高,有利于泻溜侵蚀的发生。

为进一步分析泻溜侵蚀的影响因素,将气象因子与泻溜侵蚀量进行相关性分析,结果见表 3,可以看出,泻溜侵蚀量与温度相关性显著,系数为 0.867。与风速具有极显著相关性,相关系数为 0.917,即风速越大,泻溜侵蚀越剧烈。说明温度、风速对沟坡泻溜侵

蚀量的变化有一定的影响。究其原因裸露砒砂岩区基岩风化层度较高,抗蚀性能差,加之温度变化和风力增强对侵蚀起到促进作用,进而导致砒砂岩风化物及碎屑发生迁移堆积。

表 2 沟坡侵蚀基本特征
Table 2 Basic characteristics of gully slope erosion

监测时间	侵蚀深度/cm				侵蚀区 像元个数/个	侵蚀区 面积/m ²	泻溜 侵蚀量/kg
	最小值	最大值	平均值	标准差			
TD ₁	0.000081	2.724175	0.343942	0.436374	6200	25.98	146.837
TD ₂	0.000013	2.942371	0.226225	0.21075	12520	56.84	211.269
TD ₃	0.000103	2.568956	0.280699	0.400842	5499	23.52	108.451
TD ₄	0.000094	2.427079	0.24569	0.350029	9014	35.97	145.218
TD ₅	0.000086	3.144861	0.342179	0.310206	6153	23.86	134.140
TD ₆	0.000093	3.540313	0.328144	0.459632	9789	39.94	215.326

表 3 环境因子与泻溜侵蚀量的相关分析
Table 3 Correlation analysis between environmental factors and the amount of slip erosion

参数	平均气温	温差	平均风速	最大风速	平均太阳辐射	降雨量	泻溜侵蚀量
平均气温	1.000						
温差	0.703 *	1.000					
平均风速	0.680	0.247	1.000				
最大风速	0.659	0.238	0.997 * *	1.000			
平均太阳辐射	0.220	0.594	0.055	0.032	1.000		
降雨量	0.694	-0.005	0.799	0.778	-0.203	1.000	
泻溜侵蚀量	0.867 * *	0.582	0.917 * *	0.899 * *	0.260	0.718	1.000

