

# 横坡垄作下雨型对褐土坡面细沟侵蚀过程的影响

安娟<sup>1</sup>, 高开通<sup>2</sup>, 丁柳<sup>1</sup>, 于妍<sup>1</sup>, 王璇<sup>1</sup>

(1. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东 临沂 276005;

2. 平邑县水土保持局, 山东 临沂 273300)

**摘要:** 雨型对细沟侵蚀过程起关键作用, 而横垄坡面具有独特的细沟侵蚀特征。为定量研究雨型对横垄坡面细沟侵蚀过程的影响, 以褐土横垄坡面为研究对象, 设计了降雨动能、降雨量和平均雨强相同的4种雨型, 采用可同时调节垄向和坡面坡度的土槽进行模拟降雨, 分析了各雨型下细沟发育形态、产流产沙特征和细沟水流的水动力特性等。结果表明: 雨型间细沟沟头溯源、沟壁崩塌和沟底下切侵蚀速率的不同导致细沟形态具有明显差异, 增加—减弱型、减弱—增加型和减弱型的沟宽和沟深较增加型分别增加158.8%和38.9%, 115.7%和-27.8%, 21.6%和-33.3%, 相应宽深比的增加率分别为14.9%, 60.4%, 82.6%。雨型间的细沟径流量和侵蚀量均差异显著, 径流量为增加—减弱型>减弱—增加型>减弱型>增加型, 而侵蚀量为增加—减弱型>减弱型>减弱—增加型>增加型。4种雨型下产沙率与径流率之间均符合幂函数关系, 但增加—减弱型、减弱型和减弱—增加型方程中的指数较增加型(0.54)分别增加2.52, 2.46, 1.46倍。雨型间差异最大的水力学参数为雷诺数, 侵蚀动力参数则为水流功率; 增加—减弱型、减弱—增加型和减弱型的雷诺数和水流功率较增加型分别显著增加107.0%和106.8%, 42.2%和41.9%, 16.6%和16.7%。研究结果有助于深入理解横坡垄作对坡面细沟侵蚀过程的作用机制, 并为横坡垄作措施的合理利用提供依据。

**关键词:** 雨型; 横坡垄作; 细沟; 产流产沙; 褐土

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)01-0032-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2019.01.006

## Effects of Storm Patterns on Rill Erosion Process of Cinnamon Soil Hillslope in a Contour Ridge System

AN Juan<sup>1</sup>, GAO Kaitong<sup>2</sup>, DING Liu<sup>1</sup>, YU Yan<sup>1</sup>, WANG Xuan<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005; 2. Pingyi County Soil Conservation Service, Linyi, Shandong 273300)

**Abstract:** Storm pattern plays a key role on rill erosion processes, and contour ridging has the unique characteristic of rill erosion. In this study, simulated rainfall experiment was conducted to determine the characteristics of rill morphology, runoff and sediment yielding, flow hydraulic characteristics and dynamic mechanisms of rill erosion. Using the runoff box for simultaneously changing the row grade and field slope, four storm patterns (the rising, falling, rising—falling, and falling—rising patterns) were set on cinnamon soil in a contour ridge system. All patterns included three rainfall intensities: 30, 60, and 90 mm/h, and comprised the same kinetic energy, total rainfall amount, and average rainfall intensity. Results showed that the differences in rates of headward erosion, bank landslip, and the downcutting of rill bottom among storm patterns greatly changed rill morphology. Compared with the rising pattern, rill width and depth from the rising—falling, falling—rising, and falling patterns increased by 158.8% and 38.9%, 115.7% and -27.8%, 21.6% and -33.3% respectively, while the correspondingly increased ratios of width to depth were 14.9%, 60.4%, and 82.6%, respectively. Rill runoff and sediment yield showed significant differences among storm patterns. Runoff ranked in the following order: the rising—falling > falling—rising > falling > rising pattern, and sediment yield was in order of the rising—falling > falling > falling—rising > rising pattern. Regardless of storm pattern, power function relationship was found between runoff rate and sediment yield rate, while the exponent in the rising—falling, falling, and falling—rising patterns increased by 2.52, 2.46, and 1.46 times

respectively, compared with the rising pattern. As for rill flow hydraulic characteristics, the largest difference occurred in Reynolds number, and stream power was in dynamic mechanisms parameter. Reynolds number and stream power from the rising-falling, falling-rising, and falling patterns significantly increased by 107.0% and 106.8%, 42.2% and 41.9%, 16.6% and 16.7%, respectively, compared with the rising pattern. These findings would help understand the mechanism of contour ridge influence on rill erosion process, and was of great importance to apply the contour ridge tillage for soil erosion control.

