

黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征

龙 琪¹, 韩剑桥^{1,2}, 何育聪¹, 王 飞^{1,2}, 焦 峰^{1,2}

(1.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:为探索细沟侵蚀的空间分异特性,通过人工模拟降雨试验的方法,分析不同降雨强度和坡度下的坡面细沟侵蚀过程,探讨细沟侵蚀强度及形态在坡面尺度的沿程变化特征。结果表明:随着坡度和雨强增加,细沟侵蚀量不断增大;在特定处理下,细沟侵蚀强度沿坡长方向均呈现出先增后减的规律;沟宽、沟深和细沟割裂度等细沟形态参数也表现为先增加后减小,峰值出现在坡面中部。沟宽和沟深与细沟侵蚀量呈极显著的正相关关系,细沟侵蚀强度与形态之间的演变具有一致性;径流汇集导致坡面中部径流侵蚀动力增强,沟壁崩塌和下切侵蚀严重,沟宽和沟深扩大,而坡下位置由于径流含沙量较大且土槽侵蚀基准面稳定而侵蚀较弱。坡面中部易发生严重侵蚀,需要加强防控或做好截排水措施。研究结果可为细沟侵蚀防控提供理论与技术支撑。

关键词: 细沟侵蚀; 细沟形态; 空间分布; 黄土坡面
中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2022)01-0001-07
DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.01.001

Spatial Distribution of Rill Erosion Intensity on Loess Slope and Its Morphology Differentiation Characteristics

LONG Qi¹, HAN Jianqiao^{1,2}, HE Yucong¹, WANG Fei^{1,2}, JIAO Feng^{1,2}

(1.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100)

Abstract: To explore the spatial differentiation characteristics of rill erosion, artificial rainfall experiments were used to analyse stimulate the rill erosion process of slope under different rainfall intensities and slopes, and the variation characteristics of rill erosion intensity and morphology along the slope direction were discussed. The results showed that with the increase of slopes and rainfall intensities, rill erosion was increasing. Under specific treatments, rill erosion intensity increased first and then decreased in space; the rill morphology parameters, such as rill width, rill depth and rill split degree, also increased first and then decreased in space, and the peak values appeared in the middle of the slope. Rill width and rill depth had a very significant positive correlation with the amount of rill erosion, and the evolution of rill erosion intensity and morphology was consistent. The runoff collection led to the increased power of runoff erosion in the middle of the slope, where the ditch wall collapse and undercut erosion were serious, and rill width and rill depth were enlarged. However, the rill erosion under the slope was lower due to the large amount of sediment concentration and the stable base level of soil erosion. Severe erosion tended to occur in the middle of the slope, so it was necessary to strengthen prevention and control measures or take measures to intercept and drain water. The research results could provide theoretical and technical support for the prevention and control of rill erosion.

Keywords: rill erosion; rill morphology; spatial distribution; loess slope

细沟侵蚀是沟蚀的初始阶段,是地表径流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运过程^[1]。细沟侵蚀使细沟形态趋于复杂化,细沟形态反过来作用于坡面径流动力过程,进而反馈于细沟侵蚀。细沟侵蚀不仅会诱发严重水土流失,还会危害农业生产和生态环境。因此,研究细沟侵蚀及其形态演变对黄土坡

面土壤侵蚀防治具有重要意义。

针对细沟侵蚀过程与机理,国内外已开展了大量研究^[2-4],获得了许多极具价值的成果。如 Shen 等^[5]提出了细沟的一系列指标,用于定量评价细沟侵蚀强度和细沟形态;Zhang 等^[6]通过室内模拟降雨试验,强调细沟形态对细沟侵蚀过程的作用。然而,由于观测手段的限制,现有研究中对细沟侵蚀强度的空间分布还有待加强,且侵蚀强度的空间分布不同,导致细沟形态的空间分异,直接关系到细沟侵蚀的防控重点与策略。随着技术的革新,三维激光扫描、数字摄影等技术的出现为这些研究提供了可能,许多学者^[7-8]开始将新型观测设备应用于细沟发育及形态特征研究中。如 Jiang 等^[9]利用数字近景摄影测量技术揭示了细沟侵蚀的发生机制和动态过程,还有学者^[10-11]将高清数字摄影技术应用于细沟侵蚀及其形态的动态监测和细沟水动力学研究中。

目前,对细沟侵蚀强度的空间分布以及相应形态分异特性方面的认识还不够深入,为此,本文通过室内人工模拟降雨试验,模拟不同降雨强度和坡度条件下的坡面细沟发育过程,并采用三维激光扫描仪记录坡面微地形变化,研究坡面细沟侵蚀强度和形态沿坡长的空间分布规律,以期促进对黄土坡面土壤侵蚀机理的认识,并为细沟侵蚀防治提供理论与技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2018 年 9 月 29 日至 11 月 15 日在黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行。模型设备为可调节坡度的变坡土槽,长 10 m,宽 1 m,深 0.6 m,坡度调节范围为 0~25°。降雨由下喷式降雨设备提供,降雨高度 18 m,满足所有雨滴达到终点速度。模型用土取自黄土高原丘陵沟壑区延安市安塞区的黄绵土,土壤容重 1.25 g/cm³。

