

自然降雨条件下坡面侵蚀地表粗糙度的空间异质性

钱秋颖^{1,3}, 秦富仓^{1,2,3}, 李 龙^{1,3}, 杨振奇⁴, 张若曦^{1,3}

(1.内蒙古农业大学沙漠治理学院,呼和浩特 010018;2.内蒙古农业大学林学院,呼和浩特 010018;

3.国家林业局荒漠生态系统保护与修复重点实验室,呼和浩特 010000;4.水利部牧区水利科学研究所,呼和浩特 010020)

摘要: 地表粗糙度是影响地表侵蚀的重要参数之一,也是土壤侵蚀研究的热点问题之一,研究自然降雨过程中砒砂岩区地表粗糙度的空间异质性,对其探索土壤侵蚀响应规律具有重要意义。以裸露砒砂岩为研究对象,采用地统计学和 ArcGIS 空间分析相结合的方法研究了坡面尺度次降雨过程下的地表粗糙度空间异质性特征。结果表明:地表粗糙度在次降雨过程中表现出中等变异性;地表粗糙度在次降雨过程中都具有较强的空间自相关性;由空间分布特征分析得出,地表粗糙度的增加量或者减少量在坡面下坡的数值变化较为明显,说明坡面的变化是坡顶被冲刷,坡底被填充;砂粒和粉粒含量均在坡下减小,而黏粒含量增大,地表粗糙度在坡下数值变化较明显,因此,地表粗糙度的变化随着土壤黏粒的变化而变化;降雨前后土壤黏粒与地表粗糙度表现出正相关,雨后的相关性更强烈,粉粒与其关系不显著,砂粒与其呈现负相关。

关键词: 砒砂岩区; 地表粗糙度; 空间异质性; 土壤粒径

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)03-0046-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.03.007

Spatial Heterogeneity of Surface Roughness of Slope Erosion Under Natural Rainfall

QIAN Qiuying^{1,3}, QIN Fucang^{1,2,3}, LI Long^{1,3}, YANG Zhenqi⁴, ZHANG Ruoxi^{1,3}

(1.College of Desert Control Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University,

Hohhot 010018; 2.Forestry College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018; 3.Key

Laboratory of State Forest Administration for Desert Ecosystem Protection and Restoration, Hohhot 010000;

4.Institute of Water Resources for Pastoral Area of the Ministry of Water Resources of China, Hohhot 010020)

Abstract: Surface roughness is one of the important parameters affecting surface erosion, and it is also one of the hot issues in soil erosion research. It is of great significance to study the spatial heterogeneity of surface roughness in Feldspathic Sandstone Region during natural rainfall to explore the response law of soil erosion. In this paper, the spatial heterogeneity of surface roughness of bare Feldspathic Sandstone Region was studied by geostatistics and ArcGIS spatial analysis. The results showed that: the surface roughness showed a moderate variability during one rainfall event. The surface roughness had a strong spatial autocorrelation during one rainfall event. According to the analysis of spatial distribution characteristics, the increase or decrease of surface roughness was obvious in the downhill of the slope, indicating that the changes of the slope were that the top of the slope was scoured, and the bottom of the slope was filled. The contents of sand and silt particles were decreased, but clay increased. The surface roughness changed more obviously at the bottom slope. Therefore, the surface roughness changed with the changes of soil clay particles. Before and after rainfall, soil clay contents and surface roughness showed a positive correlation, which was more strong after rain. The relationship between silt and surface roughness was not significant, and sand and surface roughness showed a negative correlation.

Keywords: feldspathic sandstone region; surface roughness; spatial heterogeneity; soil particle size

收稿日期: 2020-12-21

资助项目: 国家自然科学基金项目(41807079, 41967008); 2019 年研究生科研创新项目(S20191163Z); 内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0075)

第一作者: 钱秋颖(1996—), 女, 硕士研究生, 主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail: 1062849425@qq.com

通信作者: 李龙(1989—), 男, 副教授, 博士, 主要从事土壤侵蚀及水土保持研究。E-mail: lilongdhr@126.com

地表粗糙度是指地表在比降梯度最大方向上凹凸不平的形态或起伏状况^[1],是影响土壤侵蚀的重要因素之一^[2-4],也是反映地表起伏变化与侵蚀程度的指标,会伴随着侵蚀过程的发生与演变,通过自身的位置变化与消长影响径流产生、径流流向、汇流和径流量^[5],进而影响降雨产生的径流路径、侵蚀类型的演变及侵蚀产沙量的大小^[6-7]。由于地表粗糙度改变了地表土壤的空间起伏特征,进而影响坡面产流机制。郑子成等^[8]对地表粗糙度的研究表明,粗糙坡面在降雨过程中低洼处不同深度积水会导致坡面入渗能力增加,促进土壤水分入渗,从而抑制坡面产流。Wang 等^[9]研究表明,在相同降雨强度条件下,坡面地表粗糙度愈大,地表填洼量愈大,从而坡面产流历时延长,坡面产流量减少。因此,在坡面降雨产流过程中,地表粗糙度通过直接和间接作用共同影响坡面产流过程。

