

黄土坡面细沟侵蚀形态特征及横断面分异性研究

刘庆¹, 沈东辉², 和继军¹, 刘壮壮¹, 孙莉英³, 蔡强国³

(1.首都师范大学城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地水资源安全北京实验室,北京 100048;
2.水利部科技推广中心,北京 100032; 3.中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101)

摘要: [目的] 为探究细沟侵蚀及其形态特征的变化规律和横断面分布特征。[方法] 通过室内人工模拟降雨试验和三维激光扫描技术,分析不同降雨强度和坡度条件下细沟侵蚀产流产沙和细沟形态分布特征。[结果] 1)降雨强度增大时,坡面产流产沙增幅显著,90 mm/h降雨强度时,细沟侵蚀量对总侵蚀量的贡献率达90%以上。2)细沟宽度、深度和细沟割裂度受降雨强度的影响明显,且均呈不同程度的增加,细沟割裂度、细沟最大深度与细沟侵蚀量呈极显著正相关。3)细沟横断面沿坡向变化较大,沟壁崩塌现象明显,60 mm/h降雨强度时细沟横断面多呈“窄浅”型分布,90 mm/h降雨强度时,细沟总体表现为沟头和细沟下部横断面呈“窄浅”型,在细沟中部表现为“宽深”型,细沟中部侵蚀较为严重。4)60 mm/h降雨强度时,细沟横断面指标总体为0.46~0.79,90 mm/h降雨强度时总体为0.41~0.85,90 mm/h降雨强度时,随着坡度的增加,细沟横断面指标波动性增强,表明细沟横断面空间分异性更加明显,细沟横断面形态的变化趋于不规则。[结论] 研究结果为细沟侵蚀防治提供一定理论支持。

关键词: 细沟侵蚀; 降雨强度; 细沟形态参数; 细沟横断面

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0001-11

Study on the Morphological Characteristics and Cross-sectional Heterogeneity of Rill Erosion on Loess Slope

LIU Qing¹, SHEN Donghui², HE Jijun¹, LIU Zhuangzhuang¹, SUN Liying³, CAI Qiangguo³

(1.State Key Laboratory of Urban Environmental Processes and Numerical Simulation, Beijing Laboratory of Water Resources Security, Capital Normal University, Beijing 100048, China; 2.Science and Technology Promotion Center of Ministry of Water Resource, Beijing 100032, China; 3.Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: [Objective] To explore the variation patterns and cross-sectional distribution characteristics of rill erosion and its morphological features. [Methods] Indoor artificially simulated rainfall experiments and 3D laser scanning were conducted to analyze the distribution of runoff, sediment yield and rill morphological characteristics of rill erosion under different rainfall and slope conditions. [Results] 1) When the rainfall intensity increased, the runoff and sediment yield increased significantly. When the rainfall intensity was 90 mm/h, the contribution rate of rill erosion to total erosion could reach more than 90%. 2) Rill width, depth, width-to-depth ratio and rill splitting degree were significantly affected by rainfall intensity, and all showed varying degrees of increase. Rill splitting degree and the maximum depth of rill showed a significant positive correlation with the amount of rill erosion. 3) Rill cross section varied greatly along the slope direction, the collapse of the gully wall was obvious. When the rainfall intensity was 60 mm/h, the rill cross section was mostly distributed in a "narrow and shallow" shape, When the rainfall intensity was 90 mm/h, the head and bottom of the rill were "narrow and shallow", the middle of the rill was "wide and deep" in general. The rill erosion in the middle

收稿日期: 2024-08-11

修回日期: 2024-11-19

录用日期: 2024-11-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-00-00

资助项目: 国家自然科学基金项目(52179071, 41977069)

第一作者: 刘庆(1995—),男,硕士,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 2200902206@cnu.edu.cn

通信作者: 和继军(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事土壤侵蚀与水土保持及区域水文学研究。E-mail: hejijun_200018@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

was more severe. 4) When the rainfall intensity was 60 mm/h and 90 mm/h, the overall value range of rill cross-sectional index were 0.46~0.79 and 0.41~0.85, respectively. When the rainfall intensity was 60 mm/h, the volatility of rill cross-sectional index increased with the increase of slope gradient, indicating that spatial differentiation of rill cross section was more obvious, and variation of the rill cross section tended to be irregular. [Conclusion] The research results can provide some theoretical support for rill erosion prevention and control.

Keywords: rill erosion; rainfall intensity; rill morphological parameters; rill cross section

Received: 2024-08-11

Revised: 2024-11-19

Accepted: 2024-11-26

Online(www.cnki.net): 2024-00-00

细沟侵蚀是指坡面上形成细小沟道情况下,径流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运的过程^[1],细沟侵蚀极其复杂,对坡面地貌发育及演化过程具有重要影响^[2]。细沟侵蚀及形态参数受多种因素的影响,其中降雨强度和坡度起主导作用^[3]。坡面细沟一旦产生,坡面侵蚀增强,其中细沟的分叉、合并和连接能够促进细沟侵蚀发育,塑造复杂的细沟形态^[4];而细沟形态特征对细沟发育又有一定的影响,反过来作用于细沟侵蚀过程^[5-6]。国内外学者对细沟侵蚀形态特征做了大量的研究,WANG等^[7]利用侵蚀形态和沉积物连通性来表征紫色土坡面细沟侵蚀过程;ZHANG等^[8]研究表明,细沟形态参数演化具有显著的非线性变化特征;张攀等^[9]研究发现,不同降雨条件下坡面产沙变化规律基本相同,细沟形态稳定后的产沙量与降雨强度呈正相关;沈海鸥等^[10]通过研究降雨强度和坡度对黄土坡面细沟侵蚀和细沟形态特征的综合影响发现,细沟横断面变化可以用来表征坡面径流的变化;龙琪等^[11]通过室内人工模拟降雨试验发现,随着坡度和降雨强度的增加,细沟侵蚀强度与形态之间的演变具有一致性;CAROLLO等^[12]通过对试验坡面黏土层和壤土层发育的4条细沟进行观测发现,路径迂曲度(t)是反映深泓线偏离直线的细沟形态指标。基于此,对于细沟形态参数的提取有进一步的研究空间。

随着观测技术的提升,三维激光扫描技术和近景摄影测量技术作为非接触测量手段已逐渐应用到细沟侵蚀观测当中^[13-14],赵新凯等^[15]利用三维激光扫描技术和人工模拟降雨的方法观测了黑垆土坡面细沟的发育过程;覃超等^[16]通过近景摄影测量技术,对细沟和沟道水流参数进行准确测量,为深化坡面土壤侵蚀过程研究提供了重要的技术支持。

从前人的研究中发现,对细沟侵蚀形态参数的分析多以非接触测量手段获取诸如细沟长宽、深度、面积等指标,而鲜有利用该手段对细沟横断面进行提取分析,而对细沟横断面的研究多以地形测针仪法进行^[17-18],然而测针对坡面容易造成扰动使得测量精度