**Keywords:** storm pattern; a contour ridge system; rill runoff and sediment yielding; cinnamon soil

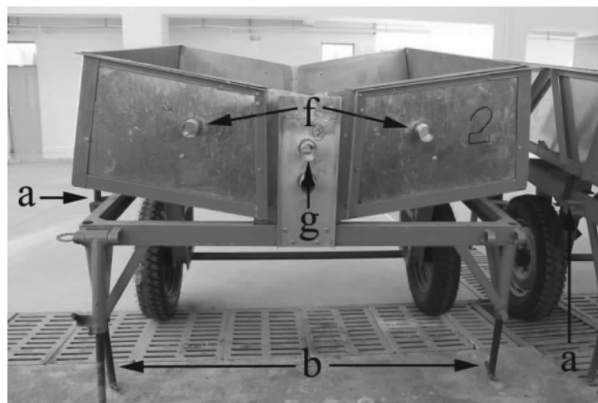
细沟侵蚀作为坡面沟蚀的初期阶段,其一旦发生坡面土壤侵蚀量将增加几倍甚至几十倍<sup>[1-2]</sup>。细沟作为输送径流泥沙和污染物的重要通道,不仅造成土壤质量退化、土地生产力下降,还会导致水体富营养化等问题<sup>[3-5]</sup>。细沟侵蚀强度与雨型密切相关。雨型,即次降雨过程中随降雨历时变化不同降雨强度的组合。国内外部分学者基于室内模拟降雨和野外定位观测试验,就雨型对平坡坡面细沟间侵蚀产流产沙特征等方面展开了初步研究,但由于雨型划分标准的不统一而导致研究结果存在很大争议。Dunkerley<sup>[6]</sup>设计了平均和峰值雨强相同的雨型,发现变雨强降雨型下的径流率和峰值径流量是均匀雨型下的 85%~570%;An 等<sup>[7]</sup>研究了总降雨量和雨强分布相同雨型下的侵蚀过程,认为雨型间的径流量无显著差异。温磊磊等<sup>[8]</sup>研究了平均降雨强度和降雨量相同雨型下的产沙特征,发现侵蚀总量表现为减弱型>均匀型>延迟型>峰值型;郑粉莉等<sup>[5]</sup>设计了总降雨量和雨强分布相同的雨型,发现侵蚀量大小顺序为峰值型>谷值型>减弱型>均匀型。天然降雨观测下,Mohamadi 等<sup>[9]</sup>将降雨特征按照雨强和降雨历时划分成不同雨型,认为雨型间侵蚀量为增加型>增加-减弱型>减弱型;邬铃莉等<sup>[10]</sup>选取雨量、历时、雨强和最大 30 min 雨强为雨型划分标准,结果表明侵蚀量为增加型>峰值型>减弱型。然而,雨型对横坡坡面细沟侵蚀过程的影响与耕作方式紧密相关。横坡垄作因具有拦蓄雨水、增加入渗、减少水土流失的作用,成为被广泛采用的保护性耕作措施之一<sup>[11]</sup>。然而,受垄向微坡度的影响,垄沟内易形成低洼区域,导致雨水在此积聚。当汇集的雨水超过垄沟蓄水能力时,漫流发生。因具有较高的水头,漫流的剪切力较强,剥蚀垄面的土体颗粒,诱发细沟形成,并导致横坡垮塌,加剧土壤侵蚀<sup>[12]</sup>。可见,横坡坡面具有独特的土壤侵蚀特征。然而,现有研究<sup>[13-14]</sup>多关注横坡垄作相对于顺坡垄作、平坡等耕作方式对土壤侵蚀的控制作用。因此,本研究以褐土横坡坡面为研究对象,基于室内模拟降雨试验,研究 4 种雨型(增加型、减弱型、增加-减弱型和减弱-增加型)下,细沟发育形态特征,分析坡面细沟产流产沙特征,量化细沟水流动力学特性,阐明雨型对细沟侵蚀过程的影响机制,以期深入

理解横坡坡面土壤侵蚀机理,为横坡垄作措施的水保效益评价提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

降雨试验于 2016 年 9 月在山东省水土保持和环境保育重点实验室降雨大厅内进行。人工模拟降雨试验装置为安装 Veejet 80100 喷头的槽式模拟降雨系统。该系统通过调节喷头经过喷水窗口的频率来控制雨强<sup>[15]</sup>,有效降雨面积为 2.2 m×12 m,降雨均匀度 89%以上。采用垄向坡度与坡向坡度可同时调节的土槽,主体由通过铰链连接的 2 个分体土槽构成,每个分体土槽长×宽为 160 cm×80 cm(图 1)。通过调节螺旋(a),获取不同的垄向坡度,调节范围为 0~15°。坡向坡度通过安装在支撑腿上的螺旋(b)进行调节,范围为 0~25°。出口处(g)用于收集径流泥沙样。



注:a 为垄向坡度调节螺旋;b 为坡向坡度调节螺旋;f 为上坡位置产流产沙收集口;g 为垄面下坡位置产流产沙收集口。

图 1 试验土槽

试验采用的土壤为鲁中南山地丘陵区广泛分布的褐土。土样取自玉米地的耕作层,其 pH 为 7.3,黏粒、粉粒与砂粒含量分别为 14.4%,84.59%,13.97%,有机质含量为 25.6 g/kg。

### 1.2 试验设计

根据当地降雨数据和侵蚀性降雨标准<sup>[16]</sup>,结合试验实际情况,设计 4 种降雨量、平均雨强和降雨动能相同的雨型:增加型(雨强逐渐增大,30,60,90 mm/h)、减弱型(雨强逐渐减小,90,60,30 mm/h)、增加-减弱型(雨强在降雨中期达到峰值,60,90,30 mm/h)和减弱-增加型(雨强在降雨中期达到最小