砒砂岩分布区地处黄河中游段,由于其独特的易侵蚀特点,其岩层成岩程度低,沙粒间胶结程度差,结构强度低,遇水如泥、遇风成砂,抗冲刷和抗蚀能力均弱,极易造成水土流失,导致砒砂岩成为黄河主要粗沙来源地之一^[10]。根据地表覆盖物情况,将砒砂岩区分为覆土砒砂岩区、覆沙砒砂岩区、裸露砒砂岩 3 个类型区,裸露砒砂岩是指砒砂岩直接见于地表,上面无黄土、风沙土覆盖,或覆有极薄(0.1~0.5 m)的土(沙),裸露面积超过砒砂岩总面积的 70%,植被稀少,覆盖度极低^[11]。坡面是研究土壤侵蚀的主要对象,在坡面侵蚀过程中,径流携带泥沙的同时也带走土壤养分,使土地生产力降低,土壤质量下降等,进而使环境急速恶化,人地关系紧张。不同地表粗糙度会影响土壤颗粒的分选、搬运,是影响产流、产沙过程的一个重要因子。因此,研究地表粗糙度对微地貌的影响对探究坡面侵蚀的发生发展有重要意义。

本文针对内蒙古鄂尔多斯砒砂岩区侵蚀剧烈、生态环境脆弱的特点,利用三维激光扫描仪等技术手段,结合 ArcGIS 软件,研究坡面水力侵蚀作用下微地貌次降雨的地表粗糙度,以期揭示降雨对微地貌的影响及侵蚀发生发展的动态过程和土壤侵蚀的内在规律,为合理开展水土保持及生态修复工作提供重要科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗西部暖水乡,是典型的砒砂岩地貌,地理坐标为 39°42′—39°50′N,110°25′—110°48′E,海拔 820~1 580 m,属于中温带半干旱大陆性季风气候区,年平均气温 6.5 ℃,多年

平均降水量 400 mm,雨季主要集中在 6—9 月,多年平均日照时间 2 900~3 200 h,无霜期 148 天,年平均风速 3.4 m/s。土壤大部分以黄土为主,伴随砒砂岩景观主要为栗钙土和风沙土,土壤结构疏松,地势起伏较大,沟壑纵横,水土流失严重,自然植被稀疏,以人工植被为主,主要用于防风固沙和水土保持。树种有柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)等。

2019 年 6—9 月于试验基地研究了整个雨季的降雨,其中产生径流泥沙的有效降雨共 6 场(表 1)。降雨量最大可达到 56.4 mm,降雨历时 10 h, I_{30} 为 11.2 mm/h,平均雨强为 5.64 mm/h,降雨量最小为 10.4 mm,降雨历时 24.9 h, I_{30} 为 10.8 mm/h,平均雨强为 0.42 mm/h。

表 1 降雨统计情况

降雨日期 (年-月-日)	降雨 历时/h	降雨量/ mm	I_{30} / (mm·h ⁻¹)	平均雨强/ (mm·h ⁻¹)
2019-07-16	14.3	31.2	26.0	2.2
2019-07-22	8.6	17.0	8.0	2.0
2019-07-28	24.9	10.4	10.8	0.4
2019-08-04	10.0	56.4	11.2	5.6
2019-08-08	8.0	24.6	8.0	3.1
2019-08-20	4.1	22.8	27.2	5.6

1.2 小区布设及测定方法

试验于 2019 年 6 月开始进行,根据当地的实际地形条件,选取坡度为 30°的裸露(无植被覆盖)的坡地,在坡地上设置 1 个规格为 2 m(宽)×5 m(长)的径流小区,小区内为无措施坡地。四周使用 2 块长 5 m,宽 0.5 cm,厚 2.5 mm 的钢板和 1 块长 2 m,宽 0.5 cm,厚 2.5 mm 的钢板打入地下 30 cm 作为隔水墙,地上出露 20 cm,用于分隔小区内外径流,为防止边界渗水,在钢板插入地下时避免边界有植物根系等杂物阻挡并用木槌夯实,夯实过程中应尽量减少对土壤的扰动影响试验结果;小区下设置集流装置,可用于收集径流及泥沙样品(图 1)。降雨前,割除小区内杂草等异物,保证小区内是完全裸露的砒砂岩,根据对研究区坡面砒砂岩以往的历史资料以及前期对坡面砒砂岩进行的试验结果综合参考,采样点选取坡面表层 0—5 cm 的土壤。降雨前后在小区的坡上(A 区:径流小区底端 3 m 处至顶端)、坡中(B 区:径流小区底端 1.5~3 m 处)、坡下(C 区:径流小区底端 1.5 m 处)各平均取 10 个样点,共设 30 个样点,取土进行室内分析。

