

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.01.026

李龙, 秦富仓, 钱秋颖, 等. 砒砂岩区水力侵蚀下坡面微地貌变化特征及过程研究. 土壤, 2022, 54(1): 198–205.

砒砂岩区水力侵蚀下坡面微地貌变化特征及过程研究^①

李 龙^{1,2}, 秦富仓^{1,2*}, 钱秋颖¹, 董晓宇¹, 张若曦¹, 张 鹏¹

(1 内蒙古农业大学沙漠治理学院, 呼和浩特 100018; 2 荒漠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 100018)

摘 要: 解决砒砂岩区坡面的产流产沙问题对黄河流域生态安全具有重要意义, 选取砒砂岩裸露坡面为研究对象, 在自然降雨条件下采用野外径流小区实测结合三维激光扫描技术, 分析 13 次有效降雨过程砒砂岩坡面微地貌的变化过程及产流产沙特征。结果表明, 径流小区内坡面土壤平均侵蚀深度为 26 mm, 侵蚀区占径流小区总面积的 95.27%, 单位面积上侵蚀导致土壤流失体积为 0.019 m³/m²。砒砂岩坡面产流产沙量与降雨强度呈较好的对应关系, 降雨强度和降雨量是影响坡面产流产沙的主要因素。受降雨强度变化的影响, 地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度均随降雨呈现累积增加的趋势, 地表曲率受单次降雨强度影响明显, 呈现不规则的波动变化; 坡面产流量和产沙量之间存在较好的正相关性($r=0.539$, $P<0.05$)。

关键词: 坡面侵蚀; 微地貌; 三维激光扫描; 砒砂岩

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Micro-geomorphic Change Characteristics and Process of Slope Under Water Erosion in Pisha Sandstone Area

LI Long^{1,2}, QIN Fucang^{1,2*}, QIAN Qiuying¹, DONG Xiaoyu¹, ZHANG Ruoxi¹, ZHANG Peng¹

(1 Desert Science and Engineer College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 100018, China; 2 Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Desert Ecosystem Conservation and Restoration, Huhhot 100018, China)

Abstract: It is of great significance to solve the problem of runoff and sediment yield in Pisha Sandstone Area for the ecological security of the Yellow River Basin. The bare slope of Pisha Sandstone was taken as the research object, the field runoff plot measurement and three-dimensional laser scanning technology were used to analyze the micro-geomorphic change process and runoff and sediment yield characteristics under the 13 effective rainfall processes. The results showed that the average soil erosion depth was 26 mm, and the erosion area accounted for 95.27% of the total runoff area. The volume of soil loss caused by erosion was 0.019 m³/m². Runoff and sediment yield of Pisha Sandstone slope had a good corresponding relationship with rainfall intensity. Rainfall intensity and rainfall were the main factors affecting runoff and sediment yield. Influenced by the change of rainfall intensity, surface roughness, surface undulation and surface cutting degree all showed cumulative increasing trends with rainfall. The surface curvature was obviously affected by the intensity of single rainfall, but showing irregular fluctuations; there was a good positive correlation between runoff and sediment yield ($r=0.539$, $P < 0.05$).

Key words: Slope erosion; Micro topography; 3D laser scanning; Pisha Sandstone

水力侵蚀受到诸多因素的影响, 其中下垫面的状况在坡面尺度水力侵蚀过程中扮演着重要角色^[1]。在水力侵蚀的长期作用下, 坡面上土壤颗粒在径流和泥沙的运动过程中不断发生着破坏、剥蚀、搬运和沉积, 从而导致了不同空间位置上土壤理化性状发生改变, 随着侵蚀过程的发生和演变, 这一过程同

时驱动着地表微地形的变化^[2]。由于侵蚀导致的土壤自身空间的位置变化与高程的消长, 土壤的微地貌得到重新塑造^[3]。坡面上微地形的空间分布特征(粗糙度、地表切割度、起伏度等)直接影响着坡面径流产生、地表入渗、径流汇集以及产流产沙过程, 从而对坡面土壤的流失起到抑制或促进的作用^[4]。与此同

①基金项目: 内蒙古科技计划项目(2021GG0052)、中央引导地方科技发展资金项目(2021ZY0023)和内蒙古自然科学基金重大项目(2021ZD07)资助。

* 通讯作者(qinfuc@126.com)

