

自然降雨条件下砒砂岩坡面细沟微形态及其侵蚀特征

李龙^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 郭跃³, 余英⁴

(1.内蒙古农业大学 沙漠治理学院, 内蒙古 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, 内蒙古 呼和浩特 100018; 3.鄂尔多斯市林业和草原局, 内蒙古 鄂尔多斯 017010; 4.宜宾林竹产业研究院, 四川 宜宾 644000)

摘要: [目的] 研究自然降雨条件下砒砂岩坡面细沟微形态及其侵蚀特征, 为区域土壤侵蚀机制研究提供理论参考。[方法] 选择裸露砒砂岩坡面为研究对象, 采用野外径流小区原位监测与三维激光扫描技术结合的方法, 分析砒砂岩坡区 13 次降雨过程中坡面细沟数量、形态以及几何特征的动态变化特征, 揭示细沟微形态变化过程对坡面产流产沙的影响机制。[结果] 观测期研究区总降雨量为 267.40 mm, 总降雨历时为 5 893 min, 总径流量为 294.05 L, 总泥沙量为 111.34 kg。降雨对径流和泥沙的贡献率表现为: 中雨(10.0~24.9 mm) > 大雨(25.0~49.9 mm) > 小雨(<10.0 mm)。中雨对坡面侵蚀影响程度最高。水力侵蚀导致坡面细沟形态上趋于复杂化, 其总长达为 40.52 m, 平均宽度为 4.31 cm, 平均深度为 1.22 cm。次降雨坡面细沟的发育过程表现为: 溅蚀—片蚀—宽浅型细沟—连续细沟网—沟壁坍塌—沟道稳定; 细沟趋于向窄深型发育。[结论] 细沟各形态指标均呈现明显的二次多项式相关关系, 细沟宽深比与沟壑密度对坡面产沙量存在显著影响。

关键词: 自然降雨; 坡面细沟; 形态变化; 产流产沙; 砒砂岩

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)06-0015-08

中图分类号: S157.1

文献参数: 李龙, 张鹏, 郭跃, 等. 自然降雨条件下砒砂岩坡面细沟微形态及其侵蚀特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(6): 15-22. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.003; Li Long, Zhang Peng, Guo Yue, et al. Micromorphology and erosion characteristics of rills on feldspathic sandstone slopes under natural rainfall conditions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(6): 15-22.

Micromorphology and Erosion Characteristics of Rills on Feldspathic Sandstone Slopes Under Natural Rainfall Conditions

Li Long^{1,2}, Zhang Peng^{1,2}, Guo Yue³, Yu Ying⁴

(1. Desert Science and Engineer College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot, Inner Mongolia 100018, China; 2. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Desert Ecosystem Conservation and Restoration, Hohhot, Inner Mongolia 100018, China; 3. Ordos Forestry and Grassland Bureau, Ordos, Inner Mongolia 017010, China; 4. Forestry and Bamboo Industry Research Institute of Yibin, Yibin, Sichuan 644000, China)

Abstract: [Objective] The micromorphology and erosion characteristics of the feldspathic sandstone under natural rainfall conditions were studied, in order to provide theoretical reference for understanding the mechanism of soil erosion in this region. [Methods] The exposed feldspathic sandstone slope was selected as the research object, and the field monitoring and 3D laser scanning technology were combined to analyze the dynamic changes of the number, shape and geometric characteristics of the rills during 13 rainfall events. The influence of rill micro-morphological change processes on slope runoff and sediment yield was analyzed. [Results] The total rainfall in the study area during the observation period was 267.40 mm, the total rainfall duration was 5 893 min, the total runoff was 294.05 L, and the total sediment was 111.34 kg. The contribution of rainfall to runoff and sediment followed the order of moderate rain > heavy rain > light rain. Moderate rain had the highest impact on slope erosion. After the erosion stopped, the overall morphology of the rill became

收稿日期: 2021-05-17

修回日期: 2021-07-12

资助项目: 内蒙古科技计划项目“黄河流域砒砂岩区抗蚀控沙与脆弱生态系统精准修复技术集成与示范”(2020GG0075); 中央引导地方科技发展项目“砒砂岩坡面水力侵蚀过程与植被斑块格局演变互馈机制研究”(2021ZY0023); 内蒙古自治区研究生科研创新项目(SZ2020085)

第一作者: 李龙(1989—), 男(汉族), 吉林省桦甸市人, 博士, 副教授, 主要从事水土保持方面的研究。Email: lilongdhr@126.com。

通讯作者: 余英(1973—), 女(汉族), 四川省长宁县, 硕士, 高级工程师, 主要从事竹林资源保护与综合利用工作。Email: 17306788@qq.com。

more complicated, with a total length of 40.52 m, an average width of 4.31 cm, and an average depth of 1.22 cm. The development process of the rills on the slope surface during a single rainfall was as follows: splash erosion-sheet erosion-wide and shallow rills-continuous rill network-ditch wall collapse-channel stability, the rills tend to be narrow and deep. [Conclusion] The morphological indicators of the rills all present an obvious quadratic polynomial correlation, the ratio of rill width to depth and gully density have significant effects on sediment yield.