值,60,30,90 mm/h)。30,60,90 mm/h 雨强在次降雨过程中各持续 20 min。

野外实际调查数据表明,横垄垄宽 60~80 cm,垄沟方向上坡长 150 cm 左右会出现垄沟低洼积水区域,且横坡系统下沟道的长度一般在 0~6 m。为模拟垄沟内积水漫流情形下细沟侵蚀过程,本研究基于垄沟内的微观汇水单元,设计了垄宽为 80 cm 和坡长 160 cm 的横垄坡面。其中,针对垄宽,垄上侧在土槽平面上的投影线长度约为下侧的 2 倍;即 80 cm 的垄宽,上侧垄面在土槽平面上的投影为 53.3 cm,下侧垄面则为 26.7 cm。另外,野外调查发现横垄的垄向坡度为 2°~10°,垄高 8~16 cm,且坡向坡度一般集中在 5°~15°。因此,降雨试验在垄向坡度 6°、垄高 12 cm 和坡向坡度 10°的横坡垄作系统下开展。共设计 8 场降雨试验,即每个雨型下重复 2 次。

### 1.3 试验步骤

试验用土风干后未过筛,以保持原有的土壤结构。利用分层法,按照相应的土壤容重进行土槽填充。土槽底部以 1.5 g/cm<sup>3</sup> 的容重装填,分为 4 层共 20 cm,每层 5 cm,用于模拟犁底层。装上层土之前用 1 cm 厚的木板抓毛下层土壤表面,以便保持颗粒空间分布的相似性和防止土层之间出现分层。之后按照土槽四壁勾画的垄作轮廓线,以 1.15 g/cm<sup>3</sup> 的容重修建土垄。

填装土槽完毕后,进行雨强为 10 mm/h 的前期预降雨。此过程中,将 1 mm×1 mm 尼龙纱网覆盖在土槽之上以减弱雨滴打击对土壤表层的影响。预降雨 12 h 后,按照设计的雨型进行人工模拟降雨。降雨过程中时刻观察坡面的变化,记录坡面细沟出现时间和位置,量测细沟长度、宽度和深度;染色剂法测定坡面和细沟内的径流流速;用温度计测量径流温度,以便计算水流黏滞系数。坡面产流后,取样间隔为 1~2 min;细沟发生后,收集样品的间隔为 30 s。每场降雨结束后,收集的样品立即称重,然后放在 105 °C 的烘箱中干燥 12 h。累计次降雨中所有样品的径流与泥沙量,获取本场降雨总径流和产沙量。

### 1.4 数据分析

利用 SPSS 16 的方差分析(ANOVA)对径流量、侵蚀量和水动力学参数进行显著性检验,并基于最小显著差法(LSD)开展多重比较。采用 SPSS 16 的回归分析模拟径流和侵蚀量间的关系,并检验回归系数的显著性。将直尺测量法获取的细沟形态的三维坐标数据导入 Surfer 8 生成细沟 3D 曲面图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同雨型下细沟发育特征

降雨过程中,漫流在垄面集中成小股状水流后,不

断剥离垄面土壤,出现小跌坎。随着跌坎的不断贯通,坡面进入细沟侵蚀阶段,此时主要表现为溯源侵蚀。随垄沟内汇集雨水不断进入沟道,细沟侵蚀进一步加剧,此时沟壁扩张和沟底下切成为主要侵蚀方式,并最终诱发横垄垮塌,此时坡面进入细沟侵蚀强烈阶段。

不同雨型下细沟形态特征存在明显差异(图 2)。减弱—增加型下沟长 60 cm,增加型、减弱型和增加—减弱型的沟长较减弱—增加型分别减少 1.7%,8.3%,8.3%。增加型下沟宽 4~6 cm,平均值 5.1 cm;沟深 0.5~3.5 cm,平均值 1.8 cm。增加—减弱型、减弱—增加型和减弱型的沟宽和沟深较增加型分别增加 158.8%和 38.9%,115.7%和-27.8%,21.6%和-33.3%。宽深比可反映细沟沟槽形状,增加—减弱型、减弱—增加型和减弱型的宽深比较增加型(2.83)分别增加 14.9%,60.4%,82.6%,这主要与细沟发育的主导过程有关。然而,横垄下细沟发育的宽深比高于平坡<sup>[17]</sup>。说明,横坡垄作措施下沟壁崩塌扩张较沟底下切更为活跃。

