

砒砂岩区坡面微地貌变化与侵蚀产沙的响应关系

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

(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.荒漠化生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 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:为了定量描述坡面微地貌变化与侵蚀的响应关系,通过三维激光扫描仪,以严重侵蚀的砒砂岩区裸露坡面为研究对象,在自然降雨条件下进行野外原位监测,试验分析了两个雨季 13 次有效降雨下坡面微地貌与坡面侵蚀的空间变化特征。结果表明:(1) 13 次降雨中,重度侵蚀 3 次、中度侵蚀 5 次、轻度侵蚀 3 次、微度侵蚀 2 次,且均与降雨强度密切相关。(2) 各地形因子均在 R_4 降雨时达到变化峰值,且其变化规律因坡位不同而有所差异,其中坡中与坡下变化规律基本一致,而上坡部地形因子波动起伏较为明显。(3) 各地形因子间均存在一定的相关性,且坡位不同与产流产沙关系也不尽相同,其中产流量与微坡度相关性显著,随着坡位越靠下相关性越强。产沙量则在坡上及坡中与地表粗糙度表现为极显著相关,在下坡部与地表起伏度呈现出极显著相关。综上,坡面微地貌的变化一定程度上可以反映坡面侵蚀强度。

关键词:砒砂岩区; 坡面; 微地貌; 侵蚀产沙

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)06-0021-07

Responses of Slope Micro-geomorphology to Erosion and Sediment Yield in Arsenic Sandstone Area

ZHANG Ruoxi¹, QIN Fucang^{1,2}, LI Long^{1,3}, YANG Zhenqi⁴, QIAN Qiuying¹

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

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

3.Key Laboratory of State Forest Administration for Desert Ecosystem Protection and Restoration, Hohhot 010000, China;

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

Abstract:In order to quantitatively describe the response relationship between slope micro-geomorphology change and erosion, based on the 3D laser scanner, this paper takes the exposed slope in the arsenic sandstone area which is severely eroded as the research object. The situ field monitoring was carried out under the condition of natural rainfall, the spatial variation characteristics of slope micro-topography and slope erosion were analysed under 13 effective rainfall in two rainy seasons. The results showed that:(1) There were 3 times more severe erosion, 5 times more moderate erosion, 3 times more light erosion and 2 times more slight erosion, and all of them were closely related to rainfall intensity. (2) All the topographic factors reached their peak values during R_4 rainfall, and the change rules varied with different slope positions. The change rules of the middle slope and the lower slope were basically the same, while the fluctuation of the topographic factors on the upper slope was more obvious. (3) There is a certain correlation among all the topographic factors, and different slope positions have different relationships with sediment yield, abortion and sediment yield. The correlation between runoff yield and gradient is significant, and the correlation is stronger with the lower slope position. The sediment yield was significantly correlated with surface roughness

收稿日期:2021-09-23

修回日期:2021-10-06

资助项目:内蒙古自治区研究生科研创新项目(SZ2020085);中央引导地方科技发展资金项目(2021ZY0023);内蒙古自治区科技计划项目(2020GG0075);内蒙古自治区自然科学基金重大项目(2021ZD07);2022 年度内蒙古自治区高校青年科技英才项目(NJYT22046)

第一作者:张若曦(1997—),女,内蒙古乌兰察布人,在读硕士,研究方向为水土保持与荒漠化防治。E-mail:15624746723@163.com

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

on the upper slope and on the middle slope, and with surface relief on the lower slope. To sum up, the change of slope micro-geomorphology can reflect the intensity of slope erosion to a certain extent.

Keywords: pisha sandstone areas; slope; micro geomorphology; erosion sediment

微地貌作为表征地表起伏变化与侵蚀强度的主要指标,在一定程度上对土壤侵蚀有重要的影响^[1],其通常表现为较小范围内地表相对高程的起伏变化,其范围一般不超过 5~25 cm^[2]。在水蚀过程中,坡面为最基本的单元^[3],侵蚀坡面在雨滴击溅及径流冲刷的作用下发生洼地蓄水、泥沙沉积等现象,进而导致坡面微地貌的重塑,同时微地貌的变化也在影响着整个水蚀过程^[4]。在各次降雨期间,微地貌通过自身的位置变化及消长等空间分布特征对径流汇流、流向等产生影响,间接造成了坡面侵蚀量改变^[5],进而影响了侵蚀类型的改变及侵蚀程度^[6]。坡面径流量及侵蚀产沙量全都取决于坡面微地貌的变化特征,微地貌重塑不仅仅是侵蚀产生的最终结果,也是造成侵蚀加速发展的首要原因^[7]。有研究认为微地貌对土壤侵蚀存在促进^[8]和阻碍两种作用,也有研究表明在降雨过程中,微地貌变化对土壤侵蚀的增减作用同时存在,且微地貌重塑与侵蚀的增减效益始终保持动态平衡^[9]。李清溪等^[10]通过人工模拟降雨试验并结合近景摄影测量技术,探讨了光滑坡面及粗糙坡面中 4 个坡面微地貌因子与侵蚀产沙的关系。目前,三维激光扫描仪的使用已经得到普及,在恶劣环境下能够对坡面微地貌进行高精度的获取,并准确提取坡面微地貌因子,弥补了传统测量方法对建立坡面微地貌与坡面产流产沙关系的欠缺。张建文等^[11]通过人工模拟降雨试验并结合了三维扫描技术,探究了不同覆沙厚度下坡面的微地貌变化与产流产沙之间的响应关系。近几年,关于坡面微地貌变化的研究多为理想状态下的模拟降雨试验,而自然条件下坡面侵蚀多在不同雨强交叉下的连续降雨中变化,次降雨后所产生的坡面微地貌变化会继续影响下一次降雨侵蚀过程。所以,研究自然降雨侵蚀过程中坡面微地形变化与产流产沙特征是揭示坡面真实侵蚀机理的重要环节。