较低,并且测针数量有限并不能准确反映细沟沟壑信息,而细沟形态特征在不同试验条件下具有随机性和差异性,因此,通过测针测量具有很大的局限性,非接触测量手段由于不接触坡面而且精度较高为以上问题提供一种解决思路。基于此,本研究通过三维激光扫描技术,扫描降雨前后坡面地形数据,并根据试验结果,深入研究细沟侵蚀形态特征在不同降雨条件下的空间分异规律,以期深化在该条件下细沟侵蚀机理,并为细沟侵蚀防治及预报提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用土壤取自黄土高原绥德水土保持试验站,绥德站位于陕西省榆林市绥德县(110°04'~110°41'E, 37°16'~37°45'N)境内。该县属于温带大陆性半干旱气候,海拔608~1287 m,年平均气温9.7℃,年平均降水量486 mm。绥德县具有黄土高原丘陵沟壑区最典型的地形地貌,地表破碎度较高,是黄河泥沙重要的物源区域,多年来水土流失非常严重,严重影响到黄河中下游生态安全,因此,具有极高的研究价值。综上,为消除人为活动痕迹,研究从试验站周边未开垦土坡采集0~30 cm以内的土样,利用马尔文激光粒度仪测定土壤颗粒组成:黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)和砂粒(≥0.05 mm)分别为7.72%、48.96%和43.32%。按照国际土壤质地分类,该区土壤属于砂壤土。

1.2 试验设计

试验于2018年5月在中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工降雨大厅进行,采用下喷式降雨系统,降雨喷头高度设为18 m,降雨覆盖面积为27 m×18 m。试验土槽选用10 m×1.5 m×0.5 m固定式坡度可调钢制土槽,土槽正下方设置集流装置,用来收集径流泥沙样品,平均土壤体积质量为1.25~1.35 g/cm³。根据野外实测数据资料,试验选取2种降雨强度(60、90 mm/h),设置降雨历时为1 h,已经达到天然暴雨的强度^[19]。前人^[20]研究发现,细沟侵蚀在黄土高原坡耕地10°~20°最为明显,斜坡与陡坡占比较小,10°以内的坡面约占

50%以上,因此,本试验坡度选取为5°、7.5°、10°、15°、20°。试验实际采集到的数据为60 mm/h降雨强度时以上5个坡度的数据,90 mm/h降雨强度时5°、7.5°、10°和15°的数据,尽管对照数据不够齐全,但试验结果同样具有实际的参考意义。试验发现,60 mm/h降雨强度时10°及以上坡度出现细沟,其他坡度主要为片状面蚀,没有细沟产生,故不在研究范围内。

试验前将土样在室外条件下自然风干,随后通过10 mm网筛去除杂草和碎石块,为保持钢制土槽透水性,与野外坡面相似,在试验槽底部放置10 cm细沙,在细沙上铺盖1层纱布防止与上层土壤相互干扰。试验土壤采用分层法装填,每层厚度5 cm,共填6层,边填充边压实,坡面总填土厚度约30 cm。待土样装填完成后,利用环刀抽取部分土壤以测定表层土壤体积质量用于检测是否满足试验要求。在降雨试验前对坡面进行三维激光扫描并采集坡面数据,随后进行率定试验,使上方降雨系统满足既定降雨强度,降雨均匀度达到85%以上。在降雨过程中待坡面产流开始稳定时,用容量为1 000 mL的小样瓶从钢槽出水口采集径流泥沙样,采样时间间隔为1 min/次,小样瓶收集满后,利用大量桶收集每分钟采集剩余的径流样并测量体积,样瓶采集的径流样加上大量桶的径流样为每分钟的总径流量。将样瓶放入特制铁盒中静置后,去除上层清液,放入烘干箱中烘干称重以测定含沙量。待坡面产流稳定后,利用染色剂测量水流流速,即通过秒表记录水流程经设定长度(50 cm)的时间来计算径流流速,其中径流平均流速为测定的流速乘以修正系数获得,坡面流沿用室内试验修正系数0.67,细沟流取修正系数0.7^[21-22]。降雨后扫描坡面点云数据,获得不同降雨及坡度条件下的细沟数据。

1.3 数据处理与参数设定

本试验采用由德国生产的Pentax三维激光扫描仪,通过获取降雨前后坡面各点空间位置信息,把采集好的坡面点云数据导入Z+F Laser Control V8.5.0软件中,进行点云数据的滤波、除噪、坐标系设置和拼接处理,拼接完成后的点云数据以PTX格式导入Scene软件中进行裁剪,得到坡面数据后以“txt”格式导入到Arcgis 10.4软件中生成DEM数据,数据精度设为2 mm×2 mm进行渔网分析并提取细沟宽度、细沟深度等指标,逐步计算细沟侵蚀量(细沟总体积乘以对应的土壤体积质量)和总侵蚀量(利用Arcgis10.4软件中的填挖方模块计算),通过SPSS 25软件分析坡面细沟侵蚀量与各形态参数之间的相关关系,以及提取不同降雨条件下细沟横断面指标。试验结果发现,每场降雨后细沟呈片状分布,形状大致呈扇形,细沟密

度、细沟复杂度和细沟长度等指标已不再适用此条件。因此,本研究选取一下指标作为参考。

1)细沟宽深比:为细沟宽度与对应深度的比值,能客观反映细沟沟槽形状的变化,该参数为一无量纲参数^[23]。本研究取研究区所有宽深比的平均值。

$$R_{WD} = \frac{\sum_{i=1}^n W_i}{\sum_{i=1}^n D_i} \quad (1)$$

式中: R_{WD} 为细沟宽深比; W_i 为第*i*个监测点的细沟的宽度,cm; D_i 为第*i*个监测点的细沟平均深度,cm。

2)细沟割裂度:指研究区内所有细沟平面面积与对应坡面面积之比,该参数为一无量纲参数;细沟割裂度能客观反映细沟侵蚀强度和坡面破碎程度^[23],其计算公式为

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n S_i}{S_0} \quad (2)$$

式中: μ 为细沟割裂度; S_i 为坡面第*i*条细沟面积,cm²; S_0 为坡面面积,cm²。

3)细沟横截面积:为细沟横断面面积,细沟横截面积能反映该位置细沟侵蚀强度的大小,其计算公式为

$$A = \sum_{i=1}^n y_i \Delta x \quad (3)$$

式中: A 为细沟横截面积,cm²; y_i 为对应测点细沟深度,cm; Δx 为测点横向移动间距,cm。

4)细沟横断面指标:为细沟横断面面积与细沟横断面等宽同深的矩形面积的比值,细沟横断面指标的大小介于0~1,能够反映细沟横断面的形状,当细沟横断面形状近似为“倒三角形”时,其值接近0.5;当细沟横断面形状近似为“矩形”时,其值接近1^[24]。计算公式为:

$$\eta = \frac{A}{S} = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \Delta x}{dh} \quad (4)$$

