

黄土坡面细沟形态变化及对侵蚀产沙过程的影响

张攀^{1,2}, 姚文艺^{1*}, 唐洪武², 肖培青¹

(1. 黄河水利科学研究院水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003;
2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 为揭示细沟形态对侵蚀产沙过程的影响, 选取 66、94、127 mm/h 三个雨强条件, 对 20°陡坡坡面进行了坡面水蚀精细模拟降雨试验, 选取沟长、沟宽、沟深等指标刻画细沟形态随降雨历时的变化规律。结果表明: 1) 降雨强度对细沟长度的影响显著, 细沟宽度变化受降雨历时的影响较大, 细沟深度的变化对降雨强度表现出较强的分异规律。2) 细沟形态参数之间不是相互独立的, 存在明显的相关关系, 说明细沟形态的演变是一个多维度过程。3) 细沟的形成和发展与坡面水沙过程关系密切, 细沟形态参数与含沙量、侵蚀速率之间均存在较显著的对数函数关系。该研究可以为细沟侵蚀动态模型的建立提供基础数据。

关键词: 土壤; 侵蚀; 径