砒砂岩区集中分布在我国黄土高原北部晋陕蒙交界地带,大环境属于黄土丘陵沟壑区,其岩层松散,抗蚀性极差,造成了严重的侵蚀产沙。该区以水力侵蚀为主,总面积为 $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,虽然只占黄河流域面积的 2%,但平均每年向黄河输沙高达 $2.0 \times 10^8 \text{ t}$,其中输送粒径 $>0.05 \text{ mm}$ 的粗沙约占总输沙量的 50%,是黄河主要粗沙来源区,黄河中下游泥沙不断淤积使河床抬高,严重威胁了生态环境和人们的生活^[12]。近年来,对砒砂岩区裸露坡面侵蚀产沙的

研究多以水动力学角度^[13]、利用 WEPP 模型^[14]及与植被覆盖坡面进行对比^[15],对坡面本身微地貌的变化进行高精度的分析还鲜有人关注。因此,本文以砒砂岩区坡面径流小区为研究对象,结合三维激光扫描仪对其进行自然降雨条件下野外原位监测,分析降雨前后坡面微地貌空间变化特征,揭示坡面微地貌因子与侵蚀产沙的相关关系,为揭示微地貌对坡面土壤侵蚀的影响机理提供参考。

1 研究区概况

研究区坐落于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗暖水镇鲍家沟流域($110^{\circ}31'—110^{\circ}35'E$, $39^{\circ}46'—39^{\circ}48'N$)。海拔高度为 1 145~1 330 m,地形分布北部较高,南部偏低,主要地带性土壤为栗钙土。该区为典型大陆性气候,年平均气温为 6~9℃,昼夜温差大,冬季寒冷干燥且时令长,夏季炎热且时令短。年均降水量 400 mm,降雨类型多为暴雨,侵蚀强度大,多集中分布在夏季(7—8月),占全年总降雨量的 3/4。无霜期为 100~140 d,日照充足,年均风速 2~4 m/s。土壤基岩以砒砂岩为主,大部分为栗钙土,有机质含量较少。主要植被为松科的油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)、豆科的柠条(*Caragana korshinskii* Kom.)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* Linn.)、羊草[*Leymus chinensis* (Trin.) Tzvel]、猪毛菜(*Salsola collina* Pall.)以及其他沙生类植物、沼泽草甸和退化的草地。

2 材料与方法

2.1 试验设计

本试验于 2019 年 6 月 30 日开始准备,根据研究区地形条件,选取坡度为 30°,规格为 2 m(长)×5 m(宽)的径流小区进行野外原位观测,观测时间为 2019—2020 年两个雨季(6—8 月),共监测到产生径流和泥沙的有效降雨 13 场(表 1)。试验开始前将径流小区内植被剔除,为无措施裸地,小区旁设有固定雨况监测点,降水过程采用虹吸式自制雨量计进行监测,并配有相互校验的雨量筒,记录每次降雨的基本数据。小区下方设置集流装置来收集径流泥沙。降雨前与每次降雨后 15 min 坡面达到稳渗均使用三维激光扫描仪(奥地利, RIGEL-400)对坡面状态进行扫描,此仪器 100 m 范围内扫描精度为 3 mm,将仪器固定在距径流小区底部 2 m 平地处,设置扫描范围

为 0°~180°,为保证每次扫描的一致性,对扫描仪架设位置及三脚架高度均进行标记。

表 1 各场降雨基本特征

编号	降雨时间 (年-月-日)	降雨 历时/min	降雨量/ mm	$I_{30}/$ (mm·h ⁻¹)	降雨强度/ (mm·min ⁻¹)
R ₁	2019-07-16	862	31.2	26.0	0.036195
R ₂	2019-07-22	517	17.0	8.0	0.032882
R ₃	2019-07-28	1495	10.4	10.8	0.006957
R ₄	2019-08-04	597	56.4	11.2	0.094472
R ₅	2019-08-10	479	24.6	10.4	0.051357
R ₆	2019-08-20	244	22.8	27.2	0.093443
R ₇	2020-07-09	180	13.6	4.8	0.075556
R ₈	2020-07-10	244	12.0	6.6	0.049180
R ₉	2020-07-12	856	32.0	10.2	0.037383
R ₁₀	2020-07-14	25	8.4	8.4	0.336000
R ₁₁	2020-07-17	117	12.4	3.8	0.105983
R ₁₂	2020-08-12	85	10.8	3.2	0.127059
R ₁₃	2020-08-23	263	24.8	6.0	0.094297