式中: η 为细沟横断面指标; A 为细沟横断面面积,cm²; S 为与细沟横断面同等宽深的矩形面积,cm²。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度和坡度条件下坡面产流产沙特征

坡面初始产流产沙时间随降雨强度的增大相对提前50%(图1),2种降雨强度下坡面产流量在初期迅速增加,后随产流历时的增加呈缓慢增加最后局部稳定的变化趋势,在产流初期降雨打击坡面产生大量分散颗粒,产流后径流在向下迁移过程中携带细小颗粒从中填充土壤孔隙,地表结皮不稳定发育,地表径流在初期迅速增加,随着降雨历时的增加,地表结皮发育稳定,地表入渗能力下降,产流量缓慢增加并趋于稳定。

坡面产沙情况总体规律类似,含沙量初期先缓慢减小到最小值,后大幅增加并在 90 mm/h 降雨强度时逐渐趋于稳定(图 1),在 60 mm/h 降雨强度时还未达到稳定状态。由于初期坡面表层留有大量浮土,泥沙含量较大,之后细沟的形成及发育加剧坡面侵蚀过程,因此,产沙量迅速增加,当降雨和坡度一定时,由于输沙能力的限制,产沙量最终趋于稳定^[2]。

细沟平均流速均大于对应的坡面平均流速(表 1),为 1.5~2.0 倍。综合来看,与 60 mm/h 降雨强

度不同,90 mm/h 降雨强度时随着坡度的增加细沟流速未能呈逐渐增大趋势(表 1)。降雨强度增大时坡面径流总量均大幅增加,90 mm/h 降雨强度时总径流量随坡度的增加呈减小趋势。对于总产沙量,60 mm/h 降雨强度时坡面总产沙量对应 15° 和 20° 分别减小 9% 和增大 256%,90 mm/h 降雨强度时对应 7.5°、10° 和 15° 分别增大 229%、减小 11% 和增大 77%。降雨强度增大时总产沙量呈倍数增长,在 10° 和 15° 时对应坡面总产沙量分别增加 23,46 倍。

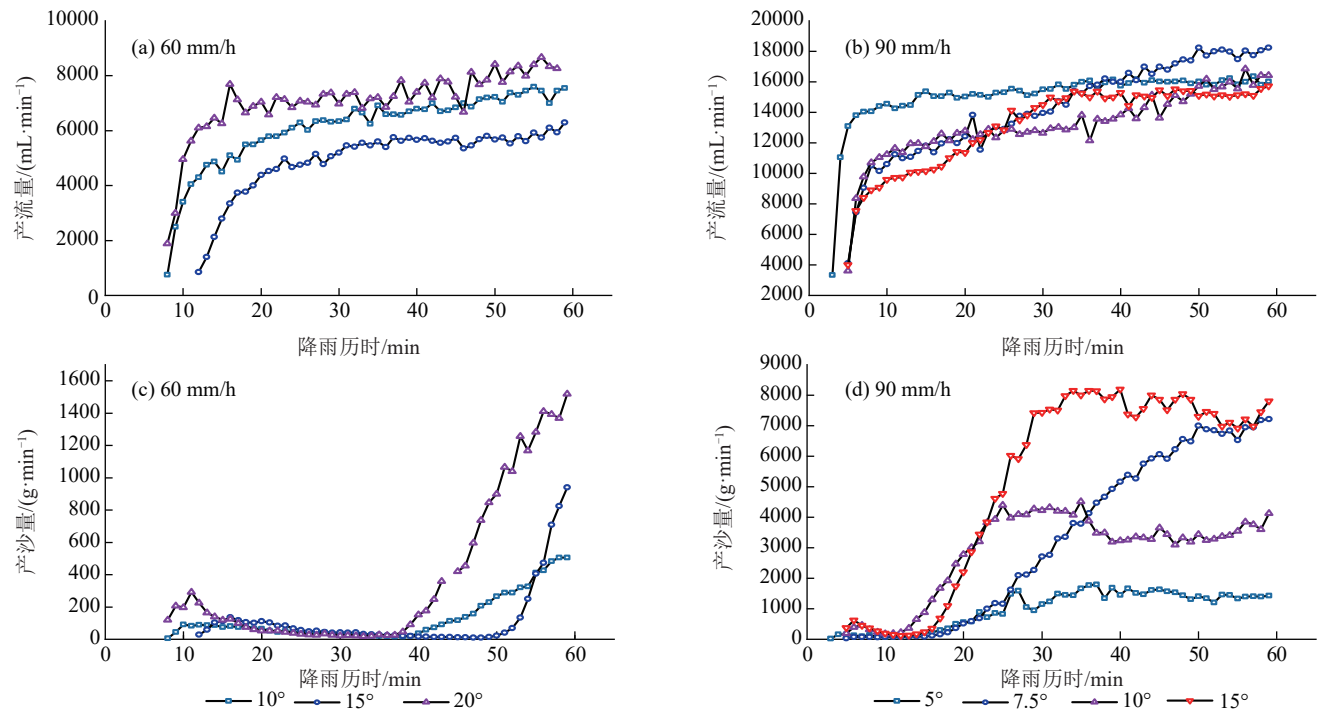


图 1 不同降雨条件下坡面产流产沙过程

Fig. 1 Process of runoff and sediment production under different rainfall conditions

表 1 不同降雨条件下坡面水沙特征统计

Table 1 Statistical analysis of runoff and sediment characteristics on slope under different rainfall conditions

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	坡面平均流速/ (m·s ⁻¹)	细沟平均流速/ (m·s ⁻¹)	总径流量/L	总产沙量/g
60	10	0.13	0.21	319.202	6 585.9
	15	0.14	0.34	241.015	6 021.2
	20	0.17	0.38	361.389	21 428.7
90	5	0.20	0.48	862.385	54 952.3
	7.5	0.25	0.55	786.466	180 677.8
	10	0.22	0.36	769.764	160 284.2
	15	0.19	0.53	724.376	283 270.3

2.2 细沟侵蚀量与总侵蚀量的变化规律

细沟侵蚀量与坡面总侵蚀量随降雨强度和坡度的增加均呈不同程度增加(图 2),60 mm/h 降雨强度时,对应 15° 和 20°,细沟侵蚀量分别减小 12% 和增大 250%,细沟侵蚀量与总侵蚀量占比分别为 74%、82% 和 76%,90 mm/h 降雨强度时,对应 7.5°、10° 和 15° 分别增大 291%、减小 9% 和增大 71%,占比分别