注: * 表示在 0.05 水平上相关性显著, ** 表示在 0.01 水平上相关性显著。

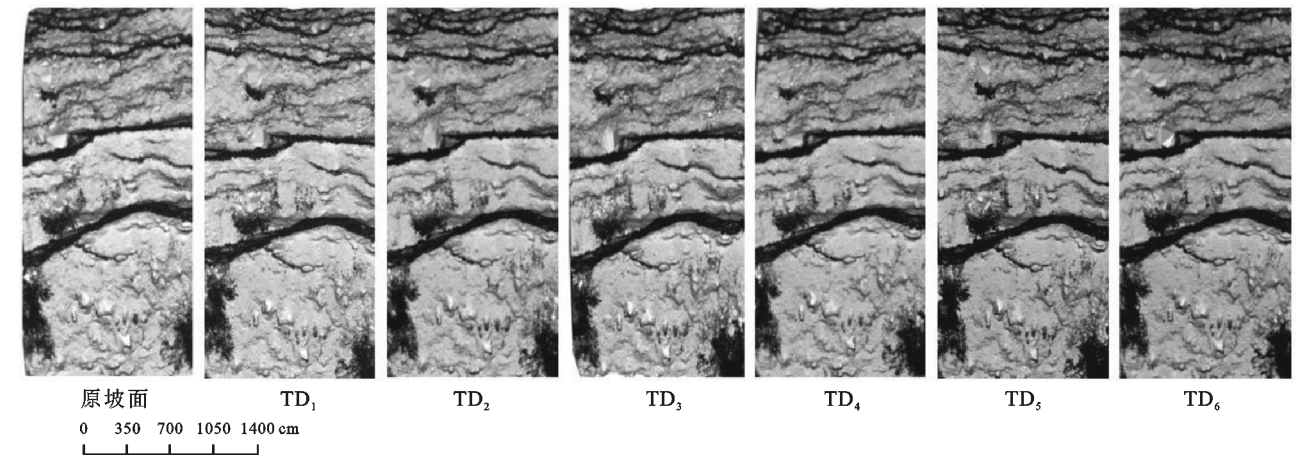


图 5 沟坡侵蚀变化过程
Fig. 5 Change process of gully slope erosion

2.2 裸露砒砂岩区沟坡 ΔDEM 地形因子变化分析

在泻溜侵蚀过程中,地形因子的变化情况可以表征坡面的侵蚀状况。从图 6 可以看出,在侵蚀过后,地表粗糙度和地表起伏度的最大值均分布于坡上边缘部及坡中裂隙处,坡上及坡中波动变化较为明显,坡下波动变化较缓,变化趋势基本一致。这是由于在风速、温度等因素推动下,坡面侵蚀强度加大,土壤团聚体被破坏,由于坡中岩石出露高度和面积较大,对岩石风化物及碎屑起到截留作用,导致坡下地形起伏程度较坡上有所减小。

由表 4 可知,在整个观测中地表粗糙度既有上升又有下降,在第一次监测后,地表粗糙度出现了上升

趋势,但在第二次监测地表粗糙度出现了下降,下降了 0.435 8 m,出现这一情况可能是在监测初期,坡面土粒比较疏松,凸起部分被水滴打击后散落,凹陷部分被楔入土粒,局部形成结皮,因而降低了地表粗糙度^[18]。同时风速、温度差异和重力迁移作用也会导致地表粗糙度的变化。在第六次监测结束后地表粗糙度值相较于监测初期增加了 1.159 倍。此外地表起伏度总体也表现出明显的增加趋势,由 0.436 增大到 0.475,增加了 0.09 倍,分析其原因在监测初期风速由最初的 1.993 m/s 增加到 2.52 m/s,风速的增强使得坡面岩石抗剪强度降低,砒砂岩风化物及碎屑从坡上跌落,地表起伏度增大。但地表起伏度变化幅度