1.2 试验设计

短历时、高强度暴雨是造成黄土区水土流失的主要降雨特征^[12],根据黄土高原侵蚀性降雨及暴雨频率特征,降雨强度分别设计为 60,90,120 mm/h。由于细沟侵蚀在 10°~25°的裸露坡耕地上表现最明显^[13],因此,坡度设计为 10°,15°,20°,25° 4 个坡度,每组试验重复 1 次,共进行 12 场降雨试验。为获得长历时的数据资料,降雨历时拟设置为 60 min,划分为 0~15,15~30,30~45,45~60 min,共 4 个降雨阶段,每相邻 2 个阶段作为 1 个间歇期,停止降雨 15 min,以满足三维激光扫描仪测量地形的时间要求。

1.3 试验过程

为减小下垫面抗侵蚀能力平面差异对结果的影响,试验统一采用均匀的概化下垫面。所有试验土样

自然风干并过 10 mm 筛,以除去杂草和石块。在装土之前,先在土槽底部填 10 cm 厚天然细沙,并铺上透水纱布,土槽底部采用梅花形打孔来模拟天然土壤透水状况,以保证试验土层的透水性接近天然坡面;填土时,将 50 cm 土层以 5 cm 为 1 层进行分层填土并压实,控制土壤容重在设计范围内,以反映土壤垂直差异与野外相似。

由于人工布置的土槽表面难以达到理论上的平整,造成初始地貌上的跌坎、洼地随机分布,对细沟的走向及发育均有显著影响。本试验考虑沿坡长方向在土槽中央布置 1 条宽 3 cm,深 1 cm 的“V”形凹槽,引导水流汇集形成主细沟,以减少跌坎、洼地发生的随机性,以及初始形态引起的随机误差,提高试验的准确性。

试验前 1 天,对土槽进行 30 mm/h 雨强的前期降雨,降雨历时为坡面出现产流为止,使得各组试验有相同的土壤含水量,并使分散孤立的土壤颗粒湿润固结。降雨后静置 24 h,以减小下垫面的空间变异性。

降雨前先将土槽覆盖塑料布,在其上方均匀布设 6 个雨量筒,反复率定雨强。雨强大小和均匀度均满足要求后开始降雨,降雨均匀度需大于 90%。在降雨中,每 5 min 测量 1 次流速、流深等水动力学指标,采用三维激光扫描仪(莱卡 HDS6100)每 15 min 测量 1 次坡面 DEM。试验全程采用高清数码相机录像。

从降雨开始起,在降雨过程中,每隔 1 min 用标有刻度的塑料白瓶和径流桶采集 1 次泥沙径流样品。试验结束后,将塑料白瓶带回试验室静置 24 h,采用烘干法计算得出含沙量,再根据径流桶和塑料白瓶中水深计算出径流量。降雨开始前后与间歇期均采用三维激光扫描仪(莱卡 HDS 6100)扫描坡面,获得不同时段的数据。

1.4 数据处理

将试验土槽每隔 1 m 视为 1 个单位,共 10 个单位。坡面扫描数据采用 Cyclone 软件进行去噪、拼接、坐标系统等初始处理,得到去除无效点后同一坐标系下的多时相坡面 DEM,然后通过 ArcGIS 得到 DEM 栅格数据,结合细沟面积及土壤容重计算细沟侵蚀量。不同的细沟形态指标对细沟发育过程有不同的影响,本文选取细沟宽度、深度、宽深比和割裂度等细沟形态指标,运用 SPSS 软件定量分析细沟形态与侵蚀之间的关系,以及坡面细沟侵蚀强度的空间分布。

细沟宽深比(R_{WD})是指坡面单位面积细沟宽度与细沟深度之比,能够客观反映细沟沟槽形状的变化,计算公式为:

$$R_{WD}=\frac{\sum_{i=1}^nW_i}{\sum_{i=1}^nD_i}$$

(1)

式中: W_i 为第*i*条细沟的宽度(cm); D_i 为第*i*条细沟的深度(cm); n 为细沟总数量。

细沟割裂度(μ)是指坡面单位面积内所有细沟平面面积之和,能客观反映坡面的破碎程度和细沟侵蚀强度,计算公式为:

$$\mu=\frac{\sum_{i=1}^nS_i}{S}$$

(2)

式中: S_i 为坡面第*i*条细沟的表面积(m^2); S 为坡面面积(m^2)。

2 结果与分析

2.1 不同坡度和降雨强度下坡面产流产沙特征

通过对比不同坡度和降雨强度下坡面产流产沙特征发现,径流量随着降雨强度和坡度的增加而增加(表 1)。同一坡度下,降雨强度由 60 mm/h 增加到 90 mm/h 时,径流量平均增加 103%,雨强由 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,径流量平均增加 85%。同一降雨强度下,坡度由 10°增加到 15°及由 15°增加到 20°时,径流量平均分别增加 14%和 18%,坡度由 20°增加到 25°时,径流量平均增加 7%。