细沟发育过程决定了细沟形态。横垄坡面细沟侵蚀包括沟头溯源侵蚀、沟底下切侵蚀和沟壁扩张侵蚀 3 个过程。随雨型中雨强发生时序的变化,细沟发生时刻、沟头溯源侵蚀、沟底下切侵蚀和沟壁崩塌侵蚀速率发生了变化。增加型下,降雨后 50.45 min 细沟发生,增加—减弱型、减弱—增加型和减弱型下细沟发生时间较增加型分别缩短 27.01,12.28,10.37 min。表明,雨型间细沟发育持续时间不同。针对细沟发育方式,增加型下,41 min 时几个跌坎形成下切沟头,但沟头溯源侵蚀活跃度较低;50.45 min 细沟发生后,沟壁扩张成为细沟发育主要方式;56 min 后,细沟发育以沟底下切为主。减弱型下,降雨 25 min 后坡面垂直距离 20 cm 出现小跌坎,随后坡面 50 cm 又出现跌坎,但沟头溯源侵蚀活跃度低,细沟发育以沟壁崩塌为主。减弱—增加型下,23 min 时坡面垂直距离 15 cm 处出现跌坎,沟头溯源侵蚀活跃,侵蚀速率约为 1.35 cm/min,后期沟壁扩张成为主要侵蚀方式。增加—减弱型下,降雨 19.20 min 时坡面垂直距离 20,45 cm 相继出现小跌坎,但细沟发育以 45 cm 处的跌坎为主,溯源侵蚀活跃速率为 0.9 cm/min;沟壁崩塌和沟底下切强烈导致 31 min 时横垄发生垮塌。

细沟发生前坡面土壤的可蚀性和细沟发生时所处的雨强时段影响了细沟发育过程。土壤可蚀性值随降雨进行呈现逐渐增加达到最大值后逐渐趋向平稳的趋势<sup>[18]</sup>,而这与雨强密切相关。细沟发育后,增加型、减弱型、减弱—增加型和增加—减弱型处于的雨强分别为 90 mm/h、30 mm/h、30,90 mm/h 和 90,30 mm/h。细沟发生前,不同雨型下坡面处于不同的雨强发生时段,因此导致雨型间土壤可蚀性值存在较大差异。