Keywords: natural rainfall; rill on slope; morphological changes; runoff and sediment production; feldspathic sandstone

砒砂岩区作为黄河流域多沙粗沙主要策源地,该地区土壤侵蚀极其强烈,土壤侵蚀模数达 $3.00 \times 10^4 \sim 4.00 \times 10^4 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。虽然其面积仅占黄河流域的 2%,但产生的粗泥沙占黄河下游河道淤积量的 1/4,对黄河中下游的生态安全构成巨大威胁^[1]。坡面是土壤侵蚀研究与治理的基本单元,对于侵蚀十分剧烈的裸露砒砂岩区,地表的微小起伏都会影响坡面侵蚀量,特别是坡面细沟的发育,对径流泥沙的影响更加显著^[2-3]。在径流的冲刷下,坡面土壤发生侵蚀、搬运、堆积的同时也迅速形成各类形态各异的细沟地貌,侵蚀细沟出现后,细沟水流不同于坡面漫流,侵蚀能力显著增强,流道左右摆动,初步形成浅沟,加剧了侵蚀的发展^[4-5]。鉴于此,国内外众多专家纷纷致力于坡面细沟形态变化及其产流产沙特征研究,并涌现出众多有价值的研究成果^[6-7]。然而近年来,人们多关注于砒砂岩区土壤复配^[8]、植被恢复^[9]、治理模式等^[10]领域的研究,侧重于沟蚀的水动力学特征、影响因素以及汇流网络特征^[11-12],就坡面细沟变化的研究也多集中于室内的人工降雨^[13]和放水冲刷等^[14]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。其中,钱秋颖等^[15]通过野外原位监测试验揭示了砒砂岩坡面自然降雨过程坡面粗糙度的变化的时空差异,提出了坡面粗糙度和土壤颗粒空间运移的相互关系;杨振奇等^[16]也通过野外径流小区监测试验指出,降雨类型对砒砂岩坡面细沟形态和产流产沙量有着直接的影响。因此,探究砒砂岩区坡面细沟微形态变化及其侵蚀机制,自然降雨条件下的野外原位监测试验仍然具有不可替

代的作用。本文以内蒙古鄂尔多斯砒砂岩坡面为研究对象,采用野外径流小区结合利用三维激光扫描技术,分析自然降雨条件下砒砂岩坡面水力侵蚀作用下细沟微形态演变及其产流产沙特征,揭示坡面细沟发生发展的动态过程与土壤侵蚀的内在规律,研究结果旨在为区域土壤侵蚀机制研究提供理论参考,为黄河流域高质量发展贡献力量。

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鲍家沟流域,地理坐标为 $39^\circ 42' - 39^\circ 50' \text{N}$, $110^\circ 25' - 110^\circ 48' \text{E}$ 。鲍家沟流域属于典型裸露砒砂岩区,岩层上风化后覆土较薄,坡面植被盖度极低,是十分典型的裸露砒砂岩区(表 1)。该流域属于中温带半干旱大陆性季风气候区,冬季寒冷且漫长,夏季炎热且短促,春秋变化最为明显,年平均气温 6.5°C ,多年平均降水量 400 mm,年最大降水量为 640.2 mm,雨季主要集中在 6—9 月,多年日照时数在 2 900~3 200 h 之间,无霜期 148 d,年平均风速 3.4 m/s。土壤大部分以黄土为主,伴随砒砂岩景观有覆土砒砂岩、覆沙砒砂岩出现,表土较薄,土壤结构疏松,富含石灰,地势起伏较大,沟壑纵横,水土流失严重。自然植被稀疏,退耕还林,主要以人工植被为主,主要用于防风固沙和水土保持,主要树种有柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii*)、沙棘 (*Hippophae rhamnoides*)、油松 (*Pinus tabulaeformis*)、山杏 (*Armeniaca sibirica*)、刺槐 (*Robinia pseudoacacia*) 等。

表 1 研究区土壤基本理化性质

小区位置	土壤机械组成/%			土壤容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	交换性阳离子/ ($\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$)	土壤入渗率/ ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$)	土壤 含水率/%
	黏粒	粉粒	砂粒						
鲍家沟流域	5.22	51.25	43.53	1.64	0.41	1.19	8.26	0.60~1.20	14.64

1.2 小区的布设及测定方法

在全面调查研究立地条件的基础上,根据研究区地形实际情况,砒砂岩裸坡坡度多在 30° 左右,因此,

2019 年 6 月于研究区全面开展试验,选取坡度为 30° 且坡面基本裸露的坡地为研究对象,在坡面上设置规格为 $2 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 的径流小区,清除小区内部零星分布

的石块、杂草。径流小区采用宽 0.5 m 厚 2.5 mm 的钢板围建,用皮锤将钢板打入地下 30 cm 作为隔水墙,地上出露 20 cm,用于分隔小区内外径流,夯实过程中应尽量减少对土壤的扰动影响试验结果。小区长边界垂直于等高线,小区低端设出水口,并配备集流桶以便收集每次降雨后的水沙样品。径流小区旁设立一台美国 HOBO 公司生产的型号为 U30 的气象站,用于实时监测研究坡面降雨历时、降雨量、温度、土壤水分等指标。每次降雨产流结束后,对集流池、分流池内水位和泥沙进行测量记录并取样,收集到的径流和泥沙立即称量,并采用烘箱 105 °C 恒温烘干,称量泥沙干重。