作者简介: 李龙(1989—), 男, 吉林桦甸人, 博士, 副教授, 从事水土保持领域工作。E-mail: lilongdhr@126.com

时,坡面的整个产汇流过程也是引起地表微地形变化的主要动力,因此,坡面产流产沙与微地貌变化过程两者紧密相连,相互影响。

雨滴的击溅和径流的冲刷等作用使侵蚀表面发生土壤分离、泥沙沉积、洼地蓄水等现象,这些变化均会导致地表微地形的改变,同时地表微地形的变化也在影响着水蚀过程^[5]。围绕坡面微地貌与土壤侵蚀关系的研究也受到研究者的广泛关注,特别是在地表填洼^[6]、入渗^[7]、产流产沙过程^[8]以及微地貌的自身发育特征^[9]等方面已有大量研究成果涌现。有研究表明,由于下垫面的差异,在各降雨阶段,相应区域的汇流速度和泥沙搬运能力、对地表的剪切、冲刷强度也在不断变化,坡面形态的差异对侵蚀的增减效应始终处于一个动态的平衡^[10]。然而,由于野外的原位观测试验具有较大困难性,自然降雨试验受天气因素影响较大,坡面细沟变化的研究也多集中于室内的人工降雨^[11]和放水冲刷^[12]等模拟试验,难以真实反映自然降雨状态下坡面细沟的发育过程及其与产流产沙的关系。因此,以微地貌的变化过程和规律为切入点,深入分析水力侵蚀下坡面的侵蚀过程和机制具有重要意义。

砒砂岩位于黄土丘陵沟壑区的大地理环境下,由于其岩层成岩程度低、沙粒间胶结程度差、结构强度低,抗冲刷和抗蚀能力均弱,特别是砒砂岩表层土壤易受到降雨后水分的影响,对坡面土壤结构破坏严重,加速砒砂岩崩解,极易造成水土流失^[13]。因此,本研究以砒砂岩区裸露坡面为研究对象,在自然降雨条件下通过野外径流小区监测试验,结合三维激光扫描技术,研究水力侵蚀作用下坡面微地貌变化过程以及侵蚀规律,以期合理调节地区土壤流失,构建坡面土壤侵蚀模型提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于内蒙古鄂尔多斯市准格尔旗鲍家沟流域(图1),地理坐标为110°31′~110°35′E、39°46′~39°48′N,海拔在1110~1300 m;属温带大陆性气候,冬季漫长干燥,夏季短暂温热,年降雨量400 mm,多为暴雨。研究区降雨量集中在夏季(6—8月),夏季多年平均降水量256.4 mm,占全年降水量的64.1%。光照资源丰富,年日照时数3100~3200 h,年日照率大于70%,多年平均气温7.2℃,无霜期平均135天。土壤基岩为砒砂岩(表1),以栗钙土为主,土层厚度小于1 m。腐殖质层厚度一般为20~30 cm,有机质含量较低,pH 8~8.5,质地一般为砂壤土,结

构为小粒状。植被属于温带干旱草原植被,植物类型多以多年生的草本植物组成,以禾本科植物为主,其次是菊科、豆科植物,另有部分小灌木、半灌木,以豆科、菊科为主。主要人工植被有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、柠条(*Caragana Korshinskii*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)等。

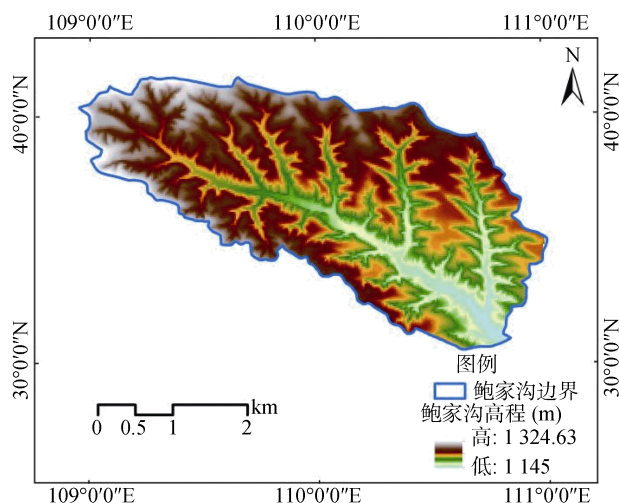


图1 研究区位置图

Fig.1 Location of study area

1.2 试验设计

1.2.1 样地选取与布设 根据研究区典型的地形条件,选择坡度为10°且弃耕年限在15 a以上的坡地为研究对象。本研究旨在观测坡面土壤侵蚀过程,因此清除小区内部杂草、枯落物、大块砾石等杂物,在坡地上设置5个规格为2 m(宽)×5 m(长)径流小区。小区长边界垂直于等高线,小区低端设出水口,并配备集流桶以便采集水沙样品。收集到的径流和泥沙立即称量,采用烘箱105℃恒温烘干,称量泥沙干物质量。径流小区旁设置有固定HOBO气象站,采用虹吸式自计雨量计记录大气降水过程,并配备雨量筒进行相互校验,测定降雨量、降雨强度(最大30 min降雨强度),及降雨历时等基本数据。

1.2.2 微地貌变化过程测定 为精确分析水力侵蚀过程对坡面微地貌的影响,本研究采用高精度三维激光扫描仪对降雨前后的径流小区进行扫描,获取降雨前和降雨后的坡面地表微地形点云数据,所使用仪器为RIEGL VZ-400三维激光扫描仪,扫描精度为2 mm(100 m距离),扫描距离为600 m(反射率90%),扫描范围为100°(垂直)×360°(水平)。此外,该三维激光扫描仪应用波形数字化和在线波形分析技术,每秒可发出多达300 000束精细激光束,从而提供高达0.0005°的角分辨率。