较为复杂,呈现较大的波动性,可能由于砒砂岩特殊的岩性特征对砒砂岩的抗蚀性能产生了影响^[19]。在监测期间由于降雨作用坡面会增加新的沟壑,相邻两

次监测周期沟壑密度数值越来越大,沟壑密度值由 1.211 增大到 1.899 m/m²,但沟壑数量的增多随机性较大,无明显规律。

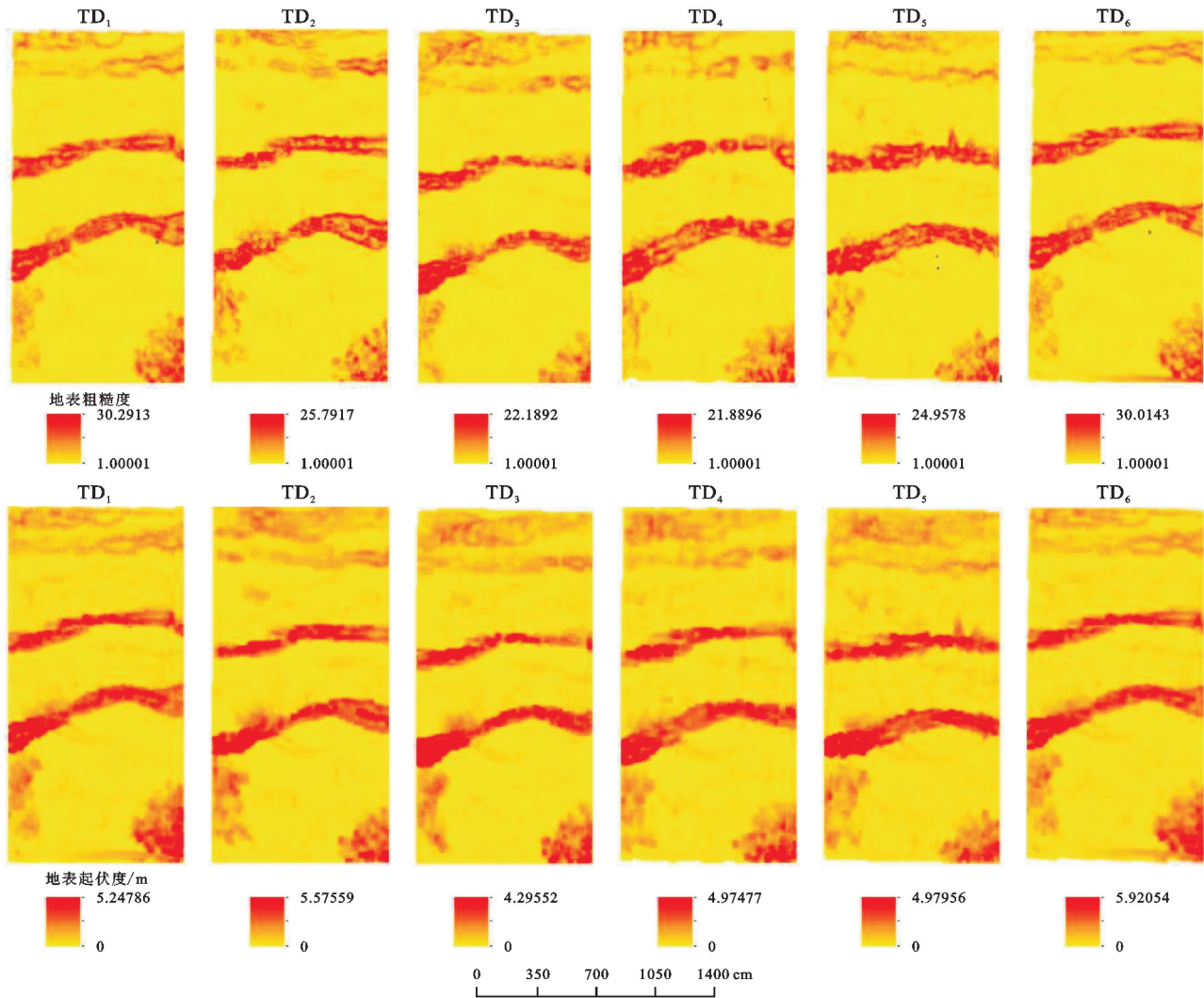


图 6 地形因子变化过程

Fig. 6 Topographic factor changes process

2.3 裸露砒砂岩区沟坡 ΔDEM 地形因子与泻溜侵蚀量的关系

地形因子(地表粗糙度,地表起伏度,沟壑密度)和泻溜侵蚀量进行相关分析,结果见图 7。地表粗糙度,地表起伏度与泻溜侵蚀量存在相关关系,相关系数分别为 0.85,0.87,说明地形因子与泻溜侵蚀量间有良好的线性关系。沟壑密度与侵蚀量间不存在相关关系,说明土壤侵蚀可能受到其他可侵蚀因素的限制,有可能在相邻两场降雨间,沟坡土壤在重力作用下发生崩塌,增加侵蚀重量。各地形指标间存在相关关系,地表粗糙度与地表起伏度呈显著正相关关系,相关系数高达 0.89,说明在侵蚀过程中地形因子间具有较高的响应度。由此可见泻溜侵蚀发生过程中,泻溜侵蚀与地形因子间能够相互影响,泻溜侵蚀使地形因子发生变化,而地形因子的改变也影响了侵蚀量的变化。

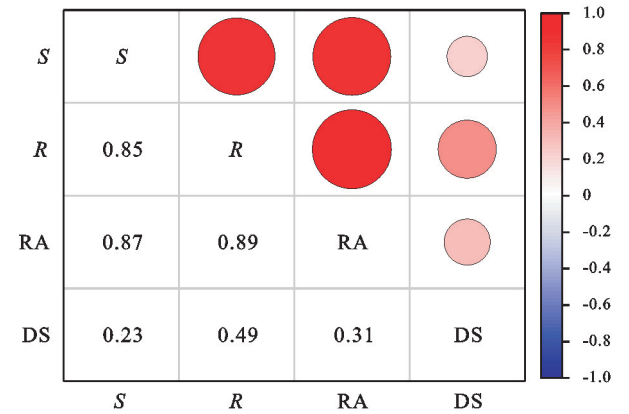
表 4 地形因子随降雨场次的变化特征量

Table 4 Characteristic quantity of topographic factor variation with rainfall frequency