与径流量的规律类似,坡面产沙量随降雨强度和坡度的增加而增加。同一坡度下,雨强由 60 mm/h 增加到 90 mm/h 及由 90 mm/h 增加到 120 mm/h 时,坡面产沙量平均分别增加 169%和 322%。同一降雨强度下,坡度由 10°增加到 15°时,坡面产沙量平均增加 321%,坡度由 15°增加到 20°及由 20°增加到 25°时,坡面产沙量平均分别增加 280%和 264%。

表 1 不同坡度和降雨强度下坡面产流产沙特征			
坡度/ (°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	径流量/ m ³	坡面 产沙量/kg
10	60	0.15	1.47
	90	0.29	3.21
	120	0.63	15.59
15	60	0.20	14.36
	90	0.39	16.86
	120	0.81	137.83
20	60	0.22	18.31
	90	0.51	90.04
	120	0.76	169.71
25	60	0.23	28.87
	90	0.45	71.69
	120	0.74	142.01

2.2 细沟侵蚀强度的空间分布特征

将试验土槽坡面沿坡长方向分为坡面上、中、下 3 个部分,其中,坡面上部为 0~4 m,坡面中部为 4~7 m,坡面下部为 7~10 m。在特定的试验处理下,坡面细沟侵蚀量沿坡长方向总体上表现为先增加后减少的规律,峰值出现在坡面中部,并且随着降雨强度的增加逐渐下移(图 1)。当坡度为 10°时,细沟侵蚀量沿坡长方向表现为先增加后减少,在 120 mm/h 雨强下规律最明显;不同降雨强度处理下细沟侵蚀量最大值分别为 0.05,0.08,0.48 kg,分别出现在坡面中部和下部。当坡度为 15°时,细沟侵蚀量随雨强的增加而递增,沿坡长方向表现为先增后减的规律,最大值位置不断上移,不同雨强处理下峰值分别为 1.74,2.82,6.8 kg,均出现在坡面中部。当坡度为 20°和 25°时,均存在类似规律。

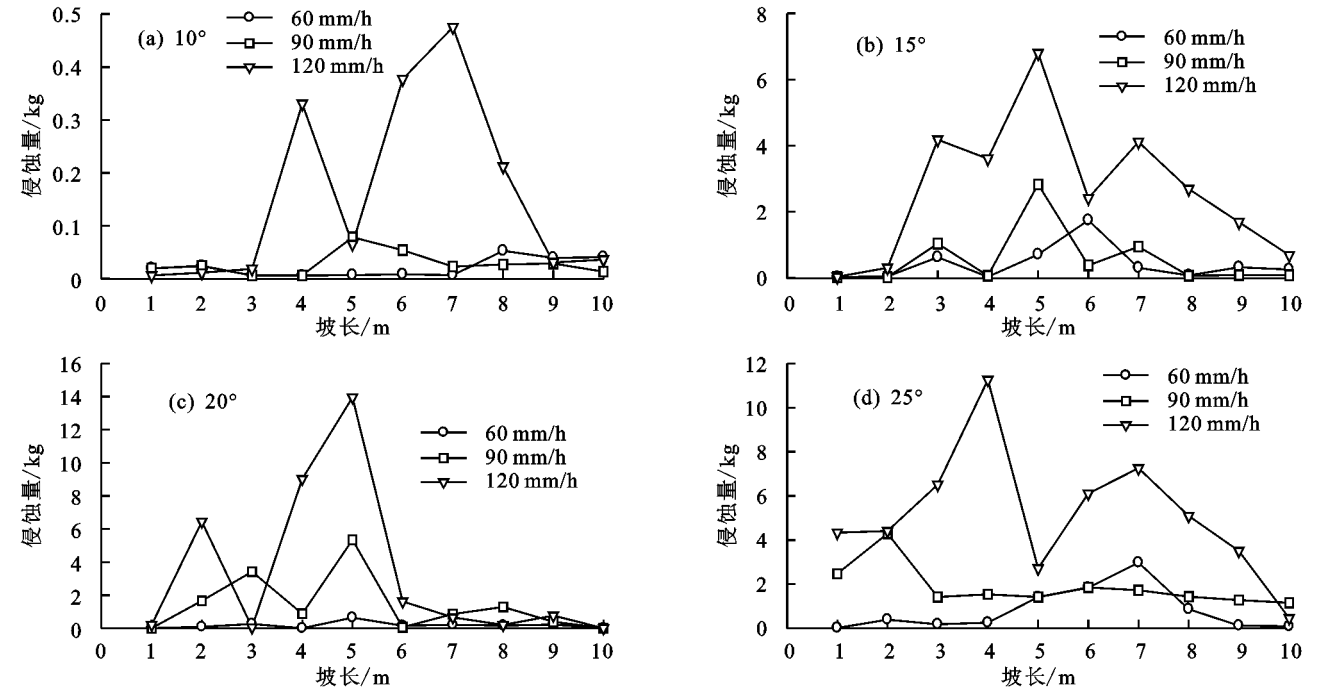


图 1 不同处理下细沟侵蚀量空间分布

2.3 不同坡位的细沟形态差异

2.3.1 细沟宽度的空间分布 细沟宽度沿坡长方向呈先增加后减少的规律,峰值出现在坡面中部(图2)。当坡度为10°和15°时,沟宽在60,90 mm/h雨强下沿坡长方向变化稳定,120 mm/h雨强下沟宽沿坡长方向先增后减,峰值分别为7.45,27.05 cm,均在坡