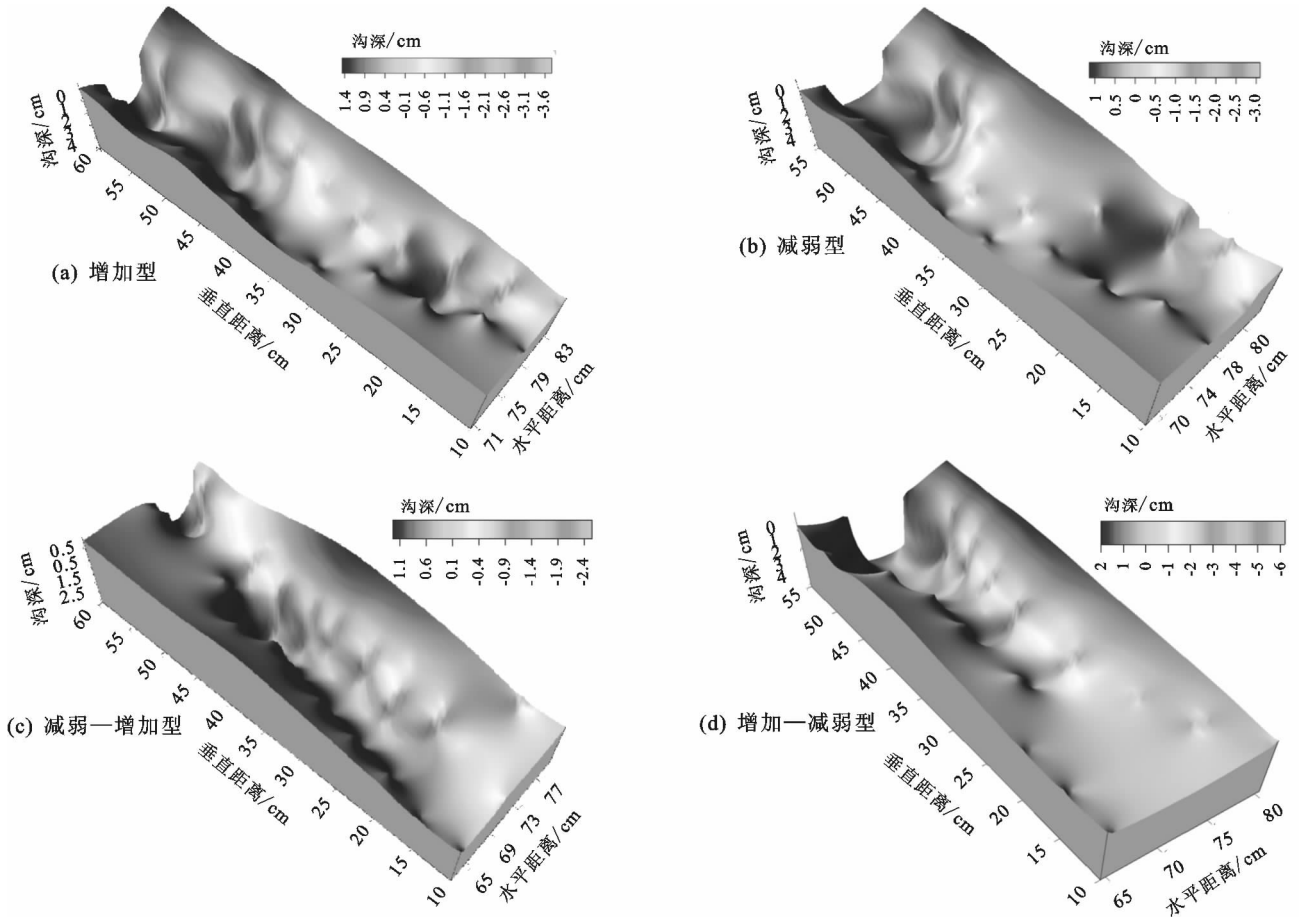


图 2 细沟形态

## 2.2 雨型对细沟产流产沙特征的影响

2.2.1 雨型对细沟径流和侵蚀量的影响 雨型间细沟发育形态的差异将影响细沟产流和产沙过程。横垄发生垮塌的增加—减弱型下的径流和侵蚀量比例均在 75% 以上(表 1)。说明横垄垮塌后,其水土保持

作用基本丧失。垄沟垮塌现象在中国北方土石地区比较普遍,且容易诱发浅沟的形成,并随垄作周期在坡面上反复出现,是横坡垄作坡面土壤流失剧增的主要原因<sup>[19]</sup>。因此,应用横坡垄作措施时应重点加强地面覆盖,降低横垄垮塌发生机率。

表 1 不同雨型下径流量和侵蚀量

雨型	径流量			侵蚀量		
	细沟径流量/mm	总径流量/mm	比例/%	细沟侵蚀量/(g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	总侵蚀量/(g·m <sup>-2</sup> ·h <sup>-1</sup> )	比例/%
增加型	7.99c	18.60	38.50c	245.25c	642.66	38.16c
减弱型	8.70c	26.21	33.19d	410.32b	666.26	61.59b
减弱—增加型	14.19b	23.29	58.92b	407.27b	711.32	57.25b
增加—减弱型	23.46a	27.79	84.39a	711.10a	920.06	77.28a

注:同列不同小写字母表示各雨型在  $P < 0.05$  水平上差异显著。

雨型间径流量及其所占总径流量的比例均存在显著差异。不同雨型下径流量为 7.99~23.46 mm, 所占总径流的比例为 33.19%~84.39%。径流量大小顺序为增加—减弱型>减弱—增加型>减弱型>增加型,与增加型相比,增加—减弱型、减弱—增加型和减弱型的细沟径流量分别增加 200.9%,67.7%,8.9%,相应径流比例分别增加 119.2%,53.1%,-13.8%。然而,以往在平坡坡面开展的相似研究<sup>[20]</sup>认为雨型对径流的产生无显著影响。这是因为横垄坡面细沟发生后,垄沟内汇聚的雨水逐渐进入沟道,而流出雨水量的多寡

主要取决于细沟发育形态,而平坡系统下沟道内的径流主要来源于坡面雨水的汇集。

不同雨型下侵蚀量为 245.25~711.10 g/(m<sup>2</sup>·h),所占比例为 38.16%~77.28%。雨型间细沟侵蚀量差异表现为增加—减弱型>减弱型>减弱—增加型>增加型。与增加型相比,增加—减弱型、减弱型和减弱—增加型的侵蚀量分别显著增加 189.9%,67.3%,66.1%,相应的侵蚀比例增加率分别为 102.5%,61.4%,50.0%,这与以往在平坡上开展的研究<sup>[5,8]</sup>结果不一致。这是因为垄沟内汇集雨水的流出不仅

搬运垄面的颗粒物质,还将垄沟内沉积的泥沙搬运至细沟内,从而导致雨型对水沙关系的影响机制较平坡下发生了改变。

2.2.2 雨型对细沟产流产沙过程的影响 为进一步探讨雨型间侵蚀过程的差异,分析了径流率和泥沙浓度的动态变化,以便明确雨型的变化是否改变了产流产沙过程。增加型下,径流率随降雨进行呈稳定后急剧降低并最终趋于平稳的趋势(图 3),这是因为细沟发生后,虽然垄沟内汇集的雨水不断进入沟道,但细沟发育活跃度较低,且雨水在沟道内下渗至深层。减弱型下,由于细沟发育以沟壁崩塌为主,沟

宽深比大,垄沟内汇水快速进入沟道,导致径流率急剧增加,后随垄沟内汇集雨水的减少,径流率随降雨历时呈波动降低趋势。减弱—增加型下,细沟沟壁崩塌和沟底下切活跃,垄沟内积聚的雨水不断进入沟道且雨水在沟道内下渗,致使径流率随降雨进行呈动态增长趋势。增加—减弱型下,细沟发育比较活跃,径流率随降雨进行逐渐增加;横垄发生垮塌后由于垄沟内汇集雨水的倾泻而出导致径流率急剧降低,随细沟形态稳定和垄沟内雨水的减少,径流率呈平稳趋势。以上研究结果表明,产流过程对雨型变化具有明显响应。