2.2 数据处理及分析

次降雨后坡面产沙量采用烘干法进行测定,径流量则为自制铁皮集流桶所测量得出径流体积。采用 RiSCAN_PRO 软件对扫描所得坡面点云数据进行去噪、拼接及裁剪等处理,生成坡面三维点云坐标并导出。通过 ArcGIS 10.2 软件的 Topo To Raster 工具生成坡面微地貌高精度数字高程模型(M-DEM)。根据高程值进行重分类,划分出侵蚀区与沉积区并提取侵蚀强度。单一地形因子不能全面描述坡面微地貌变化,故本研究选取了 4 个具有代表性的常规地形因子(微坡度、地表粗糙度、地表起伏度及地表切割深度)来表征坡面微地貌特征^[16],计算方法如下:

(1) 微坡度(S)是指局部地表在该点的倾斜程度,该值的大小能够影响坡面物质迁移与能量转化的规模大小。通过 ArcGIS 中的坡度函数来提取。

(2) 地表粗糙度(R)是指坡面 DEM 中每个单元栅格的表面积与投影面积的比值,用来表征坡面微地貌的起伏程度。采用 ArcGIS 中栅格计算器进行计算,公式为:

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

式中:R 为地表粗糙度;S 为所提取坡度。

(3) 地表起伏度(RA)是指坡面所有栅格中最大高程值与最小高程值的差,是反映坡面微地貌特征的重要指标,也是用于地貌形态划分的重要参考指数。采用 ArcGIS 中邻域分析工具进行提取。

$$RA=H_{\max}-H_{\min}$$

式中:RA 为地表起伏度;H_{max} 为最大高程值(m);H_{min} 为最小高程值(m)。

(4) 地表切割深度(SI)是指坡面所有栅格中平

均高程值与最小高程值的差。能够表征地表被侵蚀切割的程度,是反映地表侵蚀发育情况的重要参考指数。采用 ArcGIS 中邻域分析工具进行提取。

$$SI=H_{\text{mean}}-H_{\text{min}}$$

式中:SI 为地表切割深度;H_{mean} 为平均高程值(m);H_{min} 为最小高程值(m)。

各坡位地形因子均在 ArcGIS 中进行重分类后区域分析工具中提取,统计分析在 SPSS 软件中进行,采用 Pearson 相关分析法对数据进行相关分析,绘图采用 ArcGIS 10.2 及 Origin 2019。

3 结果与分析

3.1 坡面侵蚀强度

降雨侵蚀可以明显改变地表高程,使坡面得到重塑,进而体现出坡面的侵蚀强度。两个雨季中,各次降雨作用后地表高程的变化可将坡面划分出侵蚀区与沉积区,侵蚀区依据侵蚀深度将其分为 0~1 cm 微度侵蚀、1~2 cm 轻度侵蚀、2~3 cm 中度侵蚀及>3 cm 的重度侵蚀。由表 2 可知,两个雨季 13 次有效降雨中,有 2 次降雨为微度侵蚀,3 次降雨侵蚀强度为轻度,5 次降雨表现为中度侵蚀,3 次降雨表现为重度侵蚀。各次降雨侵蚀强度均表现为在 0~1 cm 微度侵蚀中像元个数最多,其中第 8 次降雨侵蚀面积最小,像元数为 106 个,占整个坡面的 6.2%;第 9 次降雨侵蚀面积最大,像元数为 14 650 个,占比 85%,均属于中度侵蚀。图 1 为两个雨季过后坡面总体侵蚀情况,由图 1 可知,坡面侵蚀强度为轻度侵蚀,且沉积区多分布于上坡部,坡下少量分布,侵蚀区多集中在坡中与坡下且面积远大于沉积区。

3.2 坡面微地貌变化特征

在水蚀过程中,微地貌会始终伴随着降雨的发生与演变,而微地貌因子随降雨的变化情况可以反映坡面的侵蚀特征,本文选取了可以表征微地貌变化特征的 4 个代表性因子,分别为地表粗糙度、地表起伏度、地表切割深度与微坡度。两个雨季结束后,初始坡面与第 13 次降雨后微地貌因子变化特征见图 2,降雨前坡面较为平整均一,由于降雨前存在较强的坡面异质性,使得坡下较上坡部及中坡部各地形因子值更大,呈现在图中表现为零星斑块破碎化。降雨后各地形因子均增大,且最大值均分布于上坡边缘部及下坡右边缘处,坡面破碎化严重,贯穿整个坡面。表明微地形随着降雨的推动,不断发育,使坡面发生侵蚀得到重塑。由于坡面沉积区与侵蚀区在坡位角度上有明显的区分,故从坡位角度上来研究各坡位地形因子在 13 次降雨过程中的变化特征(图 3)。降雨前坡面