监测时间	地表粗糙度	地表起伏度/m	沟壑密度/(m·m ⁻²)
TD ₁	1.9903	0.4364	1.2115
TD ₂	2.2441	0.4865	1.2186
TD ₃	1.8083	0.4359	1.3823
TD ₄	2.1037	0.4529	1.4054
TD ₅	2.1683	0.4604	1.6951
TD ₆	2.3057	0.4752	1.8992

为进一步探究侵蚀过程中地形因子与侵蚀的响应关系,对地形指标值和泻溜侵蚀量进行回归分析,拟合结果良好,结果见表 5。泻溜侵蚀量与地表起伏度、地表粗糙度间呈线性关系,泻溜侵蚀量与地表起

伏度的关系式为 $y=1837.8RA-681.31(R^2=0.7521)$;泻溜侵蚀量与地表粗糙度的关系式为 $y=202.8R-266.37(R^2=0.7206)$ 。究其原因,重力作为泻溜侵蚀的主导营力,在风速、降雨等气候因素影响下土壤颗粒沿坡面向下迁移使得地表形态不断发生变化。尤其在大风天气下,坡面的岩石更易被击散和搬运,从而增大地表起伏度和地表粗糙度。由此可以得出沟坡在侵蚀过程中泻溜侵蚀量的变化可以通过地表粗糙度和地表起伏度的数值波动来表征。



注:S为泻溜侵蚀量;R为地表粗糙度;RA为地表起伏度;DS为沟壑密度。

图 7 地形因子与泻溜侵蚀量的相关性
Fig. 7 Correlation between topographic factors and Slumping erosion amount

表 5 地形因子与泻溜侵蚀量的回归方程
Table 5 Regression equation of topographic factor and Slumping erosion amount

地形因子	回归方程	决定系数 R^2
地表粗糙度(R)	$y=202.8R-266.37$	0.7206
地表起伏度(RA)	$y=1837.8RA-681.31$	0.7521

3 讨论

在沟坡土壤侵蚀观测研究中三维激光扫描仪具有效率高、分析精度高等优点^[20]。在野外试验中发现收集分析区域沟坡泻溜侵蚀的重量,需要对坡下土壤堆积体进行收集称重。如图 8 所示,由于泻溜物质比较分散、堆积体面积大,操作困难,较难收集。所以本研究利用三维激光扫描技术结合 ArcGIS 软件对沟坡土壤侵蚀形态的微观变化及过程进行实时监测,并计算沟坡的泻溜侵蚀量。张鹏等^[21]研究表明,三维激光扫描仪、高精度 GPS 和测针板法对重力侵蚀量估算精度误差分别为 4.5%,7.38%和-12.78%。

泻溜侵蚀影响因素复杂多样,以重力为主导营力,并经常与其他侵蚀方式相叠加,加剧彼此的侵蚀^[5]。王斌科^[4]研究发现干燥剥蚀、风力等因素是影

响泻溜侵蚀发生的基本动力且与泻溜侵蚀强度均有密切的关系,正如本研究发现温度、风速与泻溜侵蚀量存在显著相关性,相关系数分别为 0.867,0.917。分析其原因在侵蚀过程中,温度可以通过改变沟坡土壤含水量和土壤颗粒结构,使坡面产生裂隙,促进岩石崩解,在风及重力作用下砒砂岩风化物及碎屑发生迁移堆积。同时在分析研究区降雨量与泻溜侵蚀关系时,发现间隔期间降雨量对沟坡整体地形发育没有显著影响,这与李明等^[22]观点一致。究其原因降雨是诱发侵蚀发生的主要因素,当雨强很小时,土壤侵蚀量很小,而当雨强很大时,过多降雨不会对重力侵蚀过程产生贡献作用,所以降雨量在某一数值时会产生最大程度的重力侵蚀事件^[23]。