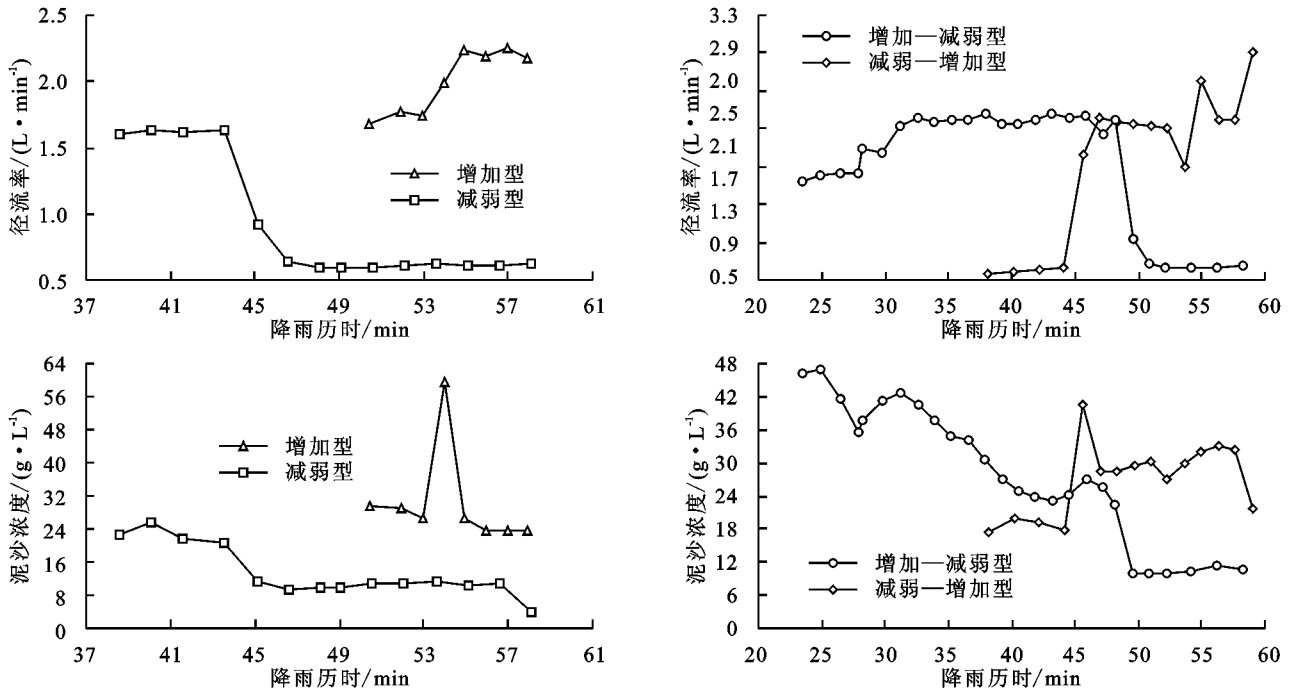


图 3 不同雨型下径流率、泥沙浓度的动态变化

不同雨型的泥沙浓度随降雨进行呈不同的动态变化趋势(图 3),这主要与细沟形态和径流搬运能力有关。增加型下,泥沙浓度随降雨历时呈波动降低后急剧增加到极值最终逐渐降低的趋势。减弱型下,泥沙浓度随降雨进行表现为逐渐降低。说明这 2 种雨型下细沟产沙过程主要受制于搬运物质的多少。减弱—增加型和增加—减弱型下,泥沙浓度随降雨进行呈增加—降低交替变化。这主要是因为细沟发育时强时弱,且径流率随降雨历时波动变化。说明这 2 种雨型下土壤分离和径流搬运能力限制了产沙过程。以上结果表明,雨型变化改变了产沙过程。

2.2.3 雨型对径流与侵蚀量之间关系的影响 4 种雨型下,产沙率随径流率增加均呈增大趋势(图 4)。利用线性函数、指数函数和幂函数对产沙率和径流率之间的关系进行了模拟,发现二者之间更符合幂函数关系,幂函数方程的可决系数都在 0.67 以上,这与以往在平坡开展的研究<sup>[21]</sup>结果一致。不同雨型下幂函

数方程中的指数为 0.54~1.90,均低于 2,而以往在平坡开展的研究<sup>[7]</sup>认为指数大于 2。这是因为垄沟的存在使径流流速变缓,从而削弱了径流搬运能力;垄沟内沉积泥沙的输出会填充沟道,在一定程度上会阻碍分离颗粒的搬运。说明细沟发生后,横坡垄作措施较平坡依然发挥一定的土壤侵蚀控制作用。然而,雨型间幂函数方程中的指数存在明显差异。与增加型相比,增加—减弱型、减弱型和减弱—增加型方程中的指数分别增加 2.52, 2.46, 1.46 倍。说明雨型的变化改变了产沙机制。

### 2.3 雨型对细沟水流水动力学特性的影响

2.3.1 雨型对细沟水流水力学特征的影响 细沟水流水力学参数大小直接关系到细沟发育形态、径流侵蚀能力和挟沙能力。为进一步探讨雨型间侵蚀过程的差异,对比分析了细沟水流水力学参数。发现雨型间各水力学参数具有不同的差异,其中雷诺数的差异最大(表 2)。与增加型(1 261.46)相比,减弱型、减弱