1.3 坡面细沟形态扫描与分析

试验使用 RIEGL VZ-400 三维激光扫描仪测量每次降雨前后坡面细沟微形态特征。试验所使用的三维激光扫描仪精度为 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 0.000 5°的角分辨率。在径流小区底端、顶端和左右两侧各布设 1 个固定水泥桩作为扫描站点,并选取 5~8 个固定参考点作为每一站扫描数据后的拼接参考点,最后架设三维激光扫描仪,使用三脚架将扫描仪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,保证每次扫描位置的一致性,固定扫描位置与高度不变对小区进行全面扫描,于每次降雨前对径流小区进行全面扫描,降雨停止 15 min 后(以保证坡面径流入渗结束,坡面达到完全稳定)对雨后的径流小区坡面进行扫描,最终共获取到 14 次降雨前后坡面上微地貌点云数据。扫描后数据在所配套的 RiCAN PRO 软件中导出,对扫描点云数据进行去噪并生成矢量数据,使用 ArcGIS 软件对扫描后的三维数据构建精度为 1 cm 的地表微数字高度模型(M-DEM)。经过水文模块的处理,在 ArcGIS 软件中建立坡面细沟形态数字高度模型,运用河网矢量化描述细沟的发育过程,并用正负地形计算细沟的深度,在 AuToCAD 软件中对细沟的长度和宽度进行测量,并计算其形态特征指标。

1.4 细沟形态特征指标的计算

本文的计算参数及计算公式都是经验公式,计算方法^[2]为:

(1) 细沟宽深比 R_{WD} 。细沟宽深比是指细沟某断面处的平均宽度与对应的平均深度的比值,该项指标能够反映细沟的形状的宽深整体变化特征,揭示坡

面侵蚀细沟的下切深度与水平方向侵蚀速率间的相互关系,计算公式为:

$$R_{WD} = \frac{\sum_{j=1}^m W_j}{\sum_{j=1}^m D_j} \quad (1)$$

式中: R_{WD} 指细沟宽深比; W_j 指第 j 条细沟监测的平均宽度(m); D_j 指第 j 条细沟监测的平均深度(m)。

(2) 沟壑密度 D_s 。沟壑密度是指单位面积内细沟的总长度,用来反映细沟的密集程度,该项指标能够揭示坡面细沟侵蚀的切割破碎程度,一般沟壑密度越大,地形越破碎。计算公式为:

$$D_s = \frac{\sum_{j=1}^m L_{ij}}{A} \quad (2)$$

式中: D_s 为沟壑密度(m/m²); A 为试验坡面的表面积(m²); L_{ij} 是第 j 条细沟及其分叉的总长度(m); j 为细沟数目, $j=1,2,3,\dots,m$; m 为坡面上细沟的总条数。

(3) 细沟表面积 S 。该项指标直接反应坡面细沟所占坡面的体积大小,揭示坡面侵蚀负地形的发育程度。细沟表面积通过 ArcGIS 10.2 提取正负地形,得到沟沿线并进行修正,计算公式为:

$$S = N \cdot S_{\text{栅格}} \quad (3)$$

式中: S 为细沟表面积(m²); N 为沟沿线内的栅格数量; $S_{\text{栅格}}$ 为单元栅格面积,栅格大小为 3 mm×3 mm。

(4) 细沟复杂度 c 。细沟复杂度是指其中一条细沟及其分叉的总长度与它的垂直有效长度的比值,能够反映坡面细沟网的丰富程度,计算公式为:

$$c = \frac{L_{ij}}{L_j} \quad (4)$$

式中: c 是细沟复杂度; L_j 为第 j 条细沟的垂直有效长度。

(5) 细沟割裂度 μ 。细沟割裂度是指试验区域内所有细沟的平面面积之和与小区面积的比值,是无量纲参数,能够反映坡面的破碎程度和细沟侵蚀强度,计算公式为:

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^m A_j}{A} \quad (5)$$

式中: μ 是细沟割裂度; A_j 为坡面第 j 条细沟的表面积。

2 结果与分析

2.1 自然降雨特征分析

研究 2019—2020 年实际观测到 26 场天然降雨,其中 2019 年观测到 15 场降雨,降雨量为 399.4 mm,

产生地表径流的有效降雨发生 6 场;2020 年观测到 11 场降雨,降雨量为 376.5 mm,产生地表径流的有

效降雨发生 7 场。因此,在观测时段内共发生 13 场有效降雨(表 2)。

表 2 研究区自然降雨的基本特征

编号	降雨时间	降雨历时/ min	降雨量/ mm	$I_{30}/$ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	径流量/ L	产沙量/ kg
R ₁	20190716	862	31.20	26.00	2.17	6.70	0.73
R ₂	20190722	517	17.00	8.00	1.97	3.10	0.07
R ₃	20190731	1495	10.40	10.80	0.42	3.75	4.49
R ₄	20190804	597	56.40	11.20	5.67	65.00	4.97
R ₅	20190810	408	15.60	9.60	2.29	50.00	8.42
R ₆	20190820	244	22.80	27.20	5.61	33.20	12.74
R ₇	20200709	180	13.60	4.80	4.53	25.00	15.80
R ₈	20200710	244	12.00	6.60	2.95	10.90	14.00
R ₉	20200712	856	32.00	10.20	2.24	42.90	13.00
R ₁₀	20200714	25	8.40	8.40	20.16	10.90	14.00
R ₁₁	20200717	117	12.40	3.80	6.36	19.80	12.50
R ₁₂	20200812	85	10.80	3.20	7.62	14.60	10.40
R ₁₃	20200823	263	24.80	6.00	5.66	8.20	0.22

注:R₁,R₂,...,R₁₃分别代表第 1 次降雨到第 13 次降雨。下同。

2019—2020 年观测到的有效降雨总降雨量为 267.40 mm,总降雨历时为 5 893 min,总径流量为 294.05 L,总泥沙量为 111.34 kg。其中 2020 年 7 月 12 日降雨产流产沙量最高,分别为 42.90 L 和 13 kg。根据气象学对降雨等级的划分标准,将观测数据划分为小雨(<10.0 mm)、中雨(10.0~24.9 mm)、大雨(25.0~49.9 mm)、暴雨(50.0~100.0 mm)和大暴雨(>100.0 mm)5 个等级^[15]。