1.3 三维激光扫描及测量原理

RIEGL VZ-400 三维激光扫描仪是一款近红外激光束快速扫描获取三维点云数据的仪器,具有高速

(发射 300 000 点/s,接收 125 000 点/s)、高精度(2 mm)的特点。测程 600 m,水平方向的扫描范围为 0~360°,垂直方向的扫描范围为 0~270°。

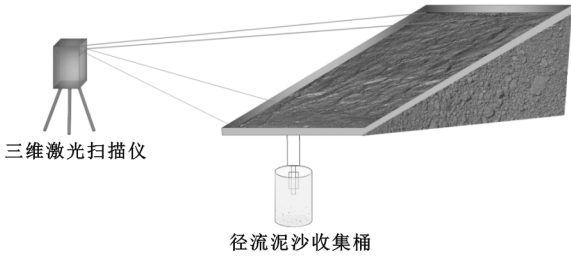


图 1 径流小区布设示意

三维激光扫描仪用三脚架固定在距离径流小区底部的 2 m 处,并对三脚架摆放位置进行标记,三脚架距离地面高度为 105 cm,保证每次扫描条件的一致性,降雨停止 15 min 后,使土壤达到稳态饱和,坡面稳定后对小区内进行扫描,获取地表微地形的点云数据。降雨前和每次降雨后的数据收集完成后,用三维激光扫描仪与其配套的 RISCAN PRO 软件连接,导入点云数据,在软件中对扫描的 668 431 个点云数据进行去噪并生成矢量数据,导出矢量数据到 ArcGIS 软件下构建精度为 1 cm 的地表数字高程模型(M-DEM),并提取地表粗糙度指标。

1.4 数据的处理

1.4.1 土壤侵蚀强度分级 在 ArcGIS 软件平台上,用相邻 2 次降雨 DEM 的高程变化(即 ΔDEM 数值)来对研究区侵蚀强度进行划分。共分为 4 级:0~1 cm 为微度侵蚀;1~2 cm 为轻度侵蚀;2~3 cm 为中度侵蚀;>3 cm 为重度侵蚀区。

1.4.2 土壤粒径 用激光粒度分析仪对小区内所取的土壤样品进行土壤质地分析,仪器的有效粒径范围是 0~2 100 μm,用筛分法筛出<2 mm 粒径的土样进行试验,粒径的分级标准为:黏粒 0~2 μm;粉粒 2~50 μm;砂粒 50~2 000 μm,研究降雨前后土壤粒径的变化情况。

1.4.3 地表粗糙度 地表单元曲面面积与投影面积的比值称为地表粗糙度,其反映的是地表起伏状况的一个虚拟指标^[12-13],利用 ArcGIS 在每个栅格单元表面积与其投影的面积比。根据公式 $\cos \alpha = AC / AB$,如果假设 1 个栅格单元的纵向剖 ABC,α 是这个假设单元的坡度,就可以得出该栅格的表面积就为 AB 面的面积(m²),AC 为投影面积(m²);再根据 $M = AB \text{ 面的面积} / AC$,栅格的面积 = $(AC \cdot AB) / (AC \cdot AC) = 1 / \cos \alpha$ 。在 Spatial Analysis 下使用栅格计算: $1 / \cos((\text{Slope of DEM}) \cdot 3.14159 / 180)$,即可得出地表粗糙度图层。

1.4.4 地表粗糙度的空间异质性分析

半方差函数的公式为:

$$r(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2$$

式中:h 为 2 个样本点空间分隔距离(m);r(h)为 h 的函数值;N(h)为间隔距离等于 h 的样本点的对数;Z(x_i)为空间位置点 x_i处指标的实测值;Z(x_i + h)为空间位置点 x_i + h 处指标的实测值。

半变异函数的拟合模型通常有线性模型(Linear)、球状模型(Spherical)、指数模型(Exponential)、高斯模型(Gaussian)。模型的最优选择可参考决定系数 r²、残差平方和 RSS 以及变程 A 等指标。r²越大,RSS 越小,说明拟合曲线的模型效果越好,越能反映出坡面地表粗糙度的空间异质性^[14]。块金值 C₀表示受不确定因素的影响程度,即随机性变异。基台值 C₀ + C 反映总变异程度。决定系数 r²是决定回归模型拟合优度的一个重要指标。当 r²在 0~0.25 时为弱相关,在 0.25~0.64 为中等相关,>0.64 时为显著相关。变程的大小反映地表粗糙度空间变异性的尺度或空间自相关的尺度。因此,用半变异函数的拟合参数来分析地表粗糙度的空间异质性。