面中部。当坡度为20°时,沟宽在90,120 mm/h雨强下沿坡长方向变化波动性大,峰值分别为16.14,28.46 cm,分别出现在坡面中部和下部。当坡度为25°时,沟宽随降雨强度的增加呈递增趋势,沿坡长方向呈先增大后减小的规律,峰值分别为7.36,12.41,26.08 cm,并不断向坡面中部移动。

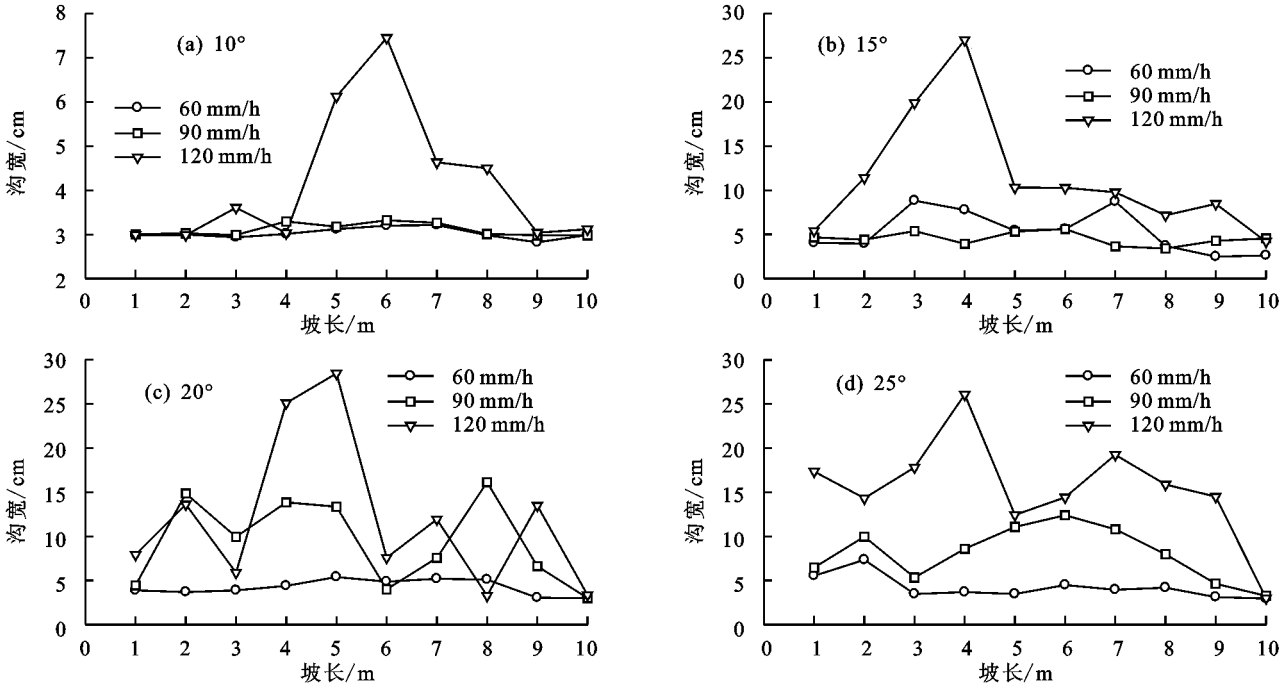


图 2 不同处理下细沟宽度空间分布

2.3.2 细沟深度的空间分布 由图3可知,与沟宽变化相似,细沟深度沿坡长方向也呈先增加后减少的规律,最大值出现在坡面中部位置。

当坡度为10°时,沟深在60,90 mm/h雨强下沿坡长方向呈递增的趋势,降雨强度增加到120 mm/h

时,沟深沿坡长方向表现为先增后减的规律,峰值为9.30 cm,出现在坡面中部。当坡度分别为15°,20°,25°时,沟深沿坡长方向的变化规律类似,呈先增后减的规律,峰值分别为19.93,25.17,25.72 cm,分别出现在坡面中部和上部。