表 1 研究区土壤基本理化性质
Table 1 Soil basic physiochemical properties in study area

土壤类型	土壤机械组成(%)			土壤容重 (g/cm ³)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	交换性阳离子 (cmol/kg)	土壤稳定入渗率 (mm/min)
	黏粒	粉粒	砂粒					
栗钙土	5.22	51.25	43.53	1.64	0.41	1.19	8.26	0.6~1.2

注：土壤机械组成为体积分数。

在径流小区底端架设三维激光扫描仪,固定扫描位置与高度不变,于每次降雨前对径流小区进行扫描,获取雨前坡面上微地貌点云数据;降雨后 15 min (等待坡面水分完全入渗,坡面达到稳定后扫描以保障扫描精度),在相同位置再次对径流小区进行扫描,获取雨后坡面微地貌点云数据。

1.2.3 微地貌模型(M-DEM)构建 在每次降雨发生前后,从坡面收集高程点云数据。最终,每次扫描确定超过 80 000 个坡面微形貌的高程数据点。在 ArcGIS 软件平台的“数据转换模块”将点云数据转化为栅格数据,点云数据精度可达到水平方向 2.0 mm,垂直方向达 1.5 mm;转为栅格数据后生成的分辨率为 2 mm×2 mm 的 M-DEM。

坡面微地貌的变化与侵蚀过程对土壤的搬运和沉积密切相关。因此,本试验采用侵蚀前的 M-DEM 中减去侵蚀后的 M-DEM,其差值可以定量地描述坡面微地貌的变化。为了确定精确的空间叠加位置,在每个径流小区附近设置了 6 个固定的匹配点作为参考。在 ArcGIS 空间分析模块下,使用栅格计算器实现栅格叠加相减,并完成计算分析。若降雨前微地貌模型(M-DEM_前)减去降雨后微地貌模型(M-DEM_后)得到ΔE-DEM 为负值,则表明对应的区域为侵蚀区,若为正值,则表明对应区域为沉积区^[14]。

那么,侵蚀区面积(total erosion area, TEA)和沉积区面积(total deposition area, TDA)可计算为:

$$\begin{aligned} \text{TEA} &= n \times A & (1) \\ \text{TDA} &= m \times A & (2) \end{aligned}$$

式中: A 表示统计单元栅格的面积(m²), n 和 m 分别代表侵蚀区和沉积区的栅格数量。

侵蚀体积(total erosion volumes, TEV)、沉积体积(total deposition volumes, TDV) 和净土壤流失体积 (net loss volumes, NLV) 可计算为:

$$\text{TEV} = \sum_{i=0}^n \Delta Z_i \times A \quad (3)$$

$$\text{TDV} = \sum_{j=0}^m \Delta Z_j \times A \quad (4)$$

$$\text{NLV} = \text{TEV} - \text{TDV} \quad (5)$$

式中: ΔZ 表示栅格的高程差值, i 和 j 分别代表侵

蚀区和沉积区的栅格位置。

1.2.4 微地貌参数的提取 1)曲率 C 。曲率是指地形表面扭曲变化程度的定量化度量因子,能够直观地反映出地表凹凸起伏的变化状况。在某一图层的 DEM 栅格数据的基础上进行曲率的提取。

2) 地表粗糙度 R 。地面粗糙度是指在一个特定的区域内,基于坡度的基础上,地球表面积与其投影面积之比,通过地图代数计算出来,能直观反映出某一区域的地表起伏和侵蚀状况,公式如下:

$$R=1/\text{COS}([\text{Slope of DEM}]\times\pi/180) \quad (6)$$

式中: R 表示某一特定区域的地表粗糙度, $[\text{Slope of DEM}]$ 指某一图层的 DEM 坡度, π 一般取值 3.14159。

3) 地表起伏度 RA 。地表起伏度是指在一定的区域范围内,最低海拔与最高海拔之间的高差,能直观反映出土壤在侵蚀过程中地表的高低起伏状况,是区域地形的宏观性指标,公式如下:

$$RA_i = H_{\max} - H_{\min} \quad (7)$$

式中: RA_i 表示一定范围内的地形起伏度, $H_{\max}$ 表示该范围内最高点的高度值, $H_{\min}$ 表示该范围内最低的高度值, i 表示某一特定区域范围的符号。