为 76%、94%、95% 和 92%。60 mm/h 降雨强度时,细沟侵蚀量占坡面总侵蚀量的 70%~90%,90 mm/h 降雨强度时,除 5° 条件外,随坡度的增加,细沟侵蚀量占总侵蚀量的 90% 以上,因此,降雨强度增大时,细沟侵蚀逐渐成为坡面最主要的侵蚀方式。

2.3 细沟形态特征参数变化规律

60 mm/h 降雨强度时,随着坡度的增加,细沟平均

宽度、最大宽度和最大深度均呈不同程度增加,其中细沟平均宽度的增加率分别为 51% 和 31%,细沟最大宽度的增加率分别为 5% 和 65%,最大深度增加率分别为 20% 和 9%;90 mm/h 降雨强度时,只有细沟最大深度逐渐增加,增加率分别为 161%、25% 和 25%(表 2)。

降雨强度增大时,在 10° 和 15° 条件下,细沟平均宽度和细沟最大宽度增加率分别为 275%、190% 和 249%、272%,细沟平均深度和最大深度增加率分别为 15%、106% 和 139%、151%。因此,当降雨强度增大时,细沟侵蚀剧烈,细沟宽深指标增加明显。

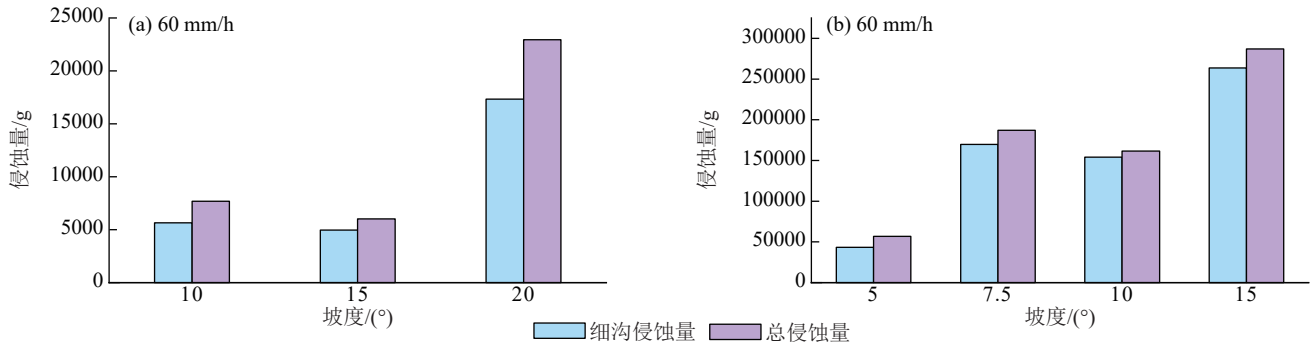


图 2 不同降雨条件下细沟侵蚀量与总侵蚀量特征

Fig. 2 Characteristics of rill erosion and total erosion under different rainfall conditions

60 mm/h 降雨强度时,细沟宽深比较小,对应 15° 和 20°,分别增加 73% 和减小 9%,说明该条件下细沟横断面形状总体接近于“V”形,由于细沟平均深度较浅,因此,横断面特征为“窄而浅”(表 2)。90 mm/h 降雨强度时,对应 7.5°、10° 和 15° 细沟宽深比分别减小 50%、28% 和 25%,宽深比较大且呈逐渐减小的趋势,说明细沟横断面总体形状更接近于“U”形并且逐渐向“V”形演变,随着坡度的增大细沟横断面特征总体呈“宽而深”发展,在细沟溯源侵蚀和沟壁崩塌侵蚀均增强的同时,细沟下切侵蚀增强的幅度更加明

显,因此,宽深比逐渐减小。降雨强度增大时细沟割裂度大幅增加,60 mm/h 降雨强度时细沟割裂度随坡度的增加分别为减小 8% 和增大 113%,90 mm/h 降雨强度时分别增大 44%、减小 15% 和增大 93%。

为验证细沟侵蚀量与细沟形态特征参数之间的关系,本试验选取细沟宽度、细沟深度、细沟宽深比、细沟割裂度和细沟侵蚀量进行相关性分析(表 3)。研究发现,细沟侵蚀量与细沟最大深度和割裂度呈极显著正相关,且细沟割裂度相关性强于细沟最大深度,相关系数为 0.960,各指标与细沟侵蚀量相关性

表 2 不同降雨条件下细沟形态参数指标

Table 2 Parameters of rill morphology under different rainfall conditions

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	坡度/(°)	细沟平均宽 度/cm	细沟最大宽 度/cm	细沟平均深 度/cm	细沟最大深 度/cm	细沟宽深比	细沟割裂度
60	10	14.7	28.1	3.9	5.6	3.77	0.008 82
	15	22.2	29.4	3.4	6.7	6.53	0.008 15
	20	29.0	48.6	4.9	7.3	5.92	0.017 38
90	5	64.9	104.2	1.9	4.1	34.16	0.168 69
	7.5	80.1	145.3	4.7	10.7	17.04	0.243 06
	10	55.1	98.1	4.5	13.4	12.24	0.206 52
	15	64.3	109.3	7.0	16.8	9.19	0.398 87

表 3 细沟侵蚀量与细沟形态特征参数的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of the rill erosion and parameters of the rill morphological characteristics

细沟形态特征参数	细沟平均宽度	细沟最大宽度	细沟平均深度	细沟最大深度	细沟宽深比	细沟割裂度	细沟侵蚀量
细沟平均宽度	1						
细沟最大宽度	0.992**	1					
细沟平均深度	0.184	0.232	1				
细沟最大深度	0.487	0.519	0.856*	1			
细沟宽深比	0.654	0.592	-0.555	-0.247	1		
细沟割裂度	0.837*	0.833*	0.563	0.805*	0.316	1	
细沟侵蚀量	0.749	0.770*	0.725	0.926**	0.075	0.960**	1