由图 1 可知,研究区 2 a 间共有小雨 1 场,中雨 9 场,大雨 3 场,观测期内有效降雨雨强(小雨、中雨、大雨)的频率分布为 7.7%,69.2%和 23.1%,大雨的平均降雨量是中雨和小雨的 2.57 和 4.75 倍;平均降雨量表现为:大雨>中雨>小雨,分别为 39.90,15.50,8.40 mm。平均降雨强度和 I_{30} (连续最大 30 min 降雨强度)都是随着降雨量和降雨等级的增大而增大,变化范围在 2.01~4.92 mm/h 和 8.4~15.8 mm/h。大雨、中雨和小雨对径流的贡献率为:中雨(55.40%)>大雨(37.67%)>小雨(3.58%),对泥沙的贡献率为:中雨(70.18%)>大雨(16.69%)>小雨(12.49%),这表明对坡面侵蚀影响较大的主要是中雨和大雨。

2.2 自然降雨下坡面细沟几何特征分析

砒砂岩坡面细沟的发育具有明显的时空演变的特征(图 2—3),R_前为降雨前坡面形态,降雨前期坡面较为平整。通过连续的试验观测发现,第一次降雨坡面侵蚀以溅蚀为主,随着降雨的持续,逐步形成薄

层水流,开始进入片蚀阶段;此时段坡面以片蚀为主,坡面细沟发育并不明显,仅有 6 条细沟形成,累计长度 1.69 m,细沟的平均宽度为 1.45 cm,平均深度是 0.17 cm。随着坡面薄层水流逐渐汇集成多个小股状水流,坡面逐步形成了较清晰明显的细沟(R₃),在股状水流的流路上,坡面流路两侧薄层水流的侵蚀力小于径流侵蚀力,导致坡面发生差异性侵蚀,细沟继续发育,宽度和深度继续增加,且能明显的观测到细沟雏形,其剖面形态呈宽浅型。此时(R₃)细沟数目增加为 10 条,累计长度为 4.98 m,平均宽度为 2.10 cm,平均深度为 0.258 cm。降雨的再次发生后,坡面出现无规律且零星的跌坎,同一流路的多条细沟还未连通,在坡面上表现为 R₄和 R₅的断续细沟,细沟增加 5 条,并且有大量分支出现;随着地表径流的持续冲刷,同一流路上的多条断续细沟连通成连续细沟,相邻的细沟合并,演变成错综复杂的细沟网,且细沟形状开始由宽浅型向窄深型过渡,部分沟道合并连通,沟头不断分叉形成清晰的细沟网。此时(R₇)细沟总长为 29.29 m,平均宽度为 2.51 cm,平均深度为 0.867 cm。随着细沟内股状水流的侵蚀,沟道不断合并连通,相邻沟壁的坍塌,细沟不断拓宽加深,细沟总长在 R₁₂结束后逐渐趋于稳定,此时细沟总长为 40.52 m,平均宽度为 4.31 cm,平均深度为 1.215 cm。因此,砒砂岩雨坡面细沟的发育全过程可总结为:溅蚀—片蚀—宽浅型细沟—连续细沟网—沟壁坍塌—沟道稳定。