4) 地表切割度 SI 。切割度指在某点邻近区域范围内平均海拔与最低海拔之间的差值,能直观反映出地表被侵蚀切割的状况,公式如下:

$$SI_i = H_{\text{mean}} - H_{\min} \quad (8)$$

式中: SI_i 表示区域范围内某一点的地表切割深度, H_{mean} 表示邻近区域窗口的平均高度值, $H_{\min}$ 表示邻近区域窗口的最低高度值。

5) 汇流累积量 DS 。上一栅格的水流量按照水流方向流向下一栅格的累积水流量,流域内一个栅格的水流量代表了这个栅格的集水汇流能力的强弱。先对某一图层的 DEM 进行填洼,对得到的无洼地 DEM 计算水流方向,在水流方向的基础上提取汇流累积量^[15]。

2 结果与分析

2.1 水力侵蚀下坡面产流产沙特征

基于 2019 年和 2020 年雨季(6—9 月)径流小区所观测的 26 场天然降雨数据,分析水力侵蚀下砒砂岩坡面微地形变化及其产流产沙特征。其中,2019 年

观测到 15 场降雨，总降雨量为 399.4 mm，其中有 6 场降雨导致坡面产流产沙；2020 年观测到 11 场降雨，总降雨量为 376.5 mm，其中有 7 场降雨导致产流产沙。因此，本研究只针对坡面产流产沙的 13 场有效降雨进行分析，认为未产生径流的降雨均属于无效降雨，不纳入研究范围。

如表 2 所示，2019 年观测到有效降雨总降雨量为 153.4 mm，总降雨历时为 4 123 min，总径流量为 161.75

L，总泥沙量为 31.42 kg。第四次降雨的降雨量最大，为 56.4 mm，产生的径流量也最大，为 65 L，泥沙量为 4.97 kg；第六次降雨的最大 30 min 的降雨强度最大，径流量为 33.2 L，产沙量最大，为 12.74 kg。2020 年有效降雨总降雨量为 114 mm，总降雨历时为 1 770 min，总径流量为 132.3 L，总泥沙量为 79.92 kg。第九次降雨的降雨量和 I_{30} 最大，为 32 mm 和 10.2 mm/h，其产生的径流量也最大，为 42.9 L，泥沙量为 13 kg。

表 2 自然降雨基本特征
Table 2 Basic characteristics of natural rainfall

编号	降雨时间(年-月-日)	降雨历时(min)	降雨量(mm)	I_{30} (mm/h)	降雨强度(mm/h)	径流量(L)	产沙量(kg)
R1	2019-07-16	862	31.2	26	2.17	6.7	0.73
R2	2019-07-22	517	17	8	1.97	3.1	0.07
R3	2019-07-31	1 495	10.4	10.8	0.42	3.75	4.49
R4	2019-08-04	597	56.4	11.2	5.67	65	4.97
R5	2019-08-10	408	15.6	9.6	2.29	50	8.42
R6	2019-08-20	244	22.8	27.2	5.61	33.2	12.74
R7	2020-07-09	180	13.6	4.8	4.53	25	15.8
R8	2020-07-10	244	12	6.6	2.95	10.9	14
R9	2020-07-12	856	32	10.2	2.24	42.9	13
R10	2020-07-14	25	8.4	8.4	20.16	10.9	14
R11	2020-07-17	117	12.4	3.8	6.36	19.8	12.5
R12	2020-08-12	85	10.8	3.2	7.62	14.6	10.4
R13	2020-08-23	263	24.8	6	5.66	8.2	0.22

注：R1、R2…，R13 分别代表坡面产流产沙的第一次降雨到第十三次降雨； I_{30} 为最大 30 min 降雨强度。

2.2 水力侵蚀下坡面侵蚀沉积特征

M-DEM 清晰地展现了径流小区内部坡面的土壤侵蚀特征(图 2)。如表 3 所示，侵蚀过后坡面土壤平均沉积深度为 5.9 mm，土壤平均侵蚀深度为 26.3 mm，从空间上看，随着降雨累积，径流小区中下部出现明显细沟。就土壤蚀积面积而言，沉积区面积占径流小区总面积的 0.73%，主要分布在小区顶部；侵蚀区面积占径流小区总面积的 95.27%，主要分布在小区中下部，呈集中的细沟状侵蚀特征。侵蚀导致土壤流失体积为 0.193 2 m³，净土壤流失体积为 0.191 1 m³。沉积区和侵蚀区单位面积土壤流失量分别为 0.000 21、0.019 m³/m²。由此可知，径流小区内部坡面呈现明显的侵蚀特征，未侵蚀区所占面积积极小，主要集中在坡顶，坡面中下部开始以细沟状侵蚀为主，并呈现明显的侵蚀沟网。

2.3 水力侵蚀下坡面微地貌变化特征

微观地形因子表征一个微分点的地形信息，其量值受点位海拔及其邻域的高度影响^[16]；宏观地形因子描述的是特定区域之内整体的地形信息，被看成一

个整体进行计算。综合考虑水力侵蚀后坡面微地貌的基本变化特征，本研究分析每次降雨后砒砂岩坡面曲率、地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度以及汇流累积量 5 项微地貌指标的特征，以揭示单次降雨后坡面微地貌的变化规律，结果如表 4 所示。