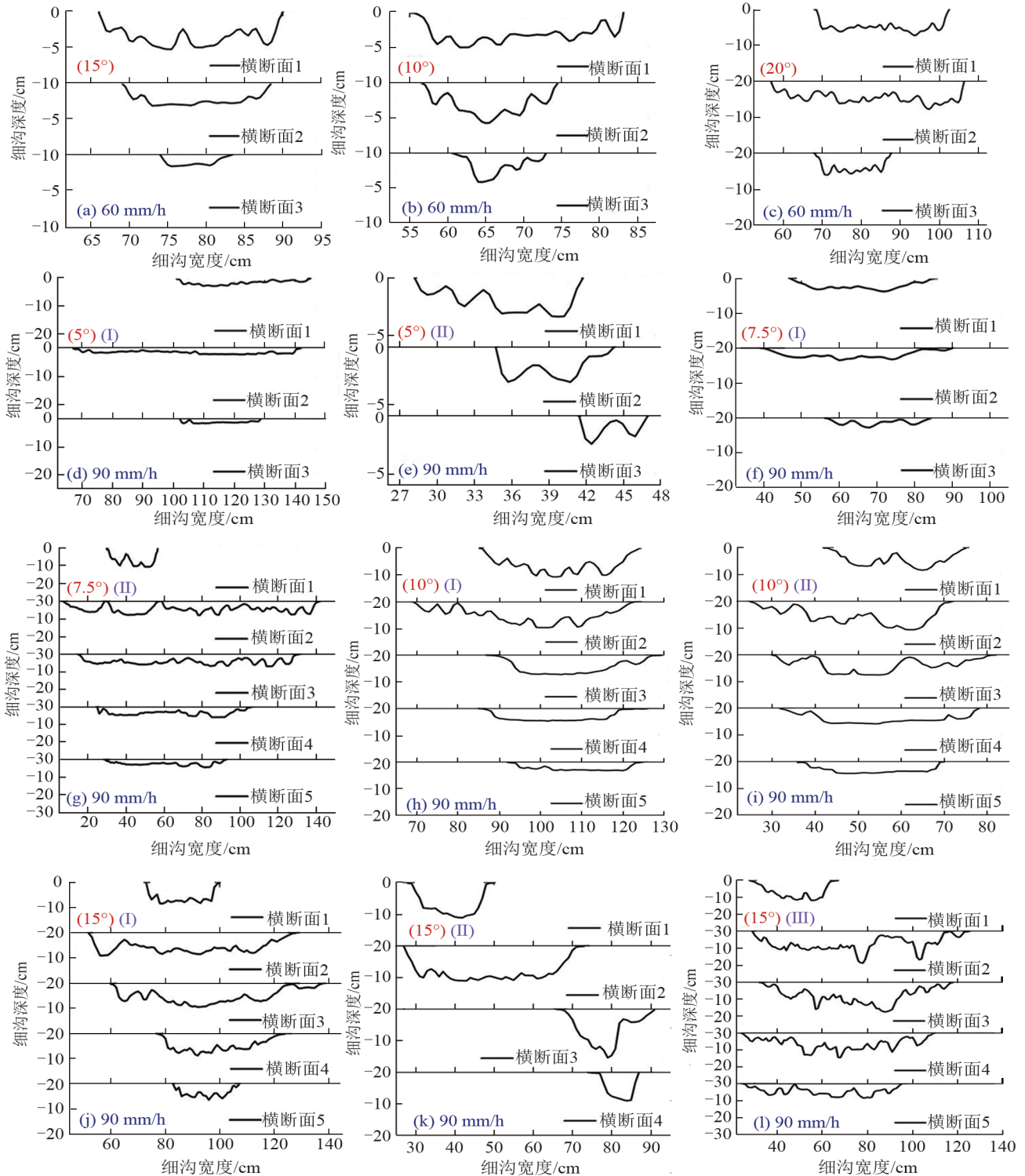
注:*表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$ 。

强度由高到低依次为细沟割裂度、细沟最大深度、细沟最大宽度、细沟平均深宽度和细沟平均深度,细沟宽深比与细沟侵蚀量无明显相关关系。

2.4 细沟横断面的空间分异特征

选取不同坡面每条细沟中具有典型性的横断面,从距离坡顶开始,从上到下,沿着细沟剖面截取

相应数量的横断面并计算对应的横断面面积和细沟横断面指标,对于细沟横断面特征,其坐标轴右侧最大值与左侧最小值的差值为该横断面实际细沟宽度(图3)。90 mm/h降雨强度下,坡面出现1~3条细沟,因此,从距离坡顶最近的细沟开始,将细沟依次命名为细沟1、细沟2和细沟3。



注: I、II、III分别表示细沟1、细沟2、细沟3。

图3 细沟横断面空间分异特征

Fig. 3 Spatial differentiation of rill cross section
<http://stbxb.alljournal.com.cn>

60 mm/h降雨强度时,在10°和15°坡度条件下细沟横截面积变化特征类似,在沟头部分横截面积最大,侵蚀最为强烈;20°条件下在(横断面2)处细沟宽度相对最大为49.5 cm,横截面积达到236.19 cm²,该处细沟侵蚀强度相对剧烈(图4)。90 mm/h降雨强度时坡面侵蚀加剧,出现多条细沟,且细沟随机性和不规则性增加(图3),沿着坡长方向,细沟横截面积呈先增后减的规律,说明相比于沟头和细沟下部,细沟中部侵蚀最为剧烈,细沟横断面宽度和深度逐渐增大,且最大沟宽和沟深与最大横截面积出现位置相同,均出现在细沟中部(横断面2、横断面3),并在15°条件下细沟3(横断面2)处横截面积达到最大值717.29 cm²。相对而言,90 mm/h降雨强度时细沟中部侵蚀最为剧烈,并随坡长的继续增加沟宽和沟深逐渐减小,因此,细沟横截面积总体呈先增大后减小的趋势(图4b)。

细沟横断面指标(η)能够表征细沟横断面变化特征,细沟横断面分异性可以通过指标波动性来描

述,对于指标波动性强弱的定义,本研究选用指标最大值和最小值的差值来描述,差值越大波动性越强,分异性越明显。60 mm/h降雨强度时,指标总体为0.46~0.76(图5),其中10°、15°、20°时横断面指标分别为0.46~0.62、0.66~0.76和0.61~0.69,随着坡度的增加,横断面指标变化规律不明显,且分布范围较小,因此波动性较弱。由于此时径流侵蚀力较弱,对细沟沟壁和沟底的侵蚀冲刷作用较小,横断面分异特征不明显。90 mm/h降雨强度时横断面指标总体为0.41~0.85,并且随坡长的增加横断面指标波动较为明显,5°、7.5°、10°和15°时指标分别为0.61~0.71、0.47~0.66、0.54~0.85和0.41~0.76,随着坡度的增加指标的变化范围呈扩大的趋势,因此波动性较强。由于降雨强度的增加,径流冲刷能力增强使得细沟横断面分异特征较为明显,总体表现为沟头和细沟下部横断面多表现为“窄浅”型,在细沟中部多表现为“宽深”型,细沟不规则性增强。