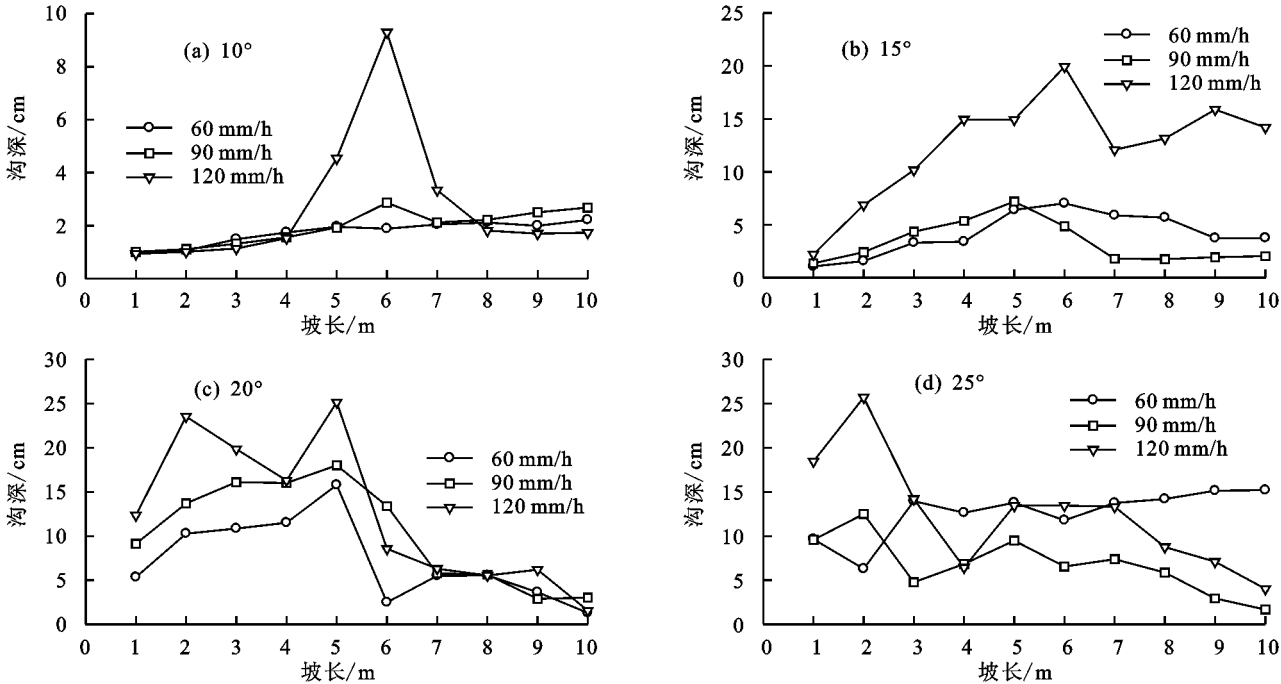


图 3 不同处理下细沟深度空间分布

2.3.3 细沟宽深比与割裂度的分布 不同降雨强度和坡度处理下,细沟宽深比总体上沿坡长方向呈现先减后增的规律(图 4)。当坡度为 10°和 15°,细沟宽深比沿坡长方向表现为先减少后增加的规律,最小值分别为 0.80 和 0.52,均出现在坡面中部,表明细沟在坡面中部发育成熟;当坡度为 20°和 25°时,细沟宽深比

表现为波动上升的变化趋势。

细沟割裂度沿坡长方向呈先增加后减少的规律(图 5)。细沟割裂度在缓坡和中等降雨强度处理下变化稳定,当坡度和降雨强度变大时,细沟割裂度波动性较大,无明显规律,最大值多出现在斜坡 4~6 m 处,表明坡面中部细沟侵蚀强烈,细沟发育破碎。