坡面曲率是地表扭曲变化程度的量化因子，会影响径流的流速、汇聚和分散，进而影响到坡面的侵蚀和沉积，曲率为正说明该像元的表面向上凸，曲率为负说明该像元的表面开口朝下凹入^[17]。次降雨的各项微地貌指标如表 4 所示，坡面曲率的变化较大，且并未随着降雨次数的累积呈现出明显的增减趋势；原坡面的曲率为 -11.029，表明降雨侵蚀之前的坡面初始微地貌形态为凹型坡。当初次降雨过后，R1 变为 1.482，说明第一场降雨对坡面起到了削高填低的作用，对坡面微地貌的改造作用明显；此后，随着坡面径流泥沙运动，坡面曲率也多次出现正负交替的变化，这应该与坡面微尺度上侵蚀-沉积交替转换有着直接联系。当最后一场降雨观测结束，R13 的坡面曲率变为 -11.249，从数值上看，13 场有效降雨过后，

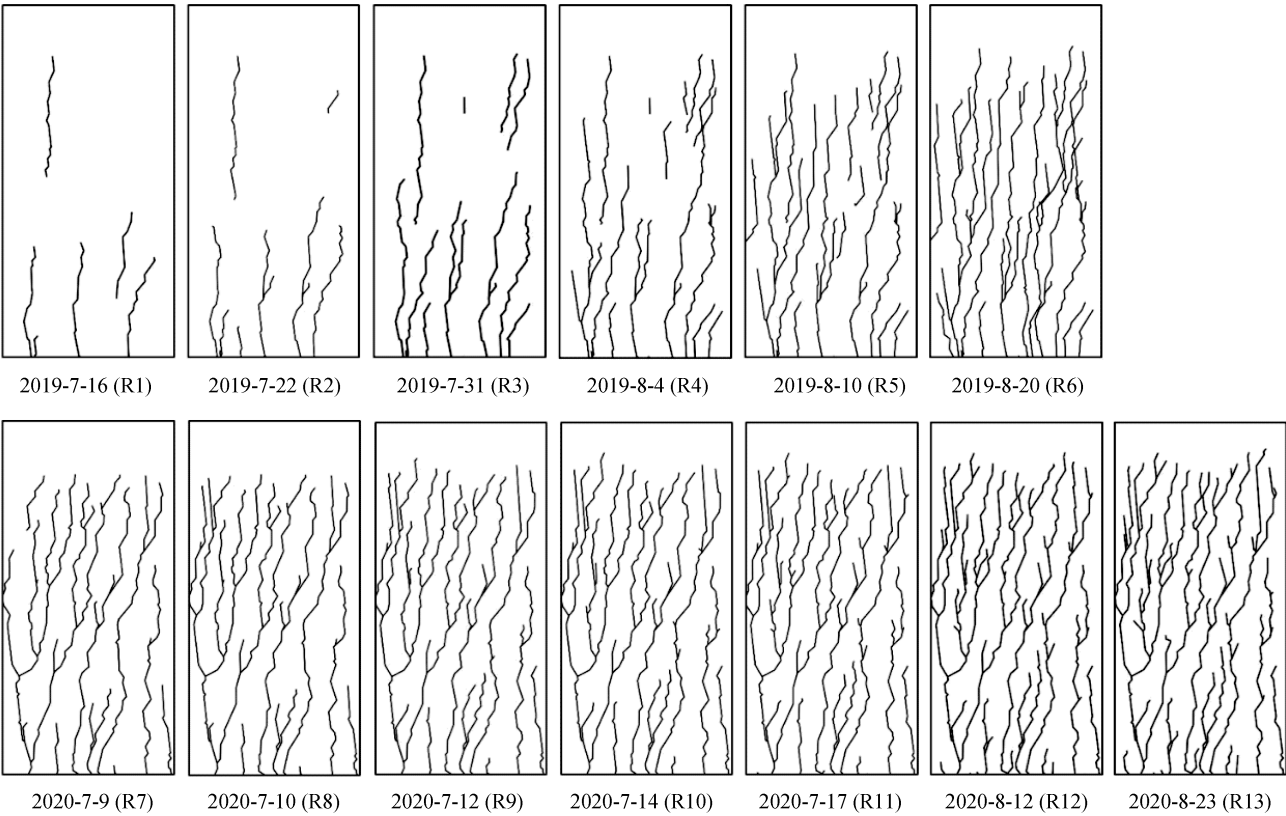


图 2 自然降雨下坡面细沟形态发育过程
Fig. 2 Morphological development of rill on downslope surface of natural rainfall

表 3 坡面侵蚀沉积基本特征
Table 3 Basic characteristics of slope erosion and deposition

径流小区	侵蚀深度 (mm)					侵蚀面积 (m ²)	流失体积 (m ³)	单位面积侵蚀量(m ³ /m ²)
	最小值	最大值	均值	标准差	合计			
沉积区	0.000	45.2	5.9	6.3	3 890.4	0.364 5	0.002 1	0.000 21
侵蚀区	0.021	53.7	26.3	20.9	350 328.0	7.354 5	0.193 2	0.019