图 8 泻溜堆积体实景图

Fig. 8 Actual view of the Slumping deposit body

本研究发现在监测期间地形因子表现较大的波动性和复杂性,这与张若曦等^[24]的研究结果相似。分析其原因是在监测初期坡面土壤颗粒在重力作用下沿坡面滑动,使坡面均一化,地形因子呈减小的趋势,后期在风速等影响下坡面侵蚀不断发展,削弱了坡面岩石抗剪强度,增强了土壤颗粒的运移能力,地形因子呈现出上升的趋势。可见地形因子变化不仅仅是侵蚀产生的最终结果,也是造成侵蚀加速发展的主要原因^[25],且沟坡侵蚀产沙量取决于地形因子的变化特征,唐辉^[26]和张建文^[9]等对侵蚀过程中微地貌因素与侵蚀产沙量的相互响应关系深入研究,将重点聚焦于两者变化特征及其相关性分析。本研究对裸露砒砂岩区沟坡的地形因子与泻溜侵蚀量的关系进行分析,结果显示地表粗糙度、地表起伏度与泻溜侵蚀量具有一定相关性,与一些学者^[27-29]的研究结果类似。沟壑密度与泻溜侵蚀量无显著相关性,主要是因为空间分析中,沟壑密度作为参考指标受分辨率和汇流阈值的影响较大,因此得到的沟壑密度存在差异,这一结果与乔荣荣等^[30]对黄河流域典型二级支流重力侵蚀量与沟壑密度研究结果一致,均表明了沟壑密度表征沟坡侵蚀量存在一定的局限性。通过以上分析可以得出地表粗糙度和地表起伏度可以作为评价裸露砒砂岩区沟坡泻溜侵蚀的重要参数。

4 结论

(1) 气候条件会影响砒砂岩沟坡土壤侵蚀能力。

泻溜侵蚀量呈现出先增加后减少再逐渐增加的趋势。在侵蚀过程中沟坡坡顶侵蚀波动较为明显,坡中次之,坡下侵蚀最弱,且泻溜侵蚀量与温度和风速表现为极显著相关,相关系数分别为 0.867,0.917。

(2) 地形因子数值总体呈上升趋势,地表粗糙度变幅为 15.8%;地表起伏度的变幅为 8.9%;沟壑密度由 1.211 增加到 1.899。地表粗糙度和地表起伏度最大值均分布于坡上边缘部及坡中裂隙处。坡上地表粗糙度和地表起伏度波动变化较为明显,沟壑密度无明显规律特征。

(3) 泻溜侵蚀量与地表粗糙度、地表起伏度相关性显著且呈多项式回归关系,与沟壑密度相关性不显著,泻溜侵蚀量与地表起伏度的相关系数较大,为 0.87。各地形指标间存在一定的相关性,地表粗糙度和地表起伏度呈显著正相关关系,相关系数为 0.89,说明裸露砒砂岩区沟坡泻溜侵蚀量可以通过地表粗糙度和地表起伏度的数值波动来表征且在侵蚀过程中地形指标间具有较高的响应。

参考文献(References):