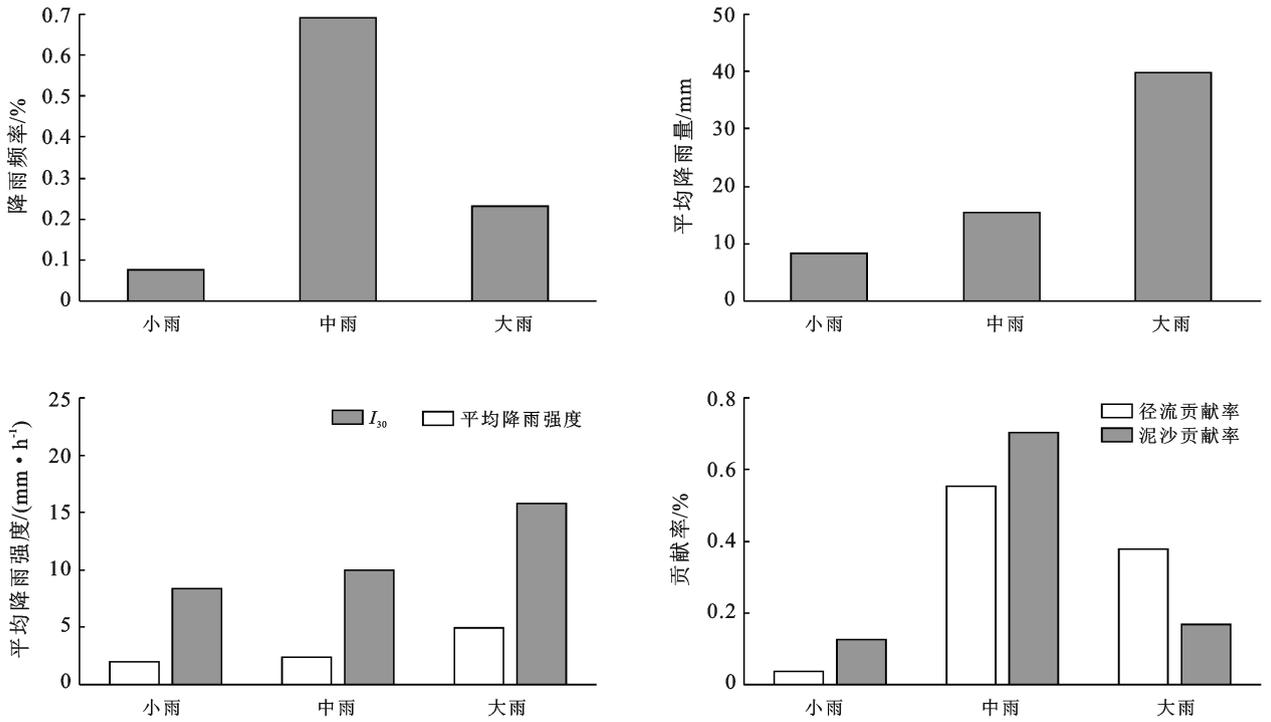


图 1 研究区坡面降雨特征

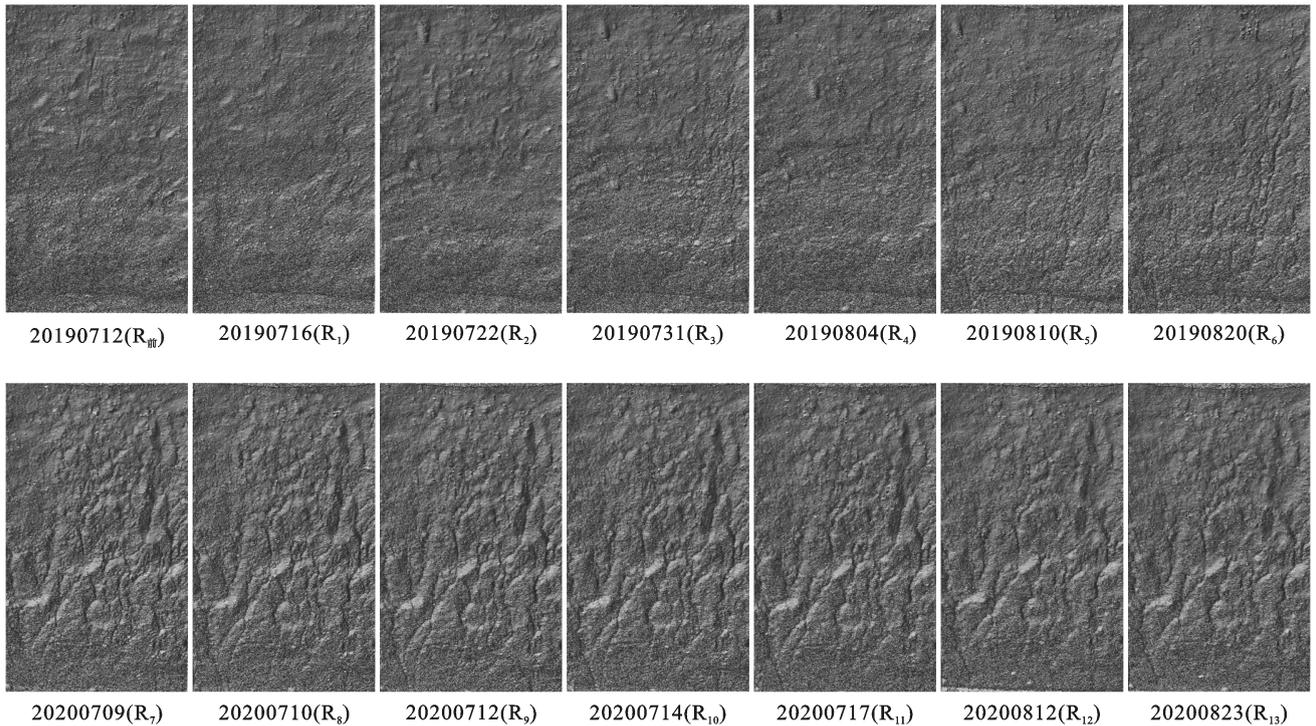


图 2 研究区自然降雨下坡面微地貌变化过程

2.3 自然降雨下坡面细沟形态特征分析

选取细沟宽深比、细沟密度、细沟表面积、细沟复杂度和细沟割裂度指标分析坡面细沟形态的时空演变过程。

由表 3 可以看出,细沟宽深比整体呈现先增大后减小的趋势,其数值在 R₄ 最大,为 16.09,这主要是因

为在侵蚀初期,尚未形成稳定的细沟形态,坡面仍然以漫流为主,下切能力较弱,沟深较浅;而 R₄ 的降雨量较前 3 次降雨明显升高,为 54.6 mm,降雨量的增大使径流量随之增大,径流的流路径变宽;在径流侵蚀的作用下,细沟宽度增大的同时,径流携带的泥沙会填充沟道的凹陷,深度会减小,导致细沟的初期

形态以宽浅型为主。随着降雨的反复发生,形成集中的股流,径流下切能力增强,坡面细沟逐渐发育,细沟宽深比在 13 场降雨过后变为 3.55,细沟发育的逐渐成熟,重力作用导致径流对地表的侵蚀不断加深,宽深比数值越来越小,形成窄深型细沟。此外,坡面的沟壑密度、细沟表面积、复杂度和割裂度均随着降雨次数的增加呈现稳步增高的趋势(表 3)。其中,细沟