表 4 单次降雨坡面微地貌特征
Table 4 Microgeomorphic characteristics of single rainfall slope

次降雨	曲率	地表粗糙度	地表起伏度(mm)	地表切割度(mm)	汇流累积量(ml)
R _原	-11.029	1.209	28.4	14.2	110.709
R1	1.482	1.195	27.0	13.5	109.777
R2	-9.290	1.210	28.5	14.2	109.391
R3	9.507	1.228	30.4	14.8	109.375
R4	-4.281	1.199	27.6	13.8	111.078
R5	-17.045	1.254	35.1	17.2	100.431
R6	-9.113	1.215	29.9	14.8	109.156
R7	-8.391	1.252	35.3	17.4	100.675
R8	-0.558	1.261	37.8	18.7	97.690
R9	4.372	1.262	35.8	17.7	101.125
R10	-5.469	1.247	37.1	18.4	96.114
R11	-9.039	1.262	35.7	17.7	100.845
R12	4.095	1.278	38.2	18.8	102.226
R13	-11.249	1.280	37.6	18.6	100.892

坡面曲率由 -11.029 变为 -11.249 , 变化范围较小, 但结合图 2, 坡面中下部出现了由集中的股流冲刷而成的细沟, 径流冲刷的细沟呈现“U”型和“V”型的凹面, 导致坡面最终侵蚀曲率为负值。

地表粗糙度、地表起伏度和地表切割度都可以反映地表的起伏变化和坡面在侵蚀过程中微地形的形态变化。研究区坡面地表粗糙度整体呈增大的趋势, 原裸坡的地表粗糙度为 1.209 , 一次降雨之后其变化不显著, R13 的地表粗糙度增长到 1.280 , 而降雨过程中地表粗糙度既有增大又有减小。

地表起伏度由原裸坡的 28.4 mm 增长到 R13 的 37.6 mm , 次降雨的侵蚀, 径流携带泥沙增多, 侵蚀剧烈, 坡面细沟数增加, 微地形的破坏程度也增大, 导致地表起伏度的增大。地表切割度由原裸坡的 14.2 mm 增长到 R13 的 18.6 mm , 随着径流量

的增大, 径流能量提升, 对地表的冲刷和切割能力也增强, 致使地表切割度的增大。汇流累积量是指区域地形每点的流水累积量, 其值由原坡面的 110.709 ml 变为 R13 的 100.892 ml , 次降雨过程中数值变化较明显。

2.4 坡面微地貌与产流产沙量的关系

自然降雨下地形因子与侵蚀量之间的相关性结果如表 5 所示, 地表粗糙度与其他各微地貌指标均存在显著相关性, 且地表粗糙度与径流量、泥沙量呈显著的正相关关系($P<0.05$), 相关系数分别是 0.121 、 0.644 ; 地表起伏度和地表切割度与径流量、泥沙量无显著的相关关系; 汇流累积量与径流量无显著的相关关系, 和泥沙量呈显著的负相关关系。坡面产流量和产沙量之间存在较好的正相关性($P<0.05$), 相关系数为 0.539 。

表 5 自然降雨下地形因子与产流产沙之间的相关性
Table 5 Correlation between topographic factors and sediment yield under natural rainfall

	地表粗糙度	地表起伏度	地表切割度	汇流累积量	径流量	泥沙量
地表粗糙度	1					
地表起伏度	0.883**	1				
地表切割度	0.883**	0.997**	1			
汇流累积量	-0.572*	-0.698**	-0.708**	1		
径流量	0.121*	-0.006	0.008	-0.14	1	
泥沙量	0.644*	0.36	0.371	-0.572*	0.539*	1

注: *, **表示相关性达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。

3 讨论

3.1 自然降雨对坡面产流的影响

自然降雨过程中, 当降雨强度大于土壤入渗速度, 地表就会产生超渗径流, 天然降雨的雨强具有不稳定性, 有其独特的产流规律。如图 3 所示, 根据 13 次降雨点绘出降雨强度和产流率随降雨次数的变化折线图, 可以看出降雨强度和产流率有很好的对应关系, 产流率随着降雨强度的变化而变化。初始的几次降雨降雨强度较小且变化过程缓慢, 对应的产流率也较小, 可能是初始土壤较为干燥, 雨水大部分用于入渗。R4 降雨强度的增大, 导致产流率也增大, 可能是由于前几次降雨的基础, 使得土壤含水量达到饱和, 产流率也迅速增大。第九、十和十一次降雨的变幅较大, R9 的降雨强度是 2.24 mm/h , 产流率是 3.01 L/h ; R10 的降雨强度增大, 为 20.16 mm/h , 其产流率也增大, 为 26.16 L/h ; R11 的降雨强度减小, 为 6.36 mm/h , 对应的产流率也减小, 为 10.15 L/h 。大