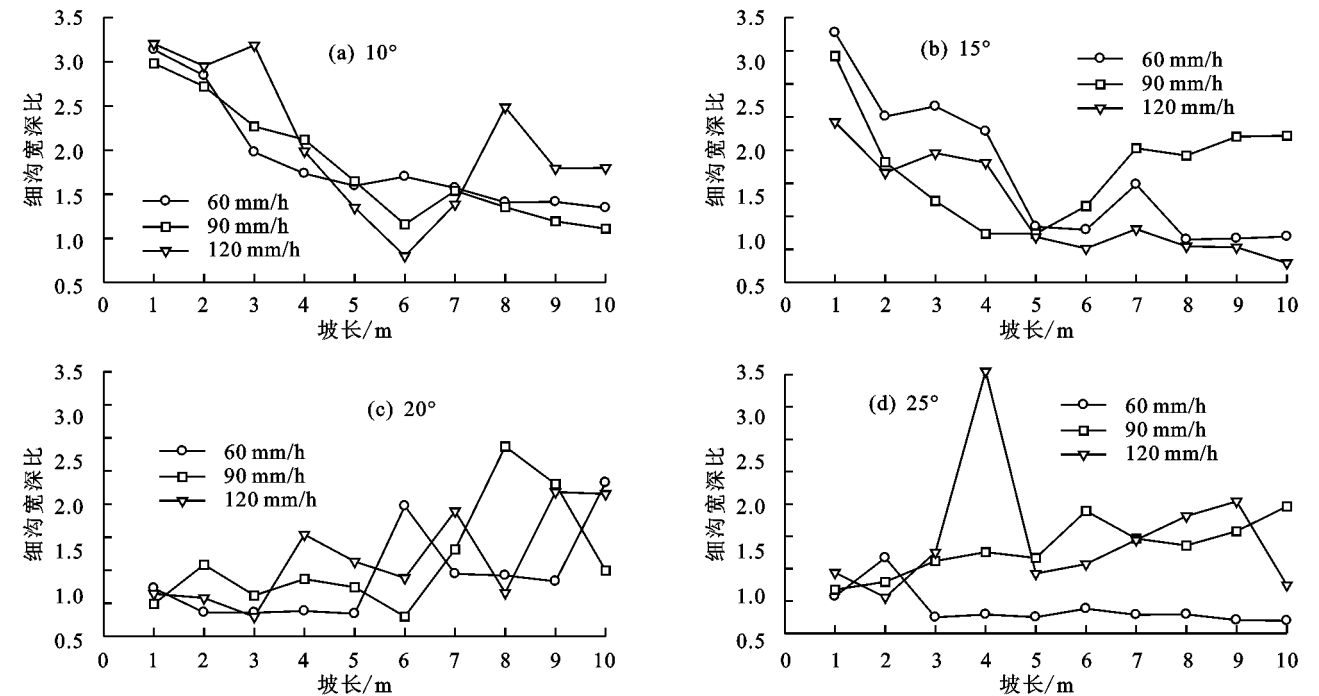


图 4 不同处理下细沟宽深比空间分布

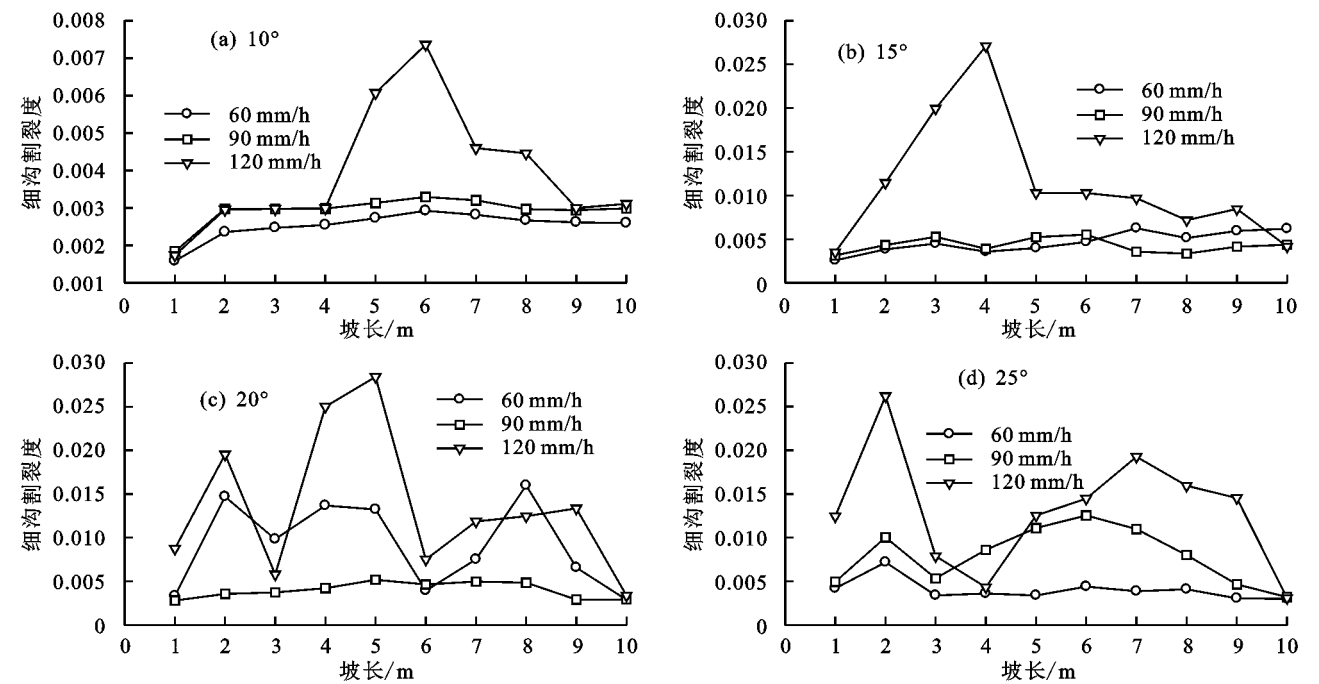


图 5 不同处理下细沟割裂度空间分布

2.4 细沟侵蚀与形态的关系

为定量研究坡面细沟侵蚀和形态之间的关系,对细沟侵蚀和形态参数进行相关性分析,统计数据包括细沟宽度、深度、宽深比、割裂度和细沟侵蚀量等(表 2 和表 3)。细沟侵蚀量与细沟宽度、深度和割裂度

均呈极显著的正相关关系($P<0.01$),与细沟侵蚀量相关性水平由高到低的顺序为细沟宽度>细沟割裂度>细沟深度,相关系数分别为 0.815,0.695,0.578,与细沟宽深比无显著相关关系。

相关性可以用来判断预测值与实测值是否接近, R^2

越接近 1,方程相关性越好^[14],根据皮尔逊相关分析的结果,细沟侵蚀量在坡面 1~10 m 与细沟宽度和深度呈现极显著的相关关系,因此为了量化沟宽和沟深对细沟侵蚀量的影响,对统计结果进行多元回归分析。