密度和细沟表面积在 R_6 时有较大幅度的增大,细沟密度由 1.05 变为 1.59,增大了 1.51 倍,细沟表面积由 1.58 变为 4.71,增大了 2.98 倍,结合降雨强度分析, R_6 的降雨强度最大,侵蚀破坏力较强,对土壤表层剥离和破碎的影响较大;在径流的不断冲刷,细沟在纵向溯源侵蚀不断延伸,横向细沟分支也不断增多,导致细沟整体在形态上趋于复杂化。

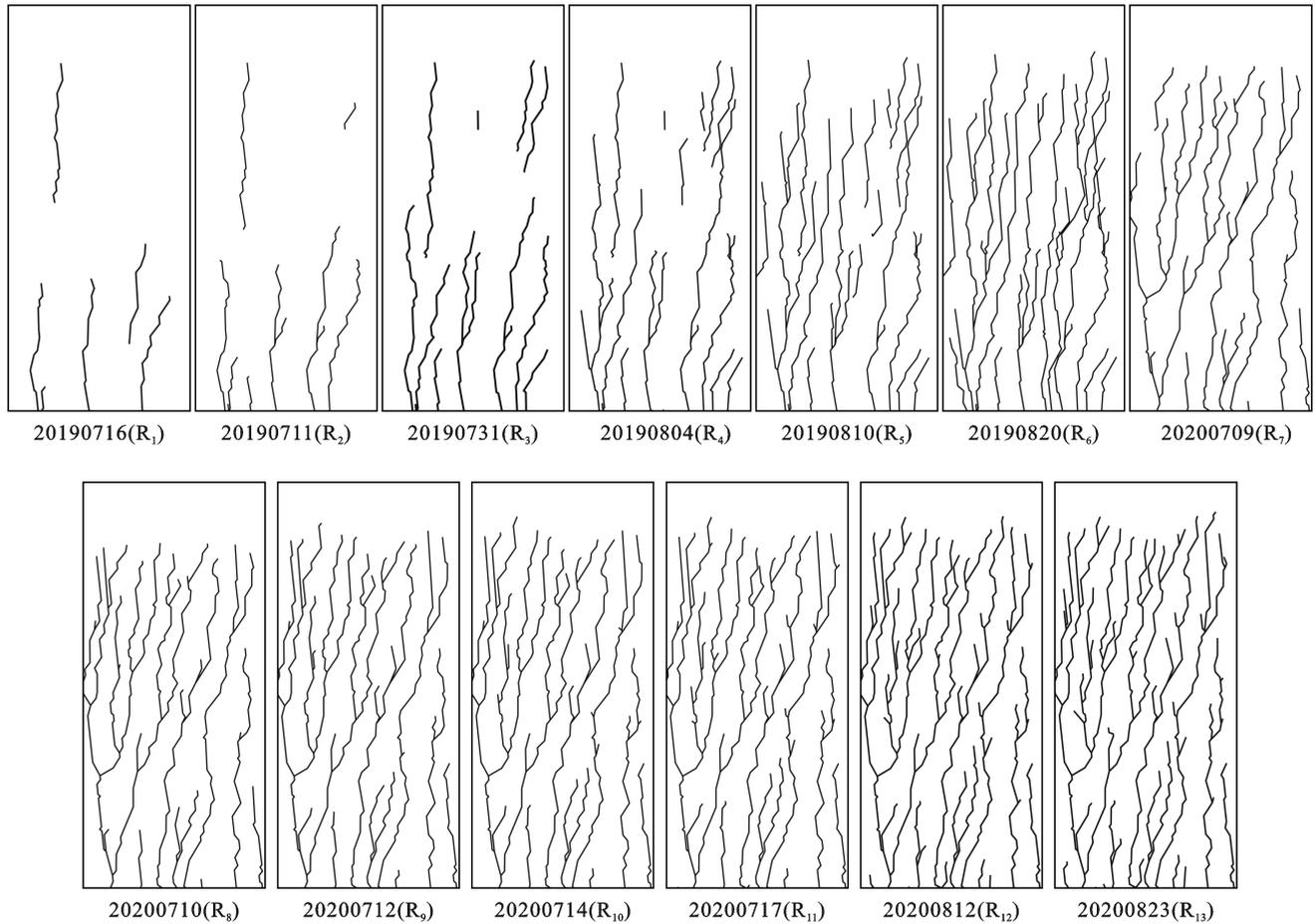


图 3 研究区自然降雨下坡面细沟形态发育过程

表 3 研究区自然降雨下坡面细沟形态特征指标变化

自然降雨	细沟宽深比	沟壑密度	细沟表面积/ m^2	细沟复杂度	细沟割裂度
R_1	8.529	0.323	0.059	1.056	0.006
R_2	8.465	0.498	0.105	1.062	0.010
R_3	8.140	0.602	0.368	1.094	0.037
R_4	16.092	1.047	0.242	1.075	0.024
R_5	5.088	1.589	0.418	1.062	0.042
R_6	5.644	2.929	0.735	1.078	0.074
R_7	2.895	3.449	1.587	1.162	0.159
R_8	4.703	3.711	1.169	1.165	0.117
R_9	2.805	3.804	1.217	1.164	0.122
R_{10}	2.700	3.804	1.628	1.165	0.163
R_{11}	3.454	3.885	1.647	1.203	0.165
R_{12}	3.207	4.052	1.746	1.164	0.175
R_{13}	3.547	4.052	1.746	1.164	0.175