雨强的雨滴直径较大, 其落地的最终速度也大, 对坡面土壤会产生较大的击溅破坏作用, 更易产生地表径流。当雨强较小, 小于土壤的入渗强度时, 雨滴的直径和动能都较小, 对坡面地表结皮的破坏程度较弱, 径流量也较少^[18]。由于坡面土壤砂粒含量较多, 孔隙较大, 土壤渗漏严重, 主要是蓄满产流并以壤中流的形式产流, 因此, 次降雨强度小的产流率就少^[19]。同时, 随着侵蚀的累积作用, 坡面所产生的细沟, 逐渐形成的地表径流流通的通道, 微地貌的逐渐形成发育对地表径流的产生发挥着促进作用。

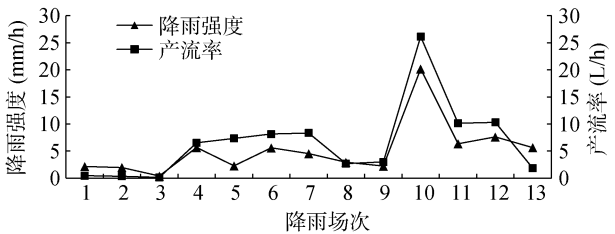


图 3 径流小区降雨强度与产流率变化特征
Fig. 3 Variation characteristics of rainfall intensity and runoff yield in runoff plot

此外,通过降雨总量与径流深和径流侵蚀功率的关系可以得出,降雨总量和径流深和径流侵蚀功率呈显著的正相关关系(图 4),其关系可以分别拟合成多项式的函数形式。径流深和降雨总量符合的多项式函数为: $y =$

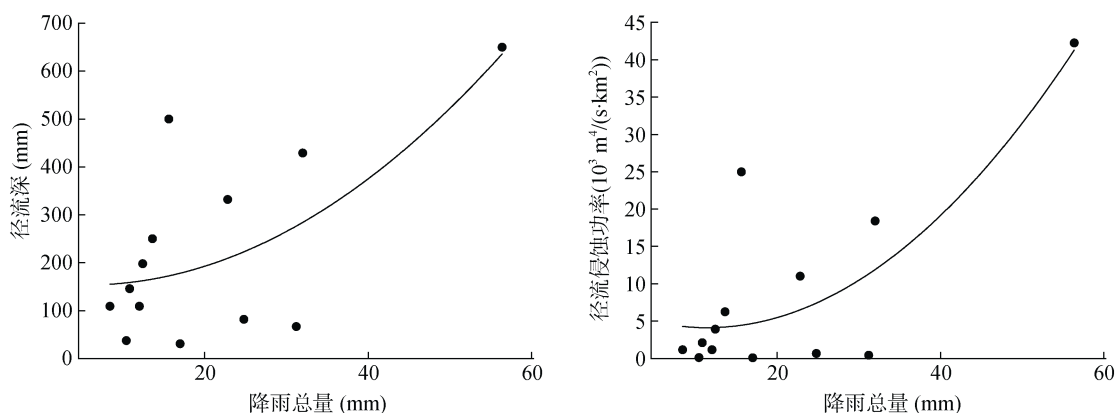


图 4 降雨量对坡面产流的影响
Fig. 4 Effect of rainfall on runoff yield on slope

3.2 自然降雨对坡面产沙的影响

研究区坡面的降雨强度与产沙率的关系见图 5,坡面产沙率随着降雨强度的变化而变化,前几次降雨的降雨强度较小,产沙率也较小,这是由于在裸露砒砂岩地区,植被稀少,基岩风化程度高,即使降雨强度相对较小的时候也会伴随有产流产沙的现象,R4 的降雨强度由 R3 的 0.42 mm/h 增大到 5.67 mm/h,产沙率也由 0.18 kg/h 增大到 0.50 kg/h,这可能是由于雨滴的击溅造成土粒飞溅,土壤表层空隙阻塞,形成板结,增强了地表薄层径流的流动强度,利于地表径流的形成,导致侵蚀和输沙能力增大^[21]。

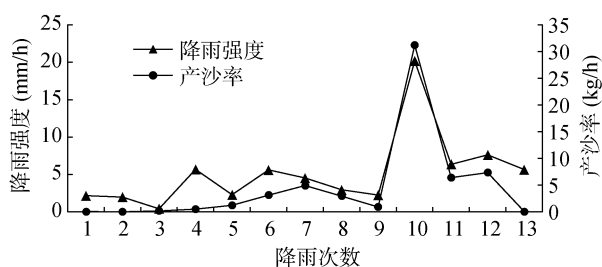


图 5 径流小区降雨强度与产沙率变化特征
Fig. 5 Variation characteristics of rainfall intensity and sediment yield in runoff plot