表 2 坡面细沟形态特征指标

坡度/ (°)	降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	最大 沟宽/cm	平均 沟宽/cm	最大 沟深/cm	平均 沟深/cm	细沟 宽深比	细沟 割裂度
10	60	3.2	3.0	2.2	1.7	1.92	0.003
	90	3.3	3.1	2.8	1.9	1.63	0.029
	120	7.5	4.1	9.3	2.7	1.49	0.039
15	60	8.8	5.3	7.0	4.2	1.45	0.047
	90	5.6	4.5	7.2	3.3	1.26	0.043
	120	27.1	11.4	19.9	12.4	0.99	0.112
20	60	5.4	4.2	15.8	7.2	1.31	0.092
	90	16.1	9.4	18.0	10.4	0.70	0.040
	120	28.5	13.0	25.2	12.6	1.42	0.136
25	60	7.4	4.2	15.2	6.8	0.33	0.040
	90	12.4	8.1	12.5	12.6	1.21	0.079
	120	26.1	15.5	25.7	12.5	1.09	0.131

表 3 细沟侵蚀量和细沟形态参数的相关分析

项目	细沟宽度	细沟深度	细沟宽深比	细沟割裂度	细沟侵蚀量
细沟宽度	1.000				
细沟深度	0.533**	1.000			
细沟宽深比	0.074	-0.641**	1.000		
细沟割裂度	0.885**	0.607**	-0.095	1.000	
细沟侵蚀量	0.815**	0.578**	-0.053	0.695**	1.000

注: ** 表示极显著相关($P<0.01$)。

3 讨论

3.1 坡面细沟侵蚀强度的空间变化

本研究表明,细沟侵蚀量总体上随雨强和坡度的增大而增加,与 Shen 等^[15]和沈海鸥等^[16]的研究结果一致。当坡度一定时,细沟侵蚀量随降雨强度的增加呈递增的趋势,降雨强度的增大,意味着径流量的增加,雨滴打击和径流冲刷力增强,侵蚀量增加^[16]。降雨强度一定时,细沟侵蚀量随坡度的增大而增加,是因为坡度变大,径流汇集能力变大,对地面的冲刷作用增强,侵蚀量增加,这与前人^[17]的研究结果一致。

在空间上,细沟侵蚀量沿坡长方向呈先增后减的规律,峰值集中出现在坡面中部(图 1)。由于坡面上部承雨面积小,雨滴对细沟的侵蚀作用小;坡面中部集雨面积变大,径流汇集和流速增加,沟壁崩塌,沟床下切,细沟侵蚀量达到最大;而坡面下部径流量和流速降低,径流能量一部分用于搬运泥沙,侵蚀力减弱,细沟侵蚀量减少^[18]。本研究中,细沟侵蚀量峰值集中出现在坡面中部,是因为坡面中部的集雨面积增大,细沟流速增加,上方汇水进入土槽,径流冲刷携带的泥沙输移至斜坡中部,径流在坡面中部不断作用于细沟两侧,已形成的细沟不断进行下切侵蚀,从而使细沟侵蚀量在坡面中部达到最大值,之后在坡面下部细沟侵蚀速率降低,侵蚀量减小,这与前人^[9,19]研究结论一致。

$$E=30.096W+7.953D-1.433 \tag{3}$$

式中: E 为细沟侵蚀量(kg); W 为细沟宽度(cm); D 为细沟深度(cm)。公式(3)的决定系数(R^2)为 0.69, F 检验显著性 <0.05 ,具有统计学意义。

3.2 坡面细沟侵蚀与形态的关系

细沟发育过程中,坡面细沟形态变化与细沟侵蚀之间存在着相互影响相互作用的关系,且与坡面径流含沙量的变化情况基本一致^[11]。本试验条件下,细沟平均宽度和平均深度均随降雨强度和坡度的增大而增大(表 2),坡面中部是细沟侵蚀最严重的地方,且最大沟宽和最大沟深均出现在坡面中部。细沟侵蚀过程主要包括溯源侵蚀、沟底下切和沟壁崩塌,由于坡面上部汇水面积和承雨量较小,径流量少,溯源侵蚀起主导作用^[20],沟宽和沟深较小。随着降雨强度的增大,溯源侵蚀减弱,径流汇集导致其冲刷力增强,降低了细沟沟壁的稳定性,沟壁坍塌严重导致细沟宽度扩大,水流侵蚀力的增强和坡度的增大加剧了沟底的下切侵蚀^[21],再加上细沟发育的随机性,细沟深度增加,此时细沟发育主要以下切侵蚀和沟壁坍塌为主^[22-23],坡面产沙量和水流含沙量迅速增大,导致细沟侵蚀量在坡面中部达到最大,同时扩大了沟深和沟宽^[24]。随着细沟流速趋于稳定^[14],坡面下部的径流含沙量较大且侵蚀基准面稳定,沟底下切,沟壁坍塌作用减弱,沟宽和沟深逐渐减小并趋于稳定。

细沟宽度沿坡长方向呈先增加后减少的规律,与自然状态下细沟发育过程有所差异,分析原因可能是受试验土槽底部挡板的影响,细沟在坡面下部发育缓

慢,泥沙堆积在土槽底部,细沟侵蚀较弱,随着水流剥蚀率的降低,沿程冲刷作用减弱,导致沟宽减少。细沟形态在演变过程中,沟宽和沟深与细沟侵蚀量呈极显著相关关系(表 3),且与细沟侵蚀量的拟合结果趋于一致,表明细沟侵蚀强度与形态演变之间具有同步性,这与前人^[25-26]研究结论一致。由于坡面中部细沟侵蚀严重,可通过设置截排水沟拦蓄径流,减轻细沟侵蚀。已有研究^[2,6,9]多关注细沟发育和形态演变过程,对细沟侵蚀强度的空间分布鲜有研究,本文通过室内人工模拟降雨试验探究了细沟侵蚀强度和形态在坡面尺度的空间分布及特征,揭示出细沟侵蚀强度与形态演变之间的一致性及其相互作用,可为细沟侵蚀防治提供理论与技术支持。