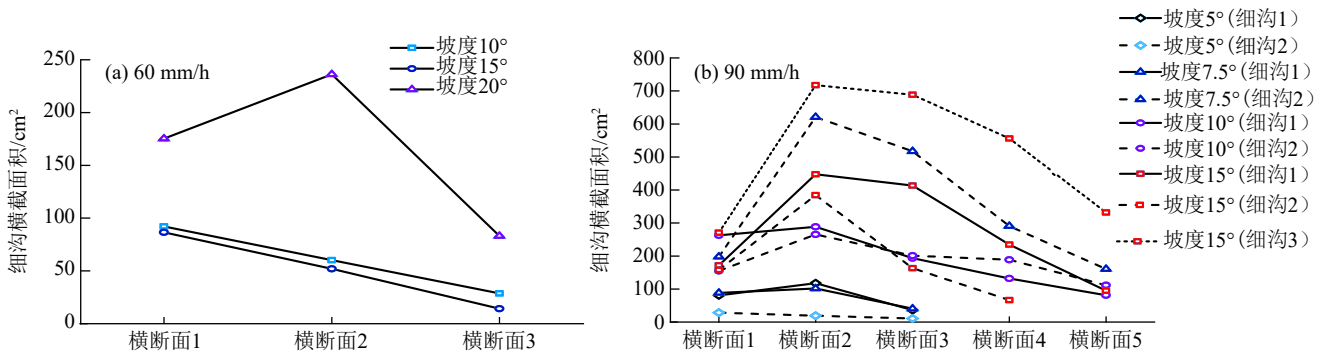


图 4 不同降雨强度与坡度条件下细沟横截面积变化特征

Fig. 4 Characteristics of the rill cross-sectional area under different rainfall intensities and slope gradients

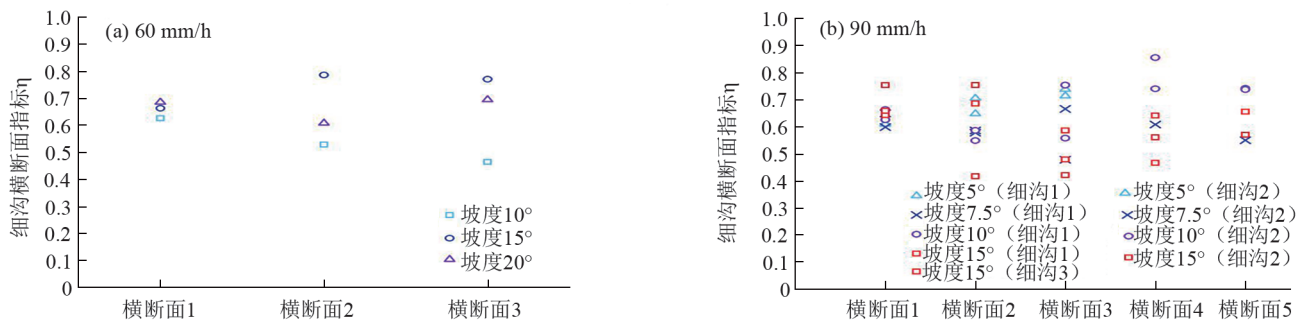


图 5 不同降雨强度与坡度条件下细沟横断面指标变化特征

Fig. 5 Characteristics of rill cross-sectional index under different rainfall intensities and slope gradients

3 讨论

3.1 细沟侵蚀对坡面产流产沙的影响

细沟的形态与坡面产流产沙高度相关,细沟形成后坡面出现大量的负地形和临时性水路网,导致坡面蓄水能力和径流阻力降低,进一步加剧土壤侵蚀的发生^[25],细沟产生时,坡面流速明显增大,沟蚀的出现加剧坡面侵蚀冲刷过程^[26]。除降雨强度和坡

度的影响,细沟复杂程度同样也是不可忽略的因素,由于90 mm/h降雨强度时细沟较为复杂,细沟沟道并不像其他部位平坦,细沟的弯曲程度,沟底的微地形变化及沟壁的不规则形态均阻碍细沟流速的增加,同时沟内泥沙携带量逐渐达到饱和,径流裹挟的泥沙量会抵消掉一部分水流冲刷力,导致水流能量减少^[27],使得流速未呈现逐渐增大的趋势。

90 mm/h降雨强度时坡面总径流量随坡度的增加呈减小趋势(表1),是因为在降雨强度一定时,径流量与水流入渗能力和承雨面积有关。一方面,在一定坡度范围内,随着坡度增加,水流冲刷作用增强,土壤入渗时间缩短,入渗率降低使得坡面分散一部分水流;另一方面,当坡长一定时,随着坡度的增加,坡面承雨面积减小导致径流量减小;其次细沟的出现并增多使得土体结构遭到破坏,增加土体的透水性,从而影响径流量的增加^[28]。因此,坡面径流量大小在以上因素影响下存在相互制约关系。随着降雨强度和坡度的增加产沙量总体呈增加的趋势,降雨一方面击散土壤团聚体,使得坡面更易受到侵蚀;另一方面,随着坡度的增加,坡面土质更加松散使得可蚀性增加,以及坡面方向的径流剪切力增大导致泥沙颗粒更易于运输;当降雨强度增大时,坡面细沟产生的时间加快且细沟数量较为密集,细沟的出现加快土壤剥蚀过程,综合影响下含沙量迅速增加^[27]。

细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要方式之一^[2],耿晓东等^[29]研究表明,降雨强度和坡度对细沟侵蚀量的贡献率存在对比消长关系,降雨强度和坡度都较小时,坡度对侵蚀过程起主导作用;当降雨强度较大或者达到并超过临界坡度以后,则降雨强度对侵蚀过程起主导作用。本试验细沟侵蚀量可占坡面侵蚀总量的70%~90%以上,与KIMARO等^[30]的研究结果类似。

3.2 细沟形态特征变化规律

HE等^[5]研究表明,大部分细沟形态参数与细沟侵蚀量高度相关,细沟侵蚀量越大,细沟形态特征参数越明显,而侵蚀量与降雨强度高度相关^[10]。因此,在90 mm/h降雨强度时,细沟形态参数特征更为明显。试验后细沟首次出现在坡面中下部,可能因为坡长较小,上坡汇水面积小,较难形成集中股流,而中下坡具有产生大量股流的条件^[31]。本试验条件下,细沟平均宽度、平均深度、宽深比和割裂度随降雨强度的增大均呈不同程度增加(表2),而坡度的变化对以上各参数的影响无明显规律,因此印证了以上观点。

细沟横断面形态发育受多种因素制约,总体来说有2个方面原因:一方面为水流冲刷与输移作用,伴随水流冲刷,细沟横断面不断下切,其下切侵蚀受制于水流挟沙能力;另一方面,受控于细沟沟壁崩塌作用,土壤越容易崩塌,形成的横断面越趋向于宽浅^[18]。马小玲等^[17]对细沟横断面形态参数的研究指出,细沟横断面形态随着细沟长度的增加,横断面形态由宽深逐渐变窄浅,横断面指标也随之减小,表明