上、中、下各坡位初始微地形因子分别为地表粗糙度 1.162, 1.183, 1.287, 地表起伏度为 0.025, 0.027, 0.034 m, 地表切割深度表现为 0.013, 0.014, 0.017 m, 微坡度表现为 30.052°, 31.623°, 35.663°, 均呈现出由坡上至坡下依次显著增大。随着降雨次数的增加, 各坡位地形因子总体表现出上升趋势, 降雨后各坡位地形因子变化为地表起伏度 0.041, 0.034, 0.038 m 较雨前分别增加了 64%, 26%, 12%。地表切割深度表

现为 0.020, 0.017, 0.019 m, 较雨前初始切割深度增加了 54%, 21%, 12%。微坡度较雨前分别增加了 12%, 7%, 4%, 表现为 33.597°, 33.984°, 37.118°。而地表粗糙度在坡上及坡中表现为增加, 分别是 1.329, 1.222, 较雨前增加了 14%, 3%, 在坡下表现为减小。地表粗糙度、地表起伏度及地表切割深度均在上坡部波动起伏较为明显, 而坡中及坡下起伏较缓, 变化趋势基本一致。

表 2 次降雨下坡面侵蚀情况

降雨场次	总沉积区 像元个数/个	0~1 cm 侵蚀 像元个数/个	1~2 cm 侵蚀 像元个数/个	2~3 cm 侵蚀 像元个数/个	>3 cm 侵蚀 像元个数/个	总侵蚀区 像元个数/个	侵蚀区 面积占比/%	土壤侵蚀 强度
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
R ₇	6372	12347	67	0	0	12414	66.1	轻度
R ₈	17106	96	9	1	0	106	6.2	中度
R ₉	2575	14624	24	2	0	14650	85	中度
R ₁₀	12207	4573	40	37	1	4651	27.6	重度
R ₁₁	10195	6616	11	2	0	6629	39.4	中度
R ₁₂	6931	10952	276	19	0	11247	61.9	中度
R ₁₃	14206	3919	17	9	0	3945	21.7	中度