一增加型和增加一减弱型的雷诺数分别显著增加 16.6%, 42.2%, 107.0%。已有研究<sup>[22]</sup>表明, 雷诺数介于 1 000~2 000 时, 细沟水流为过渡流; 雷诺数大于 2 000 时, 细沟水流为紊流。因此, 增加型、减弱型和减弱一增加型的细沟水流均属于过渡流, 而增加一减弱型的水流则为紊流。不同雨型下, 细沟水流的弗劳德数介于 0.30~0.39, 即 4 种雨型的细沟水流均

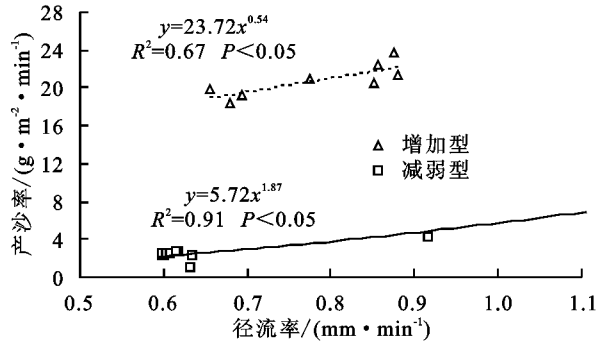


图 4 产沙率随径流率的动态变化

表 2 不同雨型下的水动力学参数

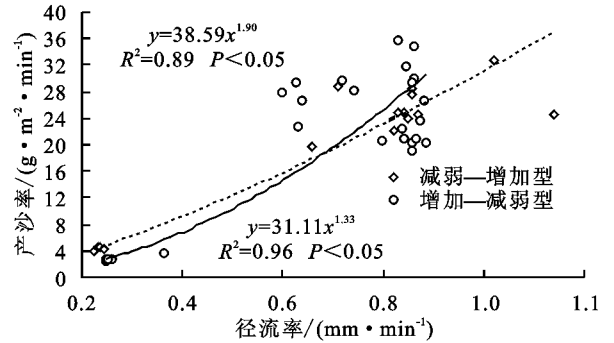
雨型	雷诺数	弗劳德数	阻力系数	径流剪切力/Pa	水流功率/(N·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	单位水流功率/(m·s <sup>-1</sup> )
增加型	1261.46d	0.39a	9.30c	17.89d	2.22d	0.022a
减弱型	1471.35c	0.37ab	10.21c	20.44c	2.59c	0.022a
减弱一增加型	1793.66b	0.34b	12.12b	24.70b	3.15b	0.022a
增加一减弱型	2611.45a	0.30c	15.68a	34.58a	4.59a	0.023a

2.3.2 雨型对细沟侵蚀动力学特征的影响 国际上流行的土壤侵蚀物理模型中, 主要采用径流剪切力、水流功率或单位水流功率等水力学参数反映侵蚀产沙水动力机制。细沟发育过程中, 侵蚀动力学参数的变化对细沟侵蚀特征等起决定作用。雨型间径流剪切力和水流功率差异显著, 而单位水流功率无明显差异(表 2)。雨型间侵蚀动力学参数差异表现为增加一减弱型>减弱一增加型>减弱型>增加型, 这与不同雨型下侵蚀量的排序一致。与增加型相比, 减弱型、减弱一增加型和增加一减弱型的径流剪切力和水流功率分别增加 14.3%和 16.7%, 38.1%和 41.9%, 93.3%和 106.8%。可见, 水流功率对雨型变化的响应最明显。说明细沟水流沿接触面方向的剪切力和顺坡流动时所具有的势能受到雨型变化影响, 而侵蚀土壤过程中能量的消耗受之影响不明显。这是因为单位水流功率是流速和坡降的乘积, 而不同雨型的流速无明显差异。

### 3 结论

(1) 增加一减弱型、减弱一增加型和减弱型的沟宽和沟深较增加型分别增加 158.8%, 38.9%, 14.9%和 115.7%, -27.8%, 60.4%, 宽深比增加 21.6%, -33.3%, 82.6%, 这主要是因为雨型间细沟沟头溯源、沟壁崩塌和沟底下切侵蚀速率不同。

属于缓流, 而减弱型、减弱一增加型和增加一减弱型的弗汝德数较增加型显著增加 30.0%, 23.3%, 13.3%。针对阻力系数, 减弱型、减弱一增加型和增加一减弱型较增加型分别增加 9.8%, 30.3%, 68.6%。这是因为细沟发育过程中细沟形态和径流自身阻力是影响细沟水流的主要阻力<sup>[23]</sup>, 而雨型间细沟发育和水沙关系存在明显差异(图 2 和图 4)。



(2) 增加一减弱型、减弱一增加型和减弱型的径流量较增加型分别显著增加 200.9%, 67.7%, 8.9%, 而相应的侵蚀量分别显著增加 189.9%, 66.1%, 67.3%。发生横垄垮塌的增加一减弱型下的细沟径流和侵蚀量所占总量比例均在 75%以上。

(3) 不同雨型下产沙率与径流率之间符合幂函数关系, 但雨型间幂函数方程中的指数差异明显且均小于 2。雨型间的产产沙过程均存在明显差异。

(4) 雨型间差异最大的水力学参数为雷诺数, 侵蚀动力参数则为水流功率。减弱型、减弱一增加型和增加一减弱型的雷诺数和水流功率较增加型分别显著增加 16.6%和 16.7%, 42.2%和 41.9%, 107.0%和 106.8%。