下切和溯源侵蚀是细沟发育过程中主要的侵蚀方式。60 mm/h降雨强度时(图3),在沟头部分,水流冲刷能力强,含沙量较低,水流的下切侵蚀作用较强,同时水流沿沟道运动时对沟壁侧蚀作用较明显,沟头横断面相对宽深;在细沟下部,随着水流含沙量增加,水流下切侵蚀作用减弱,对沟壁侧蚀减弱,细沟发育速度减缓,沟底横断面相对窄浅。90 mm/h降雨强度时(图3),由于沟头部分汇水面积和径流量少,溯源侵蚀起主导作用^[1],因此,沟宽和沟深均较小;随着坡度的增加,沿坡长方向细沟宽度呈现逐渐增加的趋势,从沟顶开始径流沿坡面方向的水流能量逐渐增大,导致水流对细沟的侧蚀作用增强,在中部径流汇集导致其冲刷力增强,降低细沟中部沟壁稳定性,沟壁崩塌作用加剧导致细沟宽度增大^[32];同时,水流侵蚀力的增强和坡度的增大加剧对细沟中部的下切侵蚀,导致细沟深度增加,此时细沟中部发育主要以下切侵蚀和沟壁崩塌为主,坡面产沙量和水流含沙量迅速增大;随着细沟流速趋于稳定,细沟下部下切,沟壁崩塌作用减弱,沟宽和沟深逐渐减小并趋于稳定^[11,33],细沟宽度及深度总体表现为先增加后减小的趋势。

对于整个坡面,细沟的形态特征及发育位置具有较大的随机性,细沟横断面沿坡向变化较大,说明细沟发育时,沟壁崩塌作用较为频繁^[34]。细沟横截面积能反映坡面细沟侵蚀状况(图4),细沟横截面积越大,对应细沟侵蚀越剧烈^[35]。随着降雨强度和坡度的增加,细沟横断面的变化趋于不规则,而细沟横断面指标的大小并不能准确表征该试验细沟横断面形态特征^[10]。王睿等^[36]研究表明,粉砂质壤土下切侵蚀深度较深,更易发生下切侵蚀,砂壤土细沟沟道横截面宽深比的最大值是粉砂质壤土土壤的3倍,因此,对于本试验砂壤土而言,细沟横断面总体趋于“宽浅”。对于细沟横断面的不规则性(图3),原因可能是随着降雨强度和坡度的增大,径流量和流速增大,导致径流对沟壁冲刷作用加剧,此时下切侵蚀和侧蚀较为剧烈,加快细沟沟壑的演化过程,而细沟沟壑形态反过来影响坡面水流流向,使得径流紊动性增强,流向的改变导致细沟沟壑变化趋于不规则,因此,细沟横断面指标波动性能够反映细沟横断面分异情况,但指标大小在描述横断面形态特征时适用性不足。

4 结论

1)坡面产流量在初期迅速增加,后随产流历时的增加呈缓慢增加最后局部稳定的变化趋势,含沙量初期先缓慢减小到最小值,后大幅增加并在

90 mm/h降雨强度时逐渐趋于稳定,在60 mm/h降雨强度时有进一步剥蚀的空间。细沟侵蚀量可占坡面侵蚀总量的70%~90%以上,降雨强度增大时,细沟侵蚀占据主导作用。

2)细沟最大宽度和最大深度与细沟最大横截面积出现位置对应,多在细沟中部出现,说明细沟中部侵蚀剧烈。细沟最大深度和细沟割裂度与细沟侵蚀量存在极显著的正相关,能够表征细沟侵蚀强弱。

3)细沟横断面特征、发育位置随机性大,细沟横断面指标的波动性可以表征细沟横断面形态的分异规律。在90 mm/h降雨强度时随着坡度的增加,指标取值范围呈扩大趋势,波动性较强,表明沟壁崩塌较为频繁,细沟横断面形态趋向不规则演变。而细沟横断面指标并不能准确反应较为复杂的细沟具体形态,具有一定的局限性。因此,对于细沟横断面形态的精细化表达具有进一步的研究空间。

参考文献:

- [1] 蔡强国,朱远达,王石英.几种土壤的细沟侵蚀过程及其影响因素[J].水科学进展,2004,15(1):12-18.
CAI Q G, ZHU Y D, WANG S Y. Research on processes and factors of rill erosion[J].Advances in Water Science,2004,15(1):12-18.
- [2] 和继军,吕焯,宫辉力,等.细沟侵蚀特征及其产流产沙过程试验研究[J].水利学报,2013,44(4):398-405.
HE J J, LU Y, GONG H L, et al. Experimental study on rill erosion characteristics and its runoff and sediment yield process[J].Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(4):398-405.
- [3] 王颢霖,焦菊英,唐柄哲,等.陕北子洲“7·26”暴雨后坡耕地细沟侵蚀及其影响因素分析[J].农业工程学报,2019,35(11):122-130.
WANG H L, JIAO J Y, TANG B Z, et al. Characteristics of rill erosion and its influencing factors in slope farmland after “7·26” rainstorm in Zizhou County, Shaanxi Province[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2019,35(11):122-130.
- [4] QIN C, ZHENG F L, XU X M, et al. A laboratory study on rill network development and morphological characteristics on loessial hillslope [J]. Journal of Soils and Sediments,2018,18(4):1679-1690.
- [5] HE J J, SUN L Y, DUAN G Y, et al. Slope gradient impacts on rill morphological characteristics: Using indoor simulation experiment on loamy clay under certain rainfall intensity[J].Catena,2023,222:e106895.
- [6] 严冬春,王一峰,文安邦,等.紫色土坡耕地细沟发育的形态演变[J].山地学报,2011,29(4):469-473.
YAN D C, WANG Y F, WEN A B, et al. Configuration
- evolution of rill development on purple slopeland [J]. Journal of Mountain Science,2011,29(4):469-473.
- [7] WANG N N, LUO J, HE S Q, et al. Characterizing the rill erosion process from eroded morphology and sediment connectivity on purple soil slope with upslope earthen dike terraces [J]. Science of the Total Environment,2023,860:e160486.
- [8] 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.
- [9] 张攀,唐洪武,姚文艺,等.细沟形态演变对坡面水沙过程的影响[J].水科学进展,2016,27(4):535-541.
ZHANG P, TANG H W, YAO W Y, et al. Rill morphology evolution and runoff and sediment yielding processes [J]. Advances in Water Science, 2016, 27 (4) : 535-541.
- [10] 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.
SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(7):162-170.
- [11] 龙琪,韩剑桥,何育聪,等.黄土坡面细沟侵蚀强度的空间分布及形态分异特征[J].水土保持学报,2022,36(1):1-7.
LONG Q, HAN J Q, HE Y C, et al. Spatial distribution of rill erosion intensity on loess slope and its morphology differentiation characteristics [J].Journal of Soil and Water Conservation,2022,36(1):1-7.
- [12] CAROLLO F G, DI STEFANO C, NICOSIA A, et al. Plot investigation on rill flow resistance due to path tortuosity [J]. International Soil and Water Conservation Research,2023,11(4):602-609.
- [13] 邓神宝,沈清华,陈三雄,等.基于地面三维激光扫描及BIM技术的坡面土壤侵蚀监测[J].水利技术监督,2018,26(1):37-40.
DENG S B, SHEN Q H, CHEN S X, et al. Monitoring of soil erosion on slope based on 3D laser scanning and BIM technology [J]. Technical Supervision in Water Resources,2018,26(1):37-40.
- [14] 胡文生,蔡强国,陈浩.摄影测量技术在土壤侵蚀研究中的应用[J].水土保持研究,2004,11(4):150-153.
HU W S, CAI Q G, CHEN H. The application of photogrammetric technique to soil erosion studies [J]. Research of Soil and Water Conservation,2004,11(4):150-153.
- [15] 赵新凯,龚家国,任政,等.黑垆土坡面细沟形态演变规律试验研究[J].水利水电技术,2020,51(2):205-212.
ZHAO X K, GONG J G, REN Z, et al. Experimental