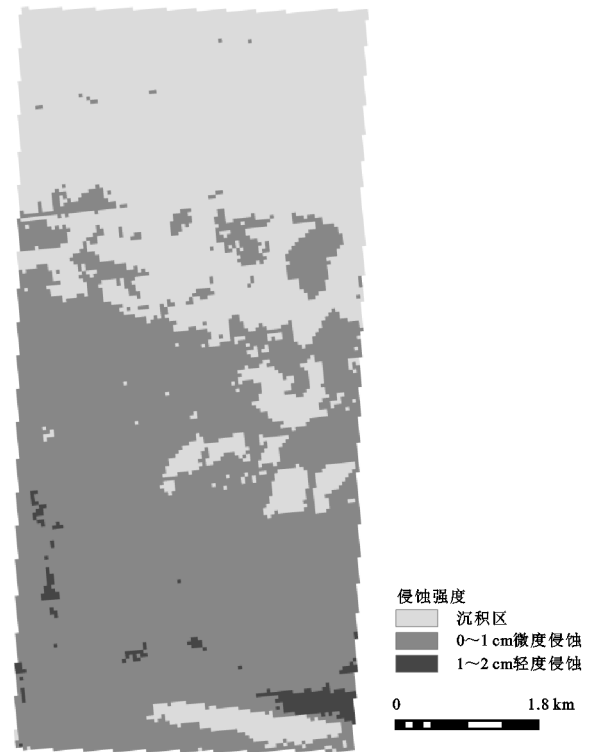


图 1 两个雨季侵蚀强度

3.3 坡面产流产沙特征

两个雨季 13 次降雨下坡面侵蚀产沙变化特征见图 4, 径流量在 R₄ 时达到最大值, 为 65 L; 在 R₂ 时为

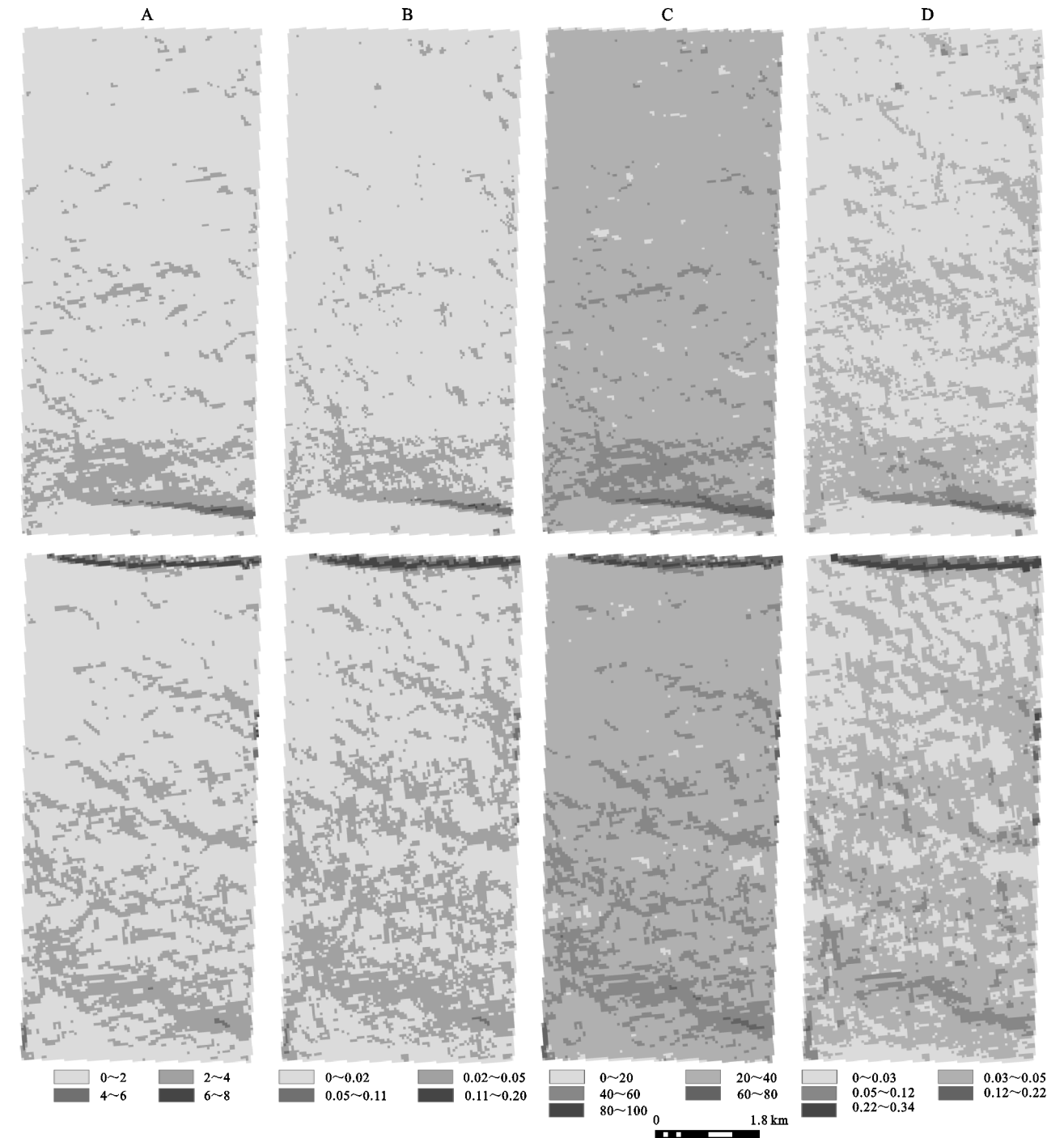
最小值径流量为 3.1 L。降雨初期坡面表现为入渗状态, 产流较少, 随着降雨次数增加, 坡面入渗率下降而 R₄ 降雨侵蚀力最强, 故产生径流量明显增多。前两次降雨产沙量极少, 到第三次降雨明显增多, 可能与细沟的产生与发育有关, 之后产沙量随着降雨次数的增加而增加, 后几次变化幅度较缓。降雨过程中, 侵蚀不断发生, 径流中不断携带泥沙, 含沙量的变化与侵蚀发展密切相关, 因坡面细沟不断地合并联通, 沟壁不间断性的坍塌, 使得坡面径流含沙量存在峰谷交错, 波动明显的现象, 表现为在 R₂ 时为最小值 0.023 kg/L, 在 R₁₃ 达到最大值为 2.515 kg/L。

3.4 坡面微地貌与侵蚀产沙的关系

因侵蚀强度存在明显的坡位之分, 故从不同坡位来阐述微地貌因子与侵蚀产沙间的关系, 对各坡位 4 个地形因子变化和产流产沙量进行相关分析, 结果见表 3。由表 3 可知, 坡上各地形因子间均存在相关关系, 地表切割深度与地表粗糙度及地表起伏度相关性显著, 其中与地表起伏度存在极显著相关, 相关系数达到 0.842。产流量与微坡度相关性显著, 相关系数为 0.494, 与其他地形因子存在负相关。产沙量则与地表粗糙度存在极显著相关关系, 相关系数为 0.786。坡中地表切割深度与地表粗糙度存在极显著相关关

系,相关系数为 0.910。产流量同坡上一样,仅与微坡度相关性较强,且相关系数增加到 0.501,产沙量与地表粗糙度与地表起伏度存在极显著相关,相关系数分别为 0.903,0.887。从坡下来看,地表切割深度与地表起伏度存在显著相关关系,系数为 0.542,产流量同坡上及坡中一样,仅与微坡度相关性较好,系数增加

到 0.509。产沙量则与地表起伏度存在极显著相关性,相关系数为 0.761。其中由于坡中及坡下为侵蚀区,故其地形因子与产流产沙量的相关性较上坡部更为强烈。由此可见水蚀过程中,侵蚀与地形因子之间相互影响,侵蚀使地形因子随之改变,而地形因子的改变也极大的影响了侵蚀量的变化。



注:图中 A 为地表粗糙度,B 为地表切割深度(m),C 为微坡度(°),D 为地表起伏度(m),且上方为雨前,下方为雨后。

图 2 降雨前后微地形因子变化

4 讨论

研究坡面微地貌的变化是深入理解砒砂岩区水

力作用导致土壤侵蚀机理的一个重要环节。砒砂岩区坡面两个雨季降雨下侵蚀强度的划分与降雨强度密切相关, R_4 , R_6 与 R_{10} 降雨强度大,侵蚀深度强,均