R9 的降雨强度较小,为 2.24 mm/h,产沙率是 0.91 kg/h; R10 的降雨强度增大,为 20.16 mm/h,其产沙率也增大,为 31.20 kg/h; R11 的降雨强度减小,为 6.36 mm/h,对应的产沙率也减小,为 6.41 kg/h。降雨强度越大,土壤孔隙性较差的裸露砒砂岩坡面在降雨过程中产生的土粒来不及向坡下运移而堵塞地

0.186 $2x^2 - 2.055 2x + 159.26$, R^2 为 0.46; 径流侵蚀功率和降雨总量符合的多项式函数为: $y = 0.018 4x^2 - 0.419x + 6.521 8$, R^2 为 0.64。说明降雨量对坡面产流具有明显促进作用,这一结论与李霞等^[20]的研究一致。

表土壤孔隙,减小雨水入渗的速率,对土壤团聚体的溅散能力就增强,能更快地产生地表径流,地表径流的增加就存在可以携带更多泥沙的可能性,增大冲刷量,产沙率就增大^[18]。

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,R3 的降雨量和降雨强度较小,故地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度均减小; R4 的降雨量和降雨强度较大,地表粗糙度、地表起伏度、地表切割度也相应增大,这与杨坪坪等^[22]的降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 consistency,研究结果与一些学者^[1,5,23]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与微地形的动态变化,进而对坡面产沙有着密切联系。

4 结论

自然降雨过程中,砒砂岩坡面呈现明显的侵蚀特征,土壤平均侵蚀深度为 26.3 mm,侵蚀区占径流小区总面积的 95.27%,单位面积上侵蚀导致土壤流失体积为 $0.019 \text{ m}^3/\text{m}^2$;就侵蚀空间分布而言,坡顶侵蚀强度较低,坡面中下部以细沟状侵蚀为主,呈现破碎的侵蚀沟网,且径流冲刷的细沟呈现“U”型和“V”型的凹面,导致坡面最终侵蚀曲率为负值。

降雨强度和降雨量是影响坡面产流产沙的主要因素,降雨影响产沙量的同时改变坡面微地貌形态。随着侵蚀累积作用,地表粗糙度、地表起伏度、地表

切割度均呈现累积增大的趋势。地表粗糙度与径流量、泥沙量呈现出显著的正相关关系($P<0.05$)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Kuhn N J, van Oost K, Cammeraat E. Soil erosion, sedimentation and the carbon cycle[J]. CATENA, 2012, 94: 1–2.
- [3] Vermang J, Norton L D, Huang C, et al. Characterization of soil surface roughness effects on runoff and soil erosion rates under simulated rainfall[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015, 79(3): 903–916.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 赵龙山, 张青峰, 宋向阳, 等. 基于微尺度下 DEM 的黄土坡耕地地表坑洼特征研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 179–183.
- [7] Wu Q J, Wang L H, Wu F Q. Effects of structural and depositional crusts on soil erosion on the Loess Plateau of China[J]. Arid Land Research and Management, 2016, 30(4): 432–444.
- [8] 邱野, 王瑄, 李德利, 等. 不同耕作模式下坡耕地次降雨径流量及径流泥沙颗粒机械组成规律[J]. 水土保持学报, 2012, 26(2): 62–65.
- [9] 塔娜. 基于高精度 DEM 的水蚀发育过程中黄土微地形变化特征[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [10] Helming K, Römken M J M, Prasad S N. Surface roughness related processes of runoff and soil loss: A flume study[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(1): 243–250.
- [11] 石璞, Chiahue Doua Yang, 赵鹏志. 间歇性降雨对土壤团聚体粒级及磷、铜、锌富集的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 948–956.
- [12] 张恒, 高照良, 牛耀彬, 等. 两种工程堆积体坡面细沟形态与产沙关系对比研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 115–127.
- [13] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区不同侵蚀程度表土多重分形特征与持水特性关系[J]. 土壤, 2021, 53(3): 620–627.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] Linden D R, van Doren D M Jr. Parameters for characterizing tillage-induced soil surface roughness[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(6): 1560–1565.
- [17] 孟微波, 袁家明, 张卡, 等. 基于 AE 的坡面地形特征提取系统设计与实现[J]. 矿山测量, 2018, 46(6): 73–79.
- [18] 吉静怡, 赵允格, 杨凯, 等. 黄土丘陵区生物结皮坡面产流产沙与其分布格局的关联[J]. 生态学报, 2021, 41(4): 1381–1390.
- [19] 韩同春, 苏钰钦, 张宇. 双层结构边坡降雨入渗与坡面径流耦合分析[J]. 工程科学与技术, 2020, 52(6): 145–152.
- [20] 李霞, 金鑫, 谢斯琴, 等. 间歇降雨对红壤坡面土壤侵蚀特征的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(1): 96–102.
- [21] 王晨沣. 不同近地表土壤水文条件下黄壤坡面细沟间侵蚀过程机理[D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- [22] 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.
- [23] 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.