- [1] 刘秉正,吴发启.黄土塬区沟谷侵蚀与发展[J].西北林学院学报,1993,8(2):7-15.
Liu B Z, Wu F Q. Gully erosion and its development on Loess Plateau[J]. Journal of Northwest Forestry University, 1993,8(2):7-15.
- [2] 李育鸿.黄土残塬区泻溜侵蚀土体水分物理性质研究[J].人民黄河,2018,40(8):96-98,119.
Li Y H. Research on hydro-physical properties of slumping erosion in remained loess area[J]. Yellow River, 2018,40(8):96-98,119.
- [3] 高健健,艾琦森,韩立钦,等.2017—2018 年黄土丘陵沟壑区第一副区辛店流域重力侵蚀观测数据集[J].中国科学数据,2021,6(3):113-120.
Gao J J, Ai Q S, Han L Q, et al. An observation-based dataset of gravity erosion of Xindiangu watershed in the first sub-region of Loess Hilly-Gully Region during 2017—2018[J]. China Scientific Data, 2021,6(3):113-120.
- [4] 王斌科.海东黄土区的泻溜侵蚀[J].中国水土保持,1990(5):25-26.
Wang B K. The erotic erosion of loess area of Haidong city[J]. Soil and Water Conservation in China, 1990(5):25-26.
- [5] 曾伯庆,马文中,张治国,等.三趾马红土泻溜侵蚀规律研究[J].中国水土保持,1991(7):21-25,51.
Zeng B Q, Ma W Z, Zhang Z G, et al. Study on erosion of slumping in sanzima red day area[J]. Soil and Water Conservation in China, 1991(7):21-25.
- [6] 涂安千.“红土”陡坡的泻溜侵蚀及其防治[J].水土保持通报,1981,1(4):29-34.
Tu A Q. Sluggish erosion of ‘red soil’ steep slope and its prevention and control[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1981,1(4):29-34.
- [7] 柴亚凡,周波,吕文强,等.人工模拟降雨条件下泻溜红土坡积体的侵蚀过程和入渗特征[J].中国水土保持科学,2019,17(1):10-15.
Chai Y F, Zhou B, Lü W Q, et al. Erosion process and infiltration features of red soil slumping slope sediment under artificial simulated rainfall condition[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2019,17(1):10-15.
- [8] Kuhn J N, Oost V K, Cammeraat E. Soil erosion, sedimentation and the carbon cycle[J]. Catena, 2012,94:1-2.
- [9] 张建文,李鹏,高海东,等.覆沙坡面微地形变化与侵蚀产沙的响应关系[J].干旱区研究,2020,37(3):757-764.
Zhang J W, Li P, Gao H D, et al. Response relationship between micro-relief variation and slope erosion under sand-covered conditions[J]. Arid Zone Research, 2020,37(3):757-764.
- [10] 王莹,郑子成,李廷轩,等.水蚀过程中玉米生长季横垄坡面地表糙度变化及其与侵蚀量的关系[J].中国水土保持科学,2018,16(6):31-37.
Wang Y, Zheng Z C, Li T X, et al. Change of soil surface roughness during maize growing season and its relationship with soil erosion amount on slope of contour tillage during water erosion process[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018,16(6):31-37.
- [11] 丁琳,刘辉.延河流域沟壑密度统计学特征及影响因素分析[J].安徽农学通报,2016,22(14):108-110,116.
Ding L, Liu H. Characteristics of gully density in the Yanhe River Basin and its influencing factors[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2016,22(14):108-110,116.
- [12] Morbidelli R, Saltalippi C, Flammini A, et al. Infiltration on sloping surfaces: Laboratory experimental evidence and implications for infiltration modeling[J]. Journal of Hydrology, 2015,523:79-85.
- [13] 钱秋颖,秦富仓,李龙,等.自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性[J].水土保持学报,2021,35(3):46-52.
Qian Q Y, Qin F C, Li L, et al. Spatial heterogeneity of surface roughness of slope erosion under natural rainfall[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021,35(3):46-52.
- [14] Zheng Z C, He S Q, Wu F Q. Changes of soil surface roughness under water erosion process[J]. Hydrological Processes, 2014,28(12):3919-3929.
- [15] 王靖滢.地表起伏度与区域水土流失的相关性分析[D].重庆:重庆师范大学,2014.
Wang J Y. The correlation analysis between relief degree of land surface and regional scale of soil erosion intensity in Chongqing City[D]. Chongqing: Chongqing Normal University, 2014.