4 结论

(1)在空间上,坡面细沟侵蚀量呈现先增后减的规律,细沟宽深比呈先减小后增大的规律,沟宽和沟深表现为先增大后减小的规律,峰值均出现在坡面中部。

(2)细沟侵蚀量最大值集中出现在坡面中部,是因为在坡面中部水流汇集,流速增加,径流侵蚀力增强,沟壁崩塌和下切侵蚀强烈,侵蚀量增加。

(3)细沟割裂度、细沟宽度和细沟深度与细沟侵蚀量呈极显著的正相关关系,细沟侵蚀量与细沟形态参数之间的拟合结果趋于一致,表明细沟侵蚀与细沟形态关系密切。

参考文献:

[1] 郑粉莉,高学田.坡面土壤侵蚀过程研究进展[J].地理科学,2003,23(2):230-235.

[2] Qin C, Zheng F L, Wilson G V, et al. Apportioning contributions of individual rill erosion processes and their interactions on loessial hillslopes [J].Catena,2019,181:e104099.

[3] He J J, Sun L Y, Gong H L, et al. Laboratory studies on the influence of rainfall pattern on rill erosion and its runoff and sediment characteristics [J].Land Degradation and Development,2017,28(5):1615-1625.

[4] 牛耀彬,吴旭,高照良,等.工程堆积体坡面细沟侵蚀形态空间变化[J].水土保持研究,2021,28(6):1-7.

[5] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology [J].Geomorphology,2015,231:193-201.

[6] Zhang P, Yao W Y, Liu G B, et al. Experimental study on soil erosion prediction model of loess slope based on rill morphology [J].Catena,2019,173:424-432.

[7] 郭慧莉,孙立全,吴淑芳,等.黄土高原地区鱼鳞坑坡面侵蚀演化过程及水力学特征[J].土壤学报,2017,54(5):1125-1135.

[8] 权鑫,史红伟,蔡强国,等.室内模拟降雨情形下黄土坡面沉降程度的试验研究[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2021,49(2):98-106.

[9] Jiang Y M, Shi H J, Wen Z M, et al. The dynamic

process of slope rill erosion analyzed with a digital close range photogrammetry observation system under laboratory conditions [J].Geomorphology,2020,350:e106893.

[10] Ran H, Deng Q C, Zhang B, et al. Morphology and influencing factors of rills in the steep slope in Yuanmou Dry-Hot Valley (SW China) [J].Catena,2018,165:54-62.

[11] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11):110-117.

[12] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J].农业机械学报,2014,45(2):169-175.

[13] 吴淑芳,刘勃洋,雷琪,等.基于三维重建技术的坡面细沟侵蚀演变过程研究[J].农业工程学报,2019,35(9):114-120.

[14] 霍云梅,毕华兴,朱永杰,等.模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J].水土保持学报,2015,29(4):23-26.

[15] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. Impacts of rainfall intensity and slope gradient on rill erosion processes at loessial hillslope [J].Soil and Tillage Research,2016,155:429-436.

[16] 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.

[17] 陈俊杰,孙莉英,刘俊体,等.不同坡长与雨强条件下坡度对细沟侵蚀的影响[J].水土保持通报,2013,33(2):1-5.

[18] 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等.黄土坡面细沟侵蚀形态试验[J].生态学报,2014,34(19):5514-5521.

[19] 覃超,吴红艳,郑粉莉,等.黄土坡面细沟侵蚀及水力学参数的时空变化特征[J].农业机械学报,2016,47(8):146-154.

[20] 盛贺伟,孙莉英,蔡强国.黄土坡面细沟发育形态对侵蚀特征的影响[J].应用基础与工程科学学报,2017,25(4):679-688.

[21] 张敏,和继军,蔡强国.细沟侵蚀过程与径流速度的响应[J].陕西师范大学学报(自然科学版),2017,45(5):85-91.

[22] 刘森,杨明义,张风宝.黄土坡面细沟发育及细沟与细沟间侵蚀比率研究[J].水土保持学报,2015,29(1):12-16.

[23] 孙玉柱,郑粉莉,张姣.基于 LIDAR 和 GIS 技术的坡面侵蚀沟空间发育分析[J].水土保持研究,2014,21(3):20-24.

[24] 韩剑桥,高建恩,李兴华,等.降雨和径流综合作用下的细沟断面形态分异特征[J].水电能源科学,2019,37(2):115-118.

[25] 倪世民,冯舒悦,王军光,等.不同质地重塑土坡面细沟侵蚀形态与水力特性及产沙的关系[J].农业工程学报,2018,34(15):149-156.

[26] 张攀,姚文艺,唐洪武,等.黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响[J].农业工程学报,2018,34(5):114-119.