划分为重度侵蚀,而 R_2 与 R_3 降雨强度小且均为前期降雨,虽 R_3 降雨后产沙量较多但更多地只是将表土冲刷,侵蚀深度较浅,故均划分为微度侵蚀。而整个坡面中下部为侵蚀区,可能因为坡长较短,上坡部汇水面积小,较难形成集中股流,细沟在坡面首次出现在利于其发展的中下部,随着降雨的发展,细沟沿坡面不断延长,通过合并及分叉不断变宽且向深层发育,故在坡面中下部侵蚀较为严重。降雨通过雨滴击溅、径流的冲刷和搬运以及沉积作用于坡面土壤,降雨与坡面土壤这种相互作用导致了土壤侵蚀^[17]。各坡位地形因子均在 R_4 降雨时出现峰值,可能由于 R_4 降雨量最多,降雨侵蚀力最大,对地形因子的影响较强,且砒砂岩土壤较为松散,粒径较大,遇水即碎,在自然降雨多雨强交叉的作用下,坡面形态多变,各地形因子表现为高低起伏^[18],坡面土壤颗粒被径流携带,土壤粒径减小,地形因子呈减小趋势,而随着降雨不断冲刷,使坡面产生细沟及洼地,降低了径流的携带能力,使部分土壤颗粒在坡面上被沉积,地形因子表现为上升趋势,故存在跌宕起伏的现象。

上坡部地表粗糙度、地表起伏度及地表切割深度较坡中及坡下波动更剧烈,这一结论与赵龙山等^[19]对黄土坡面不同坡位地形因子与降雨侵蚀的响应关系一致,地形因子所处的位置不同,对降雨侵蚀的响应也不尽相同。在上坡部,雨滴击溅会形成大小不一的鱼鳞坑,使地形因子均表现为增加,但所形成的鱼鳞坑深度及大小不足以抵挡径流的冲刷,随时都会被移平,减弱了雨滴击溅作用。同时径流会将坡面土壤颗粒带走,使坡面均一化,地形因子则又表现为减小的趋势。与唐辉等^[20]对黄土坡面微地形变化与产流产沙响应关系研究一致,不同坡位地形因子间均存在相关关系。且坡面产流产沙量与坡面地形因子变化间的差异可以表明坡面微地貌与产流产沙的相互关系,根据李清溪等^[10]的研究,微地貌因子的变化可以用来估算坡面侵蚀量,可见地形因子与产流产沙量存在一定相关性。通过分析可以得出,地表粗糙度可以作为评价砒砂岩区坡面土壤侵蚀的最佳地形因子,地表起伏度则为备选指标。这一结论与赵斯琦等^[21]的研究一致。