2.4 自然降雨下细沟形态指标与侵蚀量的关系

由表 4 可知,细沟各相同指标之间相关性较好,细沟宽深比与沟壑密度、细沟割裂度均呈现显著负相关,沟壑密度与细沟复杂度、割裂度均呈显著正相关关系。此外,坡面细沟的各形态指标与侵蚀量之间存在紧密的相关性。坡面细沟宽深比与泥沙量呈现显著负相关关系($p < 0.05$),相关系数是 -0.595 ,但与径流量无显著相关性,这表明坡面沟道宽深比越小,坡面产沙越强,即沟道越向窄深型发育,坡面产沙量越高。沟壑密度与泥沙量呈现明显的正相关关系($p < 0.05$),相关系数为 0.566 ,说明细沟的数量的增加对坡面产沙量有着直接的影响;细沟割裂度与径流量呈现显著负相关关系,相关系数为 -0.583 。

综上,细沟形态的变化直接反映坡面产流产沙的基本情况。

表 4 研究区自然降雨下细沟形态指标与侵蚀量之间的相关系数

参数	细沟宽深比	沟壑密度	细沟复杂度	细沟割裂度	径流量	泥沙量
细沟宽深比	1					
沟壑密度	-0.788 **	1				
细沟复杂度	-0.537	0.907 **	1			
细沟割裂度	-0.654 *	0.936 **	0.917 **	1		
径流量	0.355	-0.160	-0.044	-0.583 *	1	
泥沙量	-0.595 *	0.566 *	0.419	0.282	0.782 **	1

注: * 表示在 $p < 0.05$ 水平相关性显著, ** 表示在 $p < 0.01$ 水平相关性显著。

3 讨论

3.1 自然降雨特征对坡面产流产沙的影响

自然降雨属于间歇性的降雨,与可控的人工降雨不同,每次降雨间的降雨历时、降雨强度、降雨量等均存在较大的差异,且单次降雨过程中的变化也十分复杂^[17]。降雨量和降雨强度直接影响坡面产流产沙过程,在雨滴的打击溅蚀和地表径流冲刷下,为坡面产沙提供了更多的物质来源,降雨量和降雨强度的大小,直接决定于出口断面径流泥沙量的多少^[18]。本研究中,降雨强度和产流产沙过程有着较强的一致性,图 4 清晰地反映了次降雨过程中,径流和泥沙具有明显的同步特征,且表 4 也反映出径流与泥沙具有显著正相关关系(0.782, $p < 0.01$)。就降雨量而言,中雨和大雨汇流量增加,加速了径流向出口断面的汇集,径流的紊动性也增强^[19],侵蚀能力和携沙能力也增强,相较于小雨而言,中雨和大雨的频率共计 92.3%,对径流和泥沙的贡献率达 93.07% 和 86.86%,说明径流和泥沙主要来自于较大的几场雨,这与前人在坡面和小流域产流产沙的研究结果相似^[20-21],而小

雨也会有产流产沙现象是源于研究区坡面的土壤,裸露砒砂岩的岩性特点,特别是降雨历时短,降雨强度大的瞬时降雨,且在前期有多次降雨,土壤含水量较高的坡面更容易发生侵蚀^[22]。

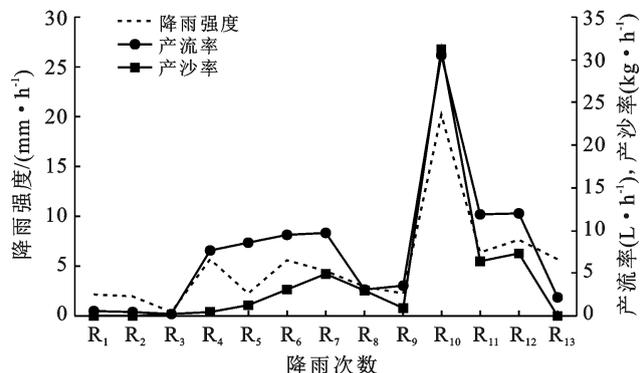


图 4 研究区坡面自然降雨强度与产流率变化特征

3.2 坡面细沟形态指标间的变化关系

自然降雨具有无规律性的特点,但对坡面的侵蚀具有明显的累积作用,随着次降雨次数的增多,坡面细沟的形态由宽浅型向窄深型过渡。细沟的长、宽、深都在侵蚀过程中不断变化。由图 5 可知,细沟的平均宽度、累积长度和平均深度两两之间均存在明显的正相关关系,且其拟合系数在 0.72~0.99 之间,说明细沟参数之间并不是相互独立的,而是相互关联、相互影响的。细沟的发展发育过程是多维度的变化,溯源侵蚀、重力侵蚀和径流剪切侵蚀对坡面的侵蚀发挥协同作用,细沟的发展发育受各作用力之间的共同作用,能反映出坡面的综合侵蚀过程^[23]。特别是在几场暴雨过后,细沟形态变化差异显著,宽深比、沟壑密度等指标的变化幅度均出现明显的提升,加之自然降雨对坡面侵蚀的累积作用,随着次降雨的反复发生,径流剪切力增大,对土壤的剥蚀、结构破坏的能力增强,破坏土体稳定性,下切侵蚀的作用更为明显,这与吕刚等^[24]的研究结果一致。