1.4.5 地表粗糙度的空间分布特征分析 地表粗糙度造成的地表高低起伏会影响降雨产生的径流泥沙和侵蚀演变过程^[15]。利用 ArcGIS 的空间分析功能对坡面的 DEM 数据进行克里格插值分析,提取地表粗糙度对坡面的微地形变化进行细化描述,生成研究区次降雨地表粗糙度的空间分布图^[16]。

2 结果与分析

2.1 坡面土壤侵蚀强度分级

侵蚀的强度往往能从侵蚀的深度进行体现,通过 ArcGIS 软件对降雨前后地表高程进行分析,可将高程变化结果看作侵蚀发生的强弱,并以侵蚀的深度分为 5 个等级,即沉积区和 0~1,1~2,2~3,>3 cm 侵蚀区。表 2 中 6 次降雨中第 4 次降雨侵蚀面积最大,像元个数为 17 774,占比 78%,结合降雨强度来看,第 4 次降雨的雨强最大,为 5.64 mm/h。6 次降雨侵蚀深度均在 0~1 cm 的像元个数最多,表明降雨侵蚀对地表产生较大影响。

2.2 6 次降雨坡面地表粗糙度基本统计特征分析

运用 SPSS 统计方法对地表粗糙度进行描述性统计分析,获取标准方差(反映地表粗糙度的分布情况)和变异系数 CV(反映地表粗糙度分布的空间变异程度和离散程度),以此来衡量地表粗糙度的空间变异程度,从而来描述整个小区降雨前后土壤微地貌

的侵蚀变化情况。当 $CV \leq 10\%$ 时,为弱变异性;当 $10\% < CV < 100\%$ 时,为中等变异性;当 $CV \geq 100\%$ 时,为强变异性。其中,均值能反映变量的绝对变异,变异系数能反映变量的相对变异(表 3)。

表 2 次降雨土壤侵蚀情况

降雨次数	总沉积区/ 个像元	侵蚀强度				总侵蚀区 (像元)/个	侵蚀区面积 占比/%	土壤侵蚀 强度
		0~1 cm	1~2 cm	2~3 cm	>3 cm			
R ₁	7009	15575	19	0	0	15594	69	轻度
R ₂	17470	5219	0	0	0	5219	23	微度
R ₃	13748	8973	0	0	0	8973	39	微度
R ₄	4973	17617	129	25	3	17774	78	重度
R ₅	9274	9610	8	0	0	9618	51	轻度
R ₆	7919	10838	52	68	5	10963	58	重度

注:R₁、R₂、R₃、R₄、R₅、R₆分别代表第 1,2,3,4,5,6 次降雨;0~1 cm 为微度侵蚀,1~2 cm 为轻度侵蚀,2~3 cm 为中度侵蚀,>3 cm 为重度侵蚀。

由表 3 可知,次降雨的地表粗糙度表现出先增大后减小再增大的趋势,6 场降雨过后地表粗糙度有了明显的增大,表明地表粗糙度的演变与次降雨有关。第 6 次降雨的粗糙度由原坡面的 2.49 变到 2.66,增长了 6.8%。标准方差在 0.07~0.27 变化,说明地表粗糙度在整体上分布较均匀;另外,从 CV 来看,第 5 次降雨的 CV 大于 10%,其他次降雨的 CV 均小于 10%,整体来看,坡面地表粗糙度的空间变异属于弱变异强度。

表 3 地表粗糙度的基本统计特征值

降雨次数	最小值	最大值	均值	标准方差	变异系数 CV/%	分布类型
原裸坡	1	5.24	2.49	0.21	8.34	正态分布
R ₁	1	5.35	2.53	0.12	4.67	正态分布
R ₂	1	5.62	2.62	0.14	5.28	正态分布
R ₃	1	4.82	2.35	0.13	5.41	正态分布
R ₄	1	5.00	2.41	0.07	2.83	正态分布
R ₅	1	5.03	2.43	0.27	10.96	正态分布
R ₆	1	5.74	2.66	0.13	4.80	正态分布

2.3 6 次降雨坡面地表粗糙度空间结构特征分析

坡面的相对高程既有随机性,又在空间范围内存在

相关性,借助 GS+地统计学半变异函数来分析微地貌地表粗糙度的空间变异结构特征,以选取最优模型和参数。次降雨的地表粗糙度拟合半变异函数,结果以 Spherical 模型和 Gaussian 模型参数最佳(表 4)。