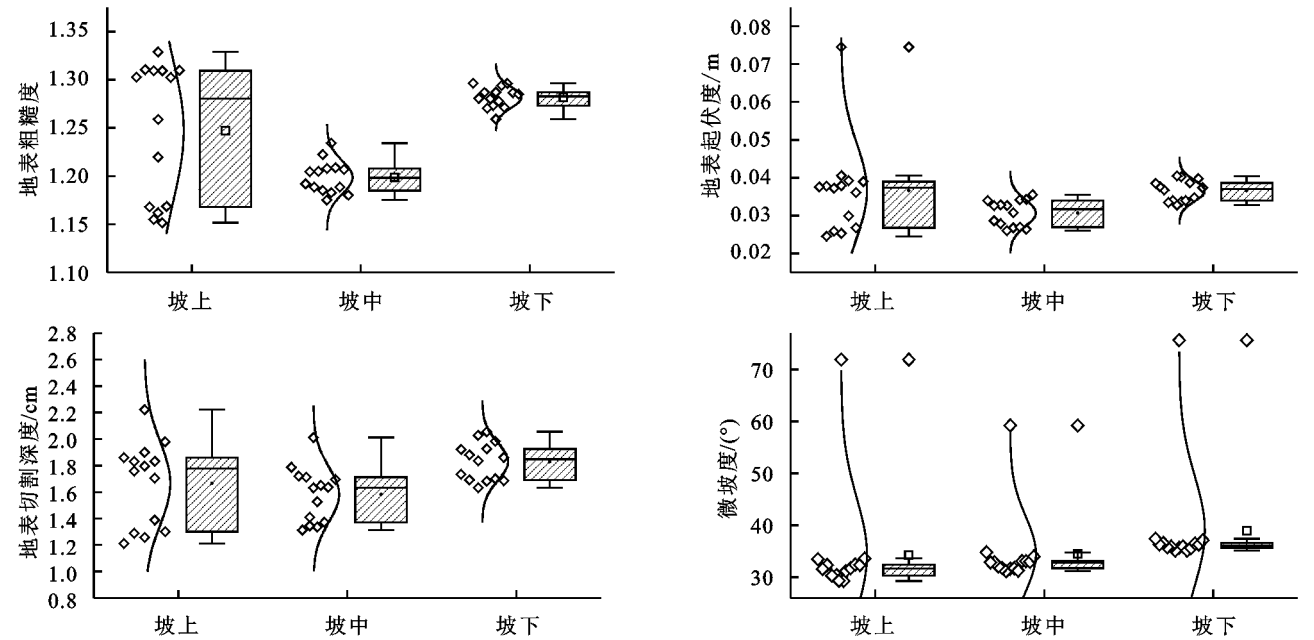


图 3 不同坡位地形因子变化

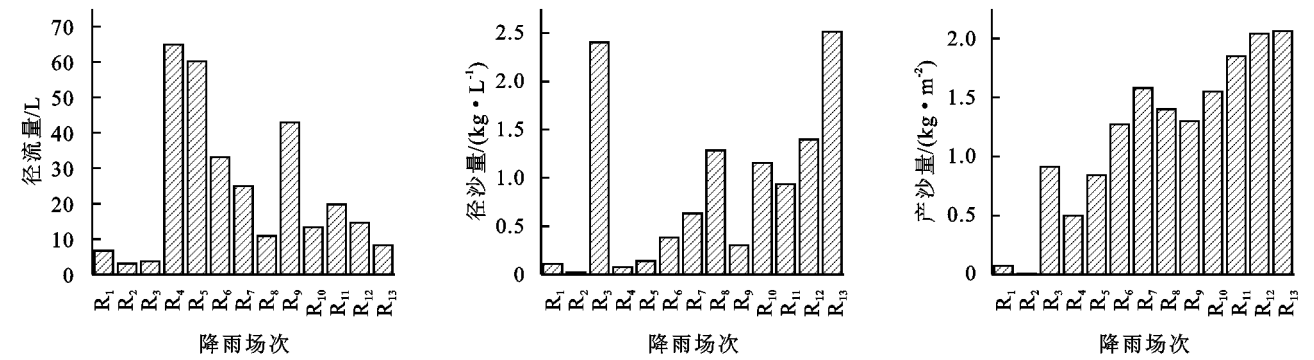


图 4 侵蚀产沙特征

表 3 各坡位地形因子与产流产沙的相关关系

坡位	参数	地表粗糙度	地表起伏度	地表切割深度	微坡度	产流量	产沙量
坡上	地表粗糙度	1					
	地表起伏度	0.006	1				
	地表切割深度	0.530 *	0.842 * *	1			
	微坡度	0.350	0.002	0.149	1		
	产流量	−0.001	−0.296	−0.274	0.494 *	1	
	产沙量	0.786 * *	−0.135	0.323	−0.044	−0.113	1
坡中	地表粗糙度	1					
	地表起伏度	0.910 * *	1				
	地表切割深度	0.362	0.436	1			
	微坡度	−0.06	0.112	−0.056	1		
	产流量	−0.229	−0.143	−0.367	0.501 *	1	
	产沙量	0.903 * *	0.887 * *	0.282	−0.026	−0.113	1
坡下	地表粗糙度	1					
	地表起伏度	−0.065	1				
	地表切割深度	−0.152	0.542 *	1			
	微坡度	0.416	0.254	0.140	1		
	产流量	0.006	−0.040	0.243	0.509 *	1	
	产沙量	−0.273	0.761 * *	0.303	−0.103	−0.113	1

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。

5 结 论

(1) 两个雨季 13 次有效降雨中,R₄,R₆,R₁₀降雨强度大,侵蚀深度强均划分为重度侵蚀,而 R₂与 R₃降雨强度小且均为前期降雨,虽 R₃降雨后产沙量较多但更多地只是将表土冲刷侵蚀深度较浅,故均划分为微度侵蚀。且最后一次降雨后坡面明显的划分出侵蚀区及沉积区,侵蚀区主要分布在坡中及坡下,沉积区主要分布在上坡部,坡下边缘有少量分布。

(2) 两个雨季过后,坡面各地形因子均变大,坡面破碎化严重。且不同坡位上地形因子变化表现不同,因 R₄降雨强度较大,此时各地形因子均达到峰值。且上坡部地形因子变化较坡中及坡下更为剧烈。

(3) 不同坡位上地形因子与产流产沙的相关性不尽相同,坡上坡中及坡下产流量均与微坡度相关性较好,且随着坡位越靠下相关性越显著。产沙量在坡上及坡中均与地表粗糙度为极显著相关,在下坡部则与地表起伏度呈极显著相关。

参考文献：

[1] Sun W Y, Shao Q Q, Liu J Y, et al. Assessing the effects of land use and topography on soil erosion on the Loess Plateau in China[J]. Catena, 2014,121:151-163.

[2] 张青峰,王健,赵龙山,等.基于 M-DEM 黄土人工锄耕坡面微地形特征研究[J].干旱区资源与环境,2012,26(9):149-153.

[3] 张若曦,秦富仓,李龙,等.水力侵蚀对砒砂岩区土壤有机碳空间变异性的影响[J].水土保持学报,2020,34(6):117-124.

[4] Zhao L S, Liang X L, Wu F Q. Soil surface roughness change and its effect on runoff and erosion on the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Land, 2014,6(4): 400-409.