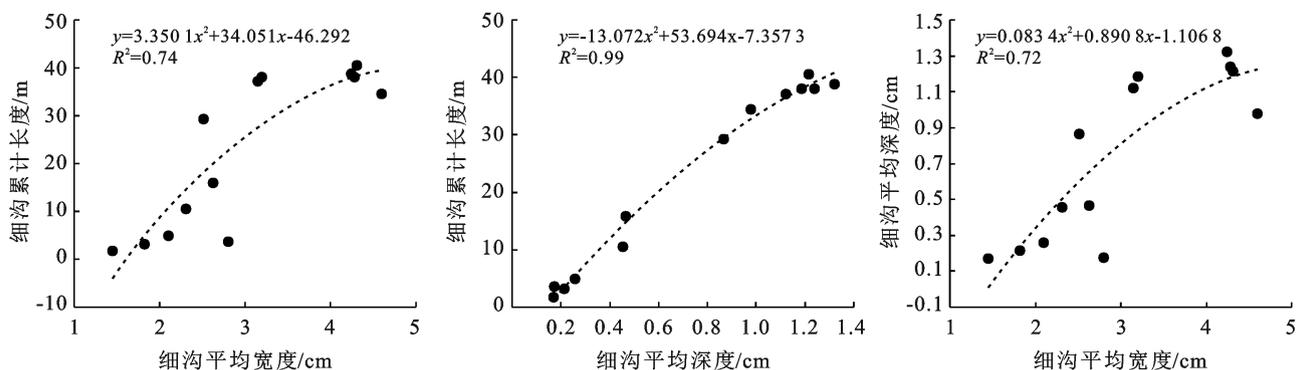


图 5 研究区自然降雨下坡面细沟形态参数之间的关系

4 结论

(1) 研究区 2019—2020 年发生 13 场有效降雨,总降雨量为 267.40 mm,总降雨历时为 5 893 min,总径流量为 294.05 L,总泥沙量为 111.34 kg。降雨对径流和泥沙的贡献率表现为:中雨>大雨>小雨,对坡面侵蚀影响较大的主要是中雨和大雨。

(2) 在第 12 次降雨后坡面细沟达到稳定,细沟整体在形态上趋于复杂化,其总长达为 40.52 m,平均宽度为 4.31 cm,平均深度为 1.22 cm。次降雨坡面细沟的发育过程表现为:溅蚀—片蚀—宽浅型细沟—连续细沟网—沟壁坍塌—沟道稳定。

(3) 自降雨条件下细沟各形态指标均呈现明显的二次多项式相关关系,细沟的形态指标与侵蚀量呈现显著相关关系,细沟形态的变化直接反映坡面产流产沙的基本情况。

[参 考 文 献]

- [1] 姚文艺,刘国彬.新时期黄河流域水土保持战略目标的转变与发展对策[J].水土保持通报,2020,40(5):333-340.
- [2] 张建文.覆沙坡面细沟侵蚀发育过程与形态特征研究[D].陕西 西安:西安理工大学,2020.
- [3] 卫午毓,肖培青,张攀,等.复合侵蚀作用下砒砂岩坡面产流产沙过程试验[J].水土保持学报,2020,34(2):18-22.
- [4] Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Characteristics of rill erosion in spoil heaps under simulated inflow: A field runoff plot experiment [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 202: 104655.
- [5] 常平,李晓丽,李明玉,等.冲蚀条件下砒砂岩坡面细沟侵蚀特性分析[J].人民黄河,2018,40(5):98-102,106.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 师晨迪,王曙光,李娟,等.砒砂岩与沙复配土耕种后团聚体变化研究[J].人民黄河,2020,42(S1):65-66,68.
- [9] 李玉进,胡澍,焦菊英,等.黄土丘陵区不同侵蚀环境下土壤有机碳对植被恢复的响应[J].生态学报,2017,37

(12):4100-4107.

- [10] 秦富仓,杨振奇,李龙.砒砂岩区土壤侵蚀机理与生态修复技术研究进展[J].北京林业大学学报,2020,42(12):142-150.
- [11] 杨振奇.裸露砒砂岩区人工植被对水力侵蚀的调控机制研究[D].内蒙古 呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [12] 王伦江,张兴昌,苜蓿影响砒砂岩陡坡侵蚀的水动力学机理研究[J].土壤学报,2020,57(2):284-295.
- [13] 王其东,高海鹰,梁止水,等.新型亲水性聚氨酯对砒砂岩边坡抗降雨侵蚀的影响[J].水土保持学报,2016,30(3):29-32,114.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 杨振奇,郭建英,秦富仓,等.裸露砒砂岩区降雨条件下坡面微地形变化规律[J].水土保持学报,2021,35(3):111-118.
- [17] 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.
- [18] 安娟,高开通,丁柳,等.横坡垄作下雨型对褐土坡面细沟侵蚀过程的影响[J].水土保持学报,2019,33(1):32-38.
- [19] 吴淑芳,吴普特,原立峰.坡面径流调控薄层水流水力特性试验[J].农业工程学报,2010,26(3):14-19.
- [20] 安晨,方海燕,王奋忠.密云水库上游坡面产流产沙特征及降雨响应:以石匣小流域为例[J].中国水土保持科学,2020,18(5):43-51.
- [21] 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.
- [22] Tu Anguo, Xie Songhua, Yu Zhongbo, et al. Long-term effect of soil and water conservation measures on runoff, sediment and their relationship in an orchard on sloping red soil of Southern China [J]. Plos One, 2018, 13(9): e0203669.
- [23] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.降雨强度和坡度对细沟形态特征的综合影响[J].农业机械学报,2015,46(7):162-170.
- [24] 吕刚,贾晏泽,刘雅卓,等.褐土与棕壤坡耕地细沟侵蚀发生的阶段性水沙变化[J].水土保持学报,2020,34(5):42-48.