研究区的 C₀很小,表示坡面土壤粗糙度由随机因素引起的空间异质性很小;次降雨地表粗糙度基台值的变化是先增加后降低的趋势,说明坡面土壤粗糙度的空间变异程度在降低,空间相关性在增强。拟合最优函数的 r²均大于 0.64,属于显著相关关系,说明随着微地貌侵蚀的不断演化,次降雨的地表粗糙度的演化过程均可以用半变异函数拟合模型进行模拟,结合结构比 C/(C₀+C),次降雨的数值均大于 75%,说明次降雨的侵蚀与坡面地表粗糙度有高度的自相关性。

随着次降雨侵蚀的不断进行,降雨后的地表粗糙度变程变大,由 0.413 m 变为 0.736 m,说明坡面地表粗糙度的空间连续性增强。地表粗糙度的基底效应值远小于 25%,表明次降雨地表粗糙度的变化主要是由结构因素引起的,随机因素对地表粗糙度的变化影响较小。

表 4 地表粗糙度的半变异函数拟合模型特征值

降雨次数	拟合模型	C ₀	C ₀ +C	A/m	RSS	r ²	C/(C ₀ +C)	C ₀ /(C ₀ +C)
原裸坡	Gaussian	1×10 ⁻⁴	0.0162	0.413	0.342×10 ⁻⁴	0.939	0.999	6.840×10 ⁻⁴
R ₁	Gaussian	1×10 ⁻⁴	0.0130	0.434	0.769×10 ⁻⁴	0.960	1.000	7.716×10 ⁻⁴
R ₂	Spherical	1×10 ⁻⁴	0.0179	0.499	1.509×10 ⁻⁴	0.779	0.999	5.599×10 ⁻⁴
R ₃	Spherical	1×10 ⁻⁴	0.0175	0.518	0.134×10 ⁻⁴	0.715	0.999	5.708×10 ⁻⁴
R ₄	Spherical	1×10 ⁻⁴	0.0167	0.555	1.283×10 ⁻⁴	0.765	1.000	5.990×10 ⁻⁴
R ₅	Gaussian	1×10 ⁻⁴	0.0153	0.579	0.124×10 ⁻⁴	0.675	0.998	6.536×10 ⁻⁴
R ₆	Spherical	1×10 ⁻⁴	0.0150	0.736	0.226×10 ⁻⁴	0.841	0.999	6.667×10 ⁻⁴

2.4 6 次降雨坡面地表粗糙度空间分布特征分析

图 2 为原始坡面和 6 次降雨后地表粗糙度的变化情况,地表粗糙度在雨滴作用下其变化规律不一致,在几次降雨对地表进行冲刷后,粗糙度总体呈现逐渐增大的趋势,从 DEM 图像可以看出,粗糙度的

增加量或者减少量在坡面下坡的数值变化较为明显,说明坡面的变化是坡顶被冲刷,坡底略有沉积。经历过 6 场降雨之后,粗糙度在 1.17~1.31 的面积明显增多,粗糙度在 1.31~1.96 的数值面积增大。结合降雨强度来看,第 3 次降雨的降雨量和降雨强度较小,

分别为 10.4 mm 和 0.4 mm/h,其地表粗糙度的数值也相对较小,为 2.35,第 4 次降雨的降雨量和降雨强度较大,分别是 56.4 mm 和 5.6 mm/h,地表粗糙度也相应增大,为 2.41,土壤侵蚀强度由微度变为重度,说明降雨使坡面微地貌发生变化,进而影响坡面侵蚀的强度。