[5] 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.

[6] Darboux F, Huang C. Does soil surface roughness increase or decrease water and particle transfers[J]. Soil Science Society of America Journal, 2005,69(3):748-756.

[7] 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.

[8] Gómez J A, Nearing M A. Runoff and sediment losses from rough and smooth soil surfaces in a laboratory experiment[J]. Catena, 2005,59(3):253-266.

[9] Römken M, Helming K, Prasad S. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. Catena, 2002,46(2):103-123.

[10] 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.

[11] 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.

[12] 高玄娜,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面侵蚀泥沙颗粒特征[J].水土保持学报,2021,35(1):44-49.

坑、自然坡面+水平条、自然坡面、自然坡面+椰丝毯、自然坡面+鱼鳞坑的减流率依次为 73.27%,61.36%,72.21%,67.84%,57.95%,68.00%,100%,94.01%,67.11%,58.84%,70.67%,100%,减沙率依次为 87.73%,85.63%,86.77%,85.88%,83.47%,86.28%,100%,97.44%,86.57%,83.94%,86.58%,100%。马齿苋+鱼鳞坑、自然坡面+鱼鳞坑配置模式的水土保持效益最佳,其次为单独布设的鱼鳞坑措施。

(4) 对板栗林下产流产沙量影响最大的因子为降雨量因子,降雨量与径流量、泥沙量的相关系数分别为 0.533,0.557,呈极显著的正相关关系。径流量与泥沙量、径流系数、侵蚀浓度、土壤含水率的相关系数分别为 0.843,0.919,0.659,0.827,呈极显著相关关系。

参考文献:

[1] 徐佳佳.北京密云石匣小流域坡面径流泥沙及雨水溶解物的研究[D].北京:北京林业大学,2020.

[2] 王瑞波,兰彦平,周连第,等.北京密云水库库区板栗生产调查[J].中国果树,2010(5):68-69,74.

[3] 王世雷,王奋忠,李民义,等.密云区板栗林下水土流失防治初探[J].中国水土保持,2020(6):64-66.

[4] Liu J, Pang S, He Y, et al. Critical area identification of phosphorus loss based on runoff characteristics in small watershed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017,33(20):241-249.

[5] 张秋锋.密云水库石匣小流域水土保持措施效应研究[J].广东农业科学,2013,40(8):146-148.

[6] 刘宝元,毕小刚,符素华,等.北京土壤流失方程[M].北京:科学出版社,2010.

[7] 尚润阳,张亚玲.燕山山区板栗林林下水土流失危害及防治建议[J].海河水利,2015(3):12-14,35.

[8] 丁新辉,刘孝盈,刘广全.基于改进 TOPSIS 法的南方岩溶区石漠化生态治理模式评价[J].泥沙研究,2021,46(2):54-58,20.

[9] 刘立桥.浅谈生态宾格网在护坡设计中的选择与应用[J].江苏水利,2014(8):37-38,41.

[10] 姜丽.石灰石老矿山水土保持设计理念及防治措施[J].水土保持应用技术,2012(3):36-38.

[11] Zhao C, Gao J, Huang Y, et al. The contribution of *Astragalus adsurgens* roots and canopy to water erosion control in the water-wind crisscrossed erosion region of the Loess Plateau, China[J]. Land Degradation & Development, 2017,28(1):265-273.

[12] 杜勇强,汤崇军,刘英亮,等.生草措施对红壤区果园水土流失和氮素流失的影响[J].江西水利科技,2021,47(4):296-302.

[13] 费晓.密云板栗林地水土流失治理措施及其效果研究[D].北京:北京林业大学,2019.

[14] 彭旭东,戴全厚,李昌兰.中国西南喀斯特坡地水土流失/漏失过程与机理研究进展[J].水土保持学报,2017,31(5):1-8.

[15] Chen H, Zhang X, Abla M, et al. Effects of vegetation and rainfall types on surface runoff and soil erosion on steep slopes on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2018,170:141-149.

(上接第 27 页)

[13] 杨吉山,姚文艺,郑明国,等.原状砒砂岩坡面产流产沙规律试验研究[J].人民黄河,2017,39(1):98-101,109.

[14] 胡剑汝,饶良懿,申震洲.基于 WEPP 的砒砂岩坡面复合侵蚀治理生态水文效应评价[J].水土保持学报,2020,34(2):123-129,238.

[15] 陈鹏,张铁钢,董智,等.灌草格局对砒砂岩区产流产沙特征的影响[J].干旱区资源与环境,2020,34(9):116-121.

[16] 汤珊珊.覆沙坡面水蚀产沙动力过程与微地貌变化的响应研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[17] 郑粉莉,高学田.坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过

程[J].土壤学报,2004,41(1):134-139.

[18] 吴发启,赵西宁,崔卫芳.坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J].水土保持学报,2003,17(3):115-117.

[19] 赵龙山,张青峰,王健,等.黄土坡面不同微坡位上糙度对降雨侵蚀的响应[J].土壤学报,2013,50(4):637-642.

[20] 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.

[21] 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.