- [16] 吴秉校,侯雷,宋敏敏,等.基于汇流累积计算的沟壑密度分析方法[J].水土保持研究,2017,24(3):39-44.
Wu B X, Hou L, Song M M, et al. Gully density analysis based on flow accumulation method[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 39-44.
- [17] 陈学兄,张小军,常庆瑞.陕西省地形起伏度最佳计算单元研究[J].水土保持通报,2016,36(3):265-270,370.
Chen X X, Zhang X J, Chang Q R. A study on optimal statistical unit for relief amplitude of land surface in Shaanxi Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(3): 265-270, 370.
- [18] 郑子成.坡面水蚀过程中地表糙度的作用及变化特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2007.
Zheng Z C. Study on the effect and change characteristic of soil surface roughness during the course of water erosion [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2007.
- [19] 文慧,倪世民,冯舒悦,等.赣南崩岗的发育阶段及部位对土壤水力性质的影响[J].农业工程学报,2019,35(24):136-143.
Wen H, Ni S M, Feng S Y, et al. Effects of developmental stages and parts of collapsing gully on soil hydraulic properties in southern Jiangxi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(24): 136-143.
- [20] 徐加盼,王秋霞,邓羽松,等.基于三维激光扫描技术的花岗岩风化土体侵蚀表面特征研究[J].水土保持学报,2016,30(2):14-19.
Xu J P, Wang Q X, Deng Y S, et al. Study on characteristics of erosion surface on weathered granite soil based on three-dimensional laser scanning technology [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(2): 14-19.
- [21] 张鹏,郑粉莉,王彬,等.高精度 GPS, 三维激光扫描和测针板三种测量技术监测沟蚀过程的对比研究[J].水土保持通报,2008,28(5):11-15.
Zhang P, Zheng F L, Wang B, et al. Comparative study of monitoring gully erosion morphology change process by using high precision GPS, leica HDS 3000 laser scanner and needle board method[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(5): 11-15.
- [22] 李明,杜继稳,高维英.陕北黄土高原区地质灾害与降水关系[J].干旱区研究,2009,26(4):599-606.
Li M, Du J W, Gao W Y. Study on the relationship between geological disasters and precipitation in the Loess Plateau in North Shaanxi Province[J]. Arid Zone Research, 2009, 26(4): 599-606.
- [23] 严桥.多种降雨条件下沟坡重力侵蚀过程模型试验[D].辽宁大连:大连理工大学,2013.
Yan Q. Simulation of gravitational erosion in the loess gully wall based on various rainfall condition [D]. Dalian, Liaoning: Dalian University of Technology, 2013.
- [24] 张若曦,秦富仓,李龙,等.砒砂岩区坡面微地貌变化与侵蚀产沙的响应关系[J].水土保持研究,2022,29(6):21-27,35.
Zhang R X, Qin F C, Li L, et al. Responses of slope microgeomorphology to erosion and sediment yield in arsenic sandstone area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(6): 21-27, 35.
- [25] 梁心蓝.水蚀过程中地表糙度变化及侵蚀响应[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2015.
Liang X L. Soil surface roughness change and erosion response in the process of water erosion[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2015.
- [26] 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.
Tang H, Li Z B, Li P, et al. Surface micro topography quantification and its relationship with runoff and sediment under simulated rainfall[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(24): 127-133.
- [27] 张文博.土壤结构体对工程堆积体坡面侵蚀产沙及微地形的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
Zhang W B. Effects of soil structure on erosion sediment yield and surface roughness of engineering piles [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [28] 李清溪,丁文峰,朱秀迪,等.雨强和地表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.
Li Q X, Ding W F, Zhu X D, et al. Effects of rainfall intensity and land surface roughness on microtopography and runoff and sediment yield of slope[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute, 2019, 36(1): 41-47.
- [29] 赵斯琦,王晓红,舒天竹,等.喀斯特地区区域尺度土壤侵蚀地形因子研究[J].干旱区资源与环境,2018,32(5):97-103.
Zhao S Q, Wang X H, Shu T Z, et al. Research on topographic factors in relation to regional soil erosion in Karst Region[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2018, 32(5): 97-103.
- [30] 乔荣荣,季树新,白雪莲,等.流域沟壑数量特征与侵蚀量关系[J].中国水土保持科学(中英文),2020,18(6):9-14.
Qiao R R, Ji S X, Bai X L, et al. Relationship between gully quantitative characteristics and soil erosion amount[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(6): 9-14.