#### 参考文献:

- [1] 丁文峰, 李占斌, 丁登山, 等. 坡面细沟侵蚀产沙时空分布规律试验研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(1): 19-23.
- [2] Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, et al. Rill development and soil erosion: A laboratory study of slope and rainfall intensity [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2010, 35(12): 1456-1467.
- [3] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 细沟侵蚀动力过程输沙能力试验研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 476-482.
- [4] Bewket W, Sterk G. Assessment of soil erosion in cultivated fields using a survey methodology for rills in the

- Chemoga watershed, Ethiopia[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2003, 97: 81-93.
- [5] 郑粉莉,边锋,卢嘉,等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(2):90-97.
- [6] Dunkerley D. Effects of rainfall intensity fluctuations on infiltration and runoff; Rainfall simulations on dryland soils, Fowlers Gap, Australia [J]. *Hydrological Processes*, 2012, 26(15): 2211-2224.
- [7] An J, Zheng F L, Han Y. Effects of rainstorm patterns on runoff and sediment yield processes [J]. *Soil Science*, 2014, 179(6): 293-303.
- [8] 温磊磊,郑粉莉,杨青森,等. 雨型对东北黑土区坡耕地土壤侵蚀影响的试验研究[J]. *水利学报*, 2012, 43(9): 1084-1091.
- [9] Mohamadi M A, Kaviani A. Effect of rainfall patterns on runoff and soil erosion in field plots [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2015, 3(4): 273-281.
- [10] 邬铃莉,王云琦,王晨洋,等. 降雨类型对北方土石山区坡面土壤侵蚀的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24):157-164.
- [11] Hatfield J L, Allmaras R R, Rehm G W, et al. Ridge tillage for corn and soybean production: Environmental quality impacts [J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 48: 145-154.
- [12] Liu Q J, An J, Zhang G H, Wu X Y. The effect of row grade and length on soil erosion from concentrated flow in furrows of contouring ridge systems [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 92-100.
- [13] Xu X M, Zheng F L, Wilson G V, et al. Comparison of runoff and soil loss in different tillage systems in the Mollisol region of Northeast China [J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 177: 1-11.
- [14] 闫建梅,何丙辉,田太强. 不同施肥与耕作对紫色土坡耕地土壤侵蚀及氮素流失的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(20):4027-4035.
- [15] 谢云,林小鹏,刘英娜,等. 槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J]. *水土保持通报*, 2008, 28(4):1-6.
- [16] 于兴修,李振伟,刘前进,等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J]. *环境科学*, 2012, 33(8):2644-2651.
- [17] 徐锡蒙,郑粉莉,武敏. 雨强和坡度对黄土陡坡地浅沟形态特征影响的定量研究[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(11):124-132.
- [18] Assouline S, Ben-Hur M. Effects of rainfall intensity and slope gradient on the dynamics of interrill erosion during soil surface sealing [J]. *Catena*, 2006, 66: 211-220.
- [19] Liu Q J, Shi Z H, Yu X X, et al. Influence of micro-topography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure[J]. *Soil and Tillage Research*, 2014, 136:1-8.
- [20] Parsons A J, Stone P M. Effects of intra-storm variations in rainfall intensity on inter-rill runoff and erosion [J]. *Catena*, 2006, 67: 68-78.
- [21] Benik S R, Wilson B N, Biesboer D D, et al. Performance of erosion control products on a highway embankment[J]. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 2003, 46(4): 1113-1119.
- [22] Reichert J M, Norton L D. Rill and interrill erodibility and sediment characteristics of clayey Australian Vertosols and a Ferrosol [J]. *Soil Research*, 2013, 51: 1-9.
- [23] 张科利,唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(1):9-15.
- (上接第 31 页)
- [10] 徐啸. 波、流共同作用下浑水动床整体模型的比尺设计及模型沙选择[J]. *泥沙研究*, 1998(2):17-25.
- [11] 高建恩,杨世伟,吴普特,等. 水力侵蚀调控物理模拟试验相似律的初步确定[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(1):27-31.
- [12] 高建恩,吴普特,牛文全,等. 黄土高原小流域水力侵蚀模拟试验设计与验证[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(10):41-45.
- [13] 李书钦,高建恩,邵辉,等. 选沙对水力侵蚀比尺模拟试验侵蚀过程相似的影响[J]. *水土保持学报*, 2009, 23(3):6-10.
- [14] 李书钦,高建恩,赵春红,等. 坡面水力侵蚀比尺模拟试验设计与验证[J]. *中国水土保持科学*, 2010, 8(1):6-12.
- [15] 张元星. 流域水沙变化对水土保持梯田措施的响应研究[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2014.
- [16] 李慧娟. 延安极端降雨成因分析及非常规比尺模拟试验研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心), 2017.
- [17] 吴新生. 河工模型量测与控制技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.
- [18] 赵春红. 坡面侵蚀性降雨径流水动力学特性及其对输沙的影响[D]. 陕西 杨凌:西北农林科技大学, 2014.