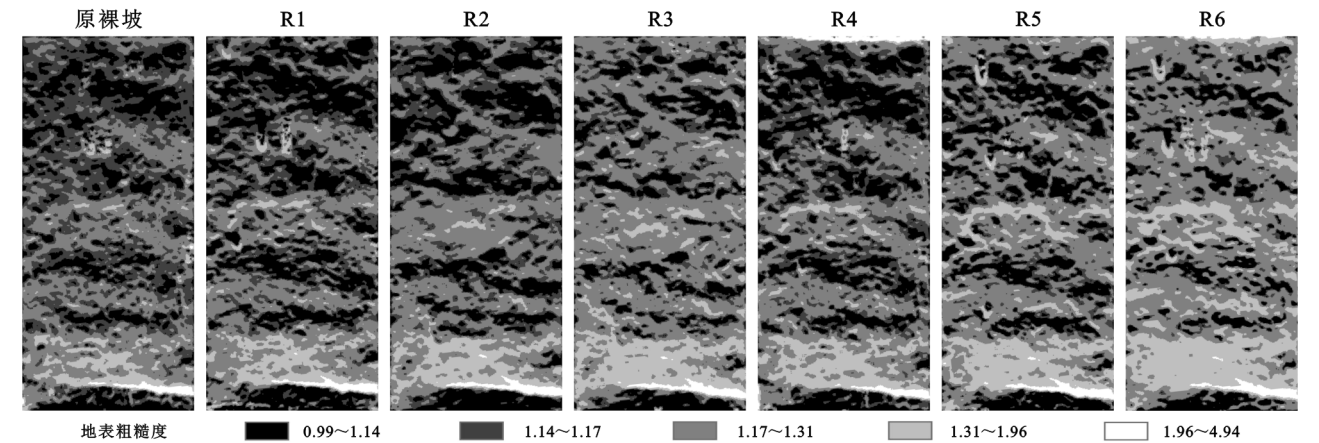


图 2 次降雨地表粗糙度空间

2.5 土壤粒径与地表粗糙度相关性分析

土壤颗粒不同的形态和数量反映了土壤中不同径级土粒的分布情况^[17]。由图 3 可知,坡面土壤机械组成以砂粒和粉粒为主,黏粒含量最少。6 次降雨后土壤粒径在坡上的变化都不大,砂粒含量在坡中增大了 18.28%,坡下减小了 2.90%;粉粒在坡中的含量增大了 6.82%,坡下的含量减小了 1.48%;黏粒在坡中其含量减小了 2.6%,坡下增大了 1.03%,砂粒和粉粒含量均在坡下减小,而黏粒含量增大,土壤颗粒随着径流从坡中到坡下,而地表粗糙度在坡下变化最大,数值增大,因此,地表粗糙度的变化随着土壤粒径的黏粒变化而变化。结合地表粗糙度与土壤机械组成的相关性(表 5),降雨前后土壤黏粒与地表粗糙度表现出正相关关系,雨后的相关性更强烈。粉粒与其关系不显著,砂粒与其呈现负相关。

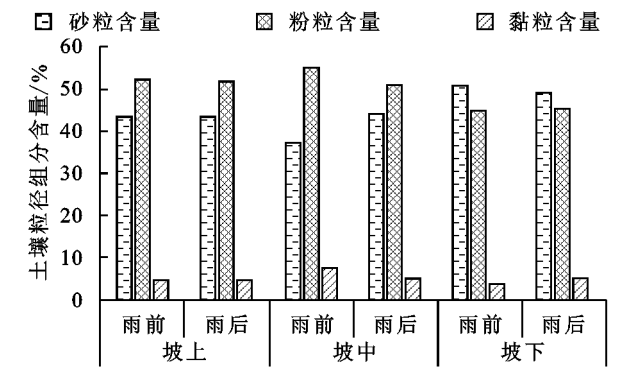


图 3 土壤颗粒组成

3 讨论

3.1 自然降雨对地表粗糙度的影响

坡面侵蚀不仅和降雨时间有关,降雨量和降雨强

度也影响着侵蚀的强弱。降雨量越大,雨强越大,对地表的击打作用越强,径流量越大,对坡面细沟下切和泥沙搬运的能力越强,随着降雨次数的增多,地表土粒凸起和凹陷越多,地表粗糙度会变大,凸起的土粒易被径流携带至坡底沉积,地表微地貌变化越明显,对侵蚀的响应更强。本研究中,地表粗糙度随着降雨量和降雨强度的变化而变化,图 4 中第 3 次降雨的降雨量和降雨强度较小,故地表粗糙度也减小,第 4 次降雨的降雨量和降雨强度较大,地表粗糙度也相应增大,这与杨坪坪等^[18]的降雨雨强和地表粗糙度呈正比的结果相一致。研究中地表粗糙度变化与降雨侵蚀发生发展过程有很好的一致性,与一些学者^[8,19]的研究结果类似,验证了本研究的可行性与可靠性。因此,降雨量和降雨强度影响着坡面地表粗糙度的变化,进而影响微地貌的动态变化。

表 5 地表粗糙度与土壤机械组成相关性

降雨前后	项目	地表粗糙度	黏粒	粉粒	砂粒
雨前	地表粗糙度	1.000	0.270 *	0.130	-0.260
	黏粒	0.270 *	1.000		
	粉粒	0.130		1.000	
	砂粒	-0.260			1.000
雨后	地表粗糙度	1.000	0.339 * *	0.202	-0.210
	黏粒	0.339 * *	1.000		
	粉粒	0.202		1.000	
	砂粒	-0.210			1.000

注: * 表示在 0.05 水平相关性显著; * * 表示在 0.01 水平相关性显著。

3.2 地表粗糙度空间动态变化对微地貌的影响

在裸露地表上,降雨侵蚀可以造成微地形的变化,由于降雨过程中,雨滴打击和坡面径流的冲刷、搬运和沉积作用使得坡面土块和团聚体的大小和位置发生改变,使其减小或增大土壤表层的高程及其高程差异,但在不同条件下作用各异。本研究中,坡面上方侵蚀的泥沙随着径流向坡面中下部沉积,致使地表高程增大,面积占比较大,而地表高程变化范围较小,这一结果与罗键等^[20]对横垄坡面微地形的变化特征研究结果一致。地表凸出的区域易受到径流