- study on morphological evolution of rills on dark loessial soil slope [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(2): 205-212.
- [16] 覃超, 郑粉莉, 徐锡蒙, 等. 基于立体摄影技术的细沟与细沟水流参数测量[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(11): 150-156.
- QIN C, ZHENG F L, XU X M, et al. Measurement and characteristics of rill geometry and flow parameter based on photogrammetry [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(11): 150-156.
- [17] 马小玲, 张宽地, 杨帆, 等. 坡面细沟侵蚀断面形态发育影响因素分析及动力特性试验[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(4): 209-216.
- MA X L, ZHANG K D, YANG F, et al. Influencing factor analysis of rill erosion section morphology development on slope and its dynamic characteristic experiment [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(4): 209-216.
- [18] 李鹤. 坡面细沟横断面形态演化规律研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2015.
- LI H. Study on the morphological evolution of cross section of slope rill [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2015.
- [19] 郑粉莉, 唐克丽, 陈文亮. 细沟侵蚀过程的研究方法[J]. *中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊(土壤侵蚀与生态环境演变研究论文集)*, 1993, 7(1): 107-111.
- ZHENG F L, TANG K L, CHEN W L. Research methods of rill erosion process [J]. *Proceedings of Northwest Soil and Water Conservation Institute, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences (Proceedings of Soil Erosion and Ecological Environment Evolution)*, 1993, 7(1): 107-111.
- [20] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 细沟侵蚀影响因素和临界条件研究进展[J]. *地理科学进展*, 2010, 29(11): 1319-1325.
- LI J L, CAI Q G, SUN L Y, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(11): 1319-1325.
- [21] 刘青泉, 李家春, 陈力, 等. 坡面流及土壤侵蚀动力学(II): 土壤侵蚀[J]. *力学进展*, 2004, 34(4): 493-506.
- LIU Q Q, LI J C, CHEN L, et al. Dynamics of overland flow and soil erosion (II) soil erosion [J]. *Advances in Mechanics*, 2004, 34(4): 493-506.
- [22] 刘和平, 王秀颖, 刘宝元. 人工模拟降雨下细沟与细沟间流速的沿程分布[J]. *地理研究*, 2011, 30(9): 1660-1668.
- LIU H P, WANG X Y, LIU B Y. Study on rill and interrill flow velocity along hillslopes with simulated rainfall [J]. *Geographical Research*, 2011, 30(9): 1660-1668.
- [23] 沈海鸥, 郑粉莉, 温磊磊. 细沟发育与形态特征研究进展[J]. *生态学报*, 2018, 38(19): 6818-6825.
- SHEN H O, ZHENG F L, WEN L L. A research review of rill development and morphological characteristics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(19): 6818-6825.
- [24] 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.
- ZHANG K L, TANG K L. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(1): 9-15.
- [25] 李朋飞, 黄珂瑶, 胡晋飞, 等. 黄土丘陵沟壑区细沟发育形态的变化及其与侵蚀产沙的关系[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(18): 92-102.
- LI P F, HUANG K Y, HU J F, et al. Morphological development of rills and its relationship with hillslope erosion in the hilly and gully Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(18): 92-102.
- [26] 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.
- CHEN J J, SUN L Y, LIU J T, et al. Effect of slope gradient on rill erosion under different rainfall intensities and slope lengths [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(2): 1-5.
- [27] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(6): 8-13.
- LI J L, CAI Q G, SUN L Y, et al. Analysis of interaction effects of rainfall intensity, slope degree and slope length on rill erosion [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(6): 8-13.
- [28] BAHDDOU S, OTTEN W, WHALLEY W R, et al. Changes in soil surface properties under simulated rainfall and the effect of surface roughness on runoff, infiltration and soil loss [J]. *Geoderma*, 2023, 431: e116341.
- [29] 耿晓东, 郑粉莉, 刘力. 降雨强度和坡度双因子对紫色土坡面侵蚀产沙的影响[J]. *泥沙研究*, 2010, 35(6): 48-53.
- GENG X D, ZHENG F L, LIU L. Effect of rainfall intensity and slope gradient on soil erosion process on purple soil hill slopes [J]. *Journal of Sediment Research*, 2010, 35(6): 48-53.
- [30] KIMARO D N, POESEN J, MSANYA B M, et al. Magnitude of soil erosion on the northern slope of the Uluguru Mountains, Tanzania: Interrill and rill erosion [J]. *Catena*, 2008, 75(1): 38-44.
- [31] 李龙, 张尚轩, 高鑫宇, 等. 次降雨下砒砂岩坡面细沟形态发育及其对侵蚀产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(3): 1-9.
- LI L, ZHANG S X, GAO X Y, et al. Development of rill morphology on sandstone slopes under individual rainfall event and its effect on erosion and sediment production [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023,

- 30(3):1-9.
- [32] 魏天兴,朱金兆.黄土残塬沟壑区坡度和坡长对土壤侵蚀的影响分析[J].北京林业大学学报,2002,24(1):59-62.
- WEI T X, ZHU J Z. Effects of slope length and grade on soil erosion in the Gully Regions in Loess Plateau[J].Journal of Beijing Forestry University,2002,24(1):59-62.
- [33] 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.
- ZHANG M, HE J J, CAI Q G. Rill erosion process and the response of the runoff velocity[J].Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition),2017,45(5):85-91.
- [34] 和继军,宫辉力,李小娟,等.细沟形成对坡面产流产沙过程的影响[J].水科学进展,2014,25(1):90-97.
- HE J J, GONG H L, LI X J, et al. Effects of rill development on runoff and sediment yielding processes [J]. Advances in Water Science,2014,25(1):90-97.
- [35] 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.
- [36] 王睿,李鹏,韩建纯,等.沟头高度和土壤质地对细沟溯源侵蚀特征和形态发育的影响[J].农业工程学报,2021,37(10):91-99.
- WANG R, LI P, HAN J C, et al. Effects of gully head height and soil texture on headward erosion characteristics and topography evolution [J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2021,37(10):91-99.