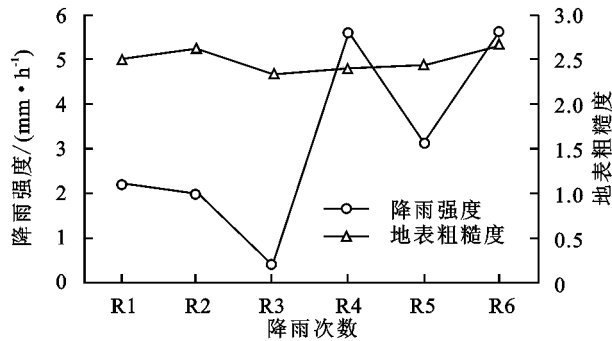


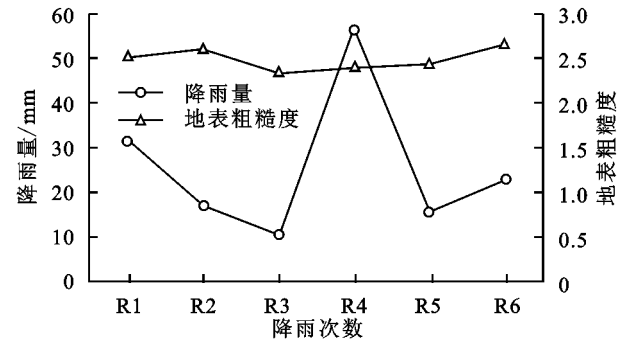
图 4 降雨强度、降雨量与地表粗糙度的关系

地表粗糙度体现了微地貌垂直方向上的变化,其大小具有空间依赖性。本研究中,小区坡面在次降雨过程中地表粗糙度值先增大后减小再增大,而降雨前后的变异系数和空间自相关数值均减小,说明降雨导致的水力侵蚀降低了坡面地表粗糙度的空间变异程度。也就是说,当降雨到达坡面时,雨滴的击溅作用增强,导致前期形成的结皮受到不同程度的破坏。而薄层水流的形成与发展导致坡面径流趋于集中,随着水深加大,径流流速增加,径流剪切力增强,增加了对坡面地表的冲刷作用,从而导致地表粗糙度逐渐增加。随着降雨时间的延长,坡面产流后,不断受到雨滴打击后凸起的部分土粒被溅散,而凹陷部分被楔入土粒填塞土壤孔隙,导致地表变得越来越密实。随着坡面地表土块和团聚体的破碎,结皮的形成以及结皮面积的增加,地表变得越来越光滑,以削高填低的趋势,地表粗糙度的变化就变得平缓,地表粗糙度降低。张震等^[21]也有相似的研究结果,侵蚀过程中,坡面的某些坡段会产生空间变异性,从而消减侵蚀,使得地表粗糙度减小。因此,地表粗糙度的空间变化影响着坡面微地貌的变化,影响着侵蚀的发生发展方向。

3.3 土壤粒径对土壤粗糙度的影响

土壤粒径的分布情况包含了土壤颗粒的结构信息,根据黄冠华等^[22]的研究结果表明,土壤质地越细,黏粒含量越高,土壤越不易被侵蚀,而本研究的砒砂岩地区土壤粒径整体较粗^[13],黏粒含量较少,土壤

冲刷,此处的高程值不断降低,水流侵蚀的泥沙迁移到低陷处堆积,致使高程值不断增高,坡面细沟随着次降雨的冲刷侵蚀,其深度和数量不断增加,坡面泥沙呈现回填的趋势,因此造成最后 2 次降雨高程变化范围减小。从 6 次降雨地表粗糙度的空间分布可以看出,坡面地表侵蚀面积较大,而高程值变化较小,这与张莉等^[14]对坡面水蚀过程中地表粗糙度的空间异质性研究结果相似,随着水流的侵蚀,坡面地表侵蚀面积较大,且地表粗糙度的空间分布呈现较为连续的斑块状。



抗蚀能力较弱。石迎春等^[23]研究认为,基岩的颗粒粒径与岩石的抗侵蚀能力关系密切,大小不均的砒砂岩颗粒削弱了砒砂岩的抗侵蚀能力。坡面降雨前后土壤黏粒和地表粗糙度具有显著的正相关关系,次降雨的冲刷侵蚀导致土壤颗粒空间分布的随机性较大。由图 3 可知,6 次降雨过后,坡上和坡中的黏粒大量流失,随着径流被带到坡下堆积富集,地表粗糙度数值也相应减小。综上,地表粗糙度可能是被土壤黏粒的随机糙度所影响。

4 结论

(1)由描述性统计特征分析得出,砒砂岩区坡面地表粗糙度标准方差在 2.14~2.68 变化,说明地表粗糙度在整体上分布比较均匀,坡面地表粗糙度的变异系数在次降雨过程中均具有中等的空间变异性,即随着次降雨不断侵蚀,对裸露坡面地表粗糙度的空间变异程度影响越来越大。

(2)从空间结构来看,空间变异参数 $C_0/(C_0+C)$ 均小于 0.25,次降雨的地表粗糙度与降雨具有较强的空间自相关性。次降雨地表粗糙度的变化主要是由结构因素引起的,随机因素对地表粗糙度的变化影响较小。

(3)由空间分布特征分析得出,地表粗糙度的增加量或者减少量在坡面下坡的数值变化较为明显,说明坡面的变化是坡顶被冲刷,坡底被填充。前 4 次降雨在图中呈现明显的斑块状分布,后 2 次降雨空间分

布较为简单,呈现连续的分布状况,表明随着次降雨的不断侵蚀,会对地表粗糙度的变化产生影响。

(4)研究区土壤颗粒以砂粒和粉粒为主,黏粒含量最少。砂粒和粉粒含量均在坡下减小,而黏粒含量增大,地表粗糙度的变化随着土壤粒径的黏粒变化而变化。降雨前后土壤黏粒与地表粗糙度表现出正相关关系,雨后的相关性更强烈。粉粒与其关系不显著,砂粒与其呈现负相关。

参考文献:

[1] 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.

[2] 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.

[3] 何淑勤,秦凤,宫渊波,等.横垄坡面地表粗糙度的变化特征及其对片蚀的响应[J].水土保持学报,2018,32(1):54-58.

[4] 王国鹏,肖波,李胜龙,等.黄土高原水蚀风蚀交错区生物结皮的地表粗糙度特征及其影响因素[J].生态学杂志,2019,38(10):3050-3056.

[5] 王林华,汪亚峰,王健,等.地表粗糙度对黄土坡面产流机制的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):120-128.

[6] 张娜娜,王兵,张宝琦,等.地表糙度测定方法研究[J].水土保持学报,2020,34(1):135-140,148.

[7] 夏积德,吴发启,张青峰,等.基于 GIS 技术的降雨对微地形地表粗糙度的影响[J].水资源与水工程学报,2016,27(4):75-80.

[8] 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.

[9] Wang L H, Dalabay N, Lu P, et al. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall

[J].Soil and Tillage Research,2017,166:147-156.

[10] 肖培青,吕锡芝,张攀.黄河流域水土保持科研进展及成效[J].中国水土保持,2020(10):6-9,82.

[11] 王愿昌,吴永红,寇权,等.砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J].中国水土保持科学,2007,5(1):14-18.

[12] 罗键,郑子成,李廷轩,等.横垄坡面地表微地形多重分形特征及其对侵蚀产沙的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):66-72.

[13] 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.

[14] 张莉,张青峰,徐健,等.坡面水蚀过程中地表粗糙度的空间异质性研究[J].水土保持研究,2014,21(2):6-10,16.

[15] 王添,任宗萍,李鹏,等.模拟降雨条件下坡度与地表粗糙度对径流产沙的影响[J].水土保持学报,2016,30(6):1-6.

[16] 李龙,姚云峰,秦富仓,等.半干旱区县域尺度土壤有机碳的空间变异特征[J].生态学杂志,2016,35(8):2003-2008.

[17] 罗雅曦,刘任涛,张静,等.腾格里沙漠草方格固沙林土壤颗粒组成、分形维数及其对土壤性质的影响[J].应用生态学报,2019,30(2):525-535.

[18] 杨坪坪,王云琦,张会兰,等.降雨强度和单宽流量与地表粗糙度交互作用下坡面流阻力特征[J].农业工程学报,2018,34(6):145-151.

[19] 赵龙山,侯瑞,吴发启,等.水蚀过程中裸露陡坡耕地土壤侵蚀特征[J].水土保持学报,2018,32(1):74-79.

[20] 罗键,尹忠,郑子成,等.不同降雨条件下紫色土横垄坡面地表微地形变化特征[J].中国农业科学,2016,49(16):3162-3173.

[21] 张霞,贾莲莲,李占斌,等.模拟降雨条件下地表粗糙度动态变化特征研究[J].水土保持研究,2012,19(4):16-20,29.

[22] 黄冠华,詹卫华.土壤颗粒的分形特征及其应用[J].土壤学报,2002,39(4):490-497.

[23] 石迎春,叶浩,侯宏冰,等.内蒙古南部砒砂岩侵蚀内因分析[J].地球学报,2004,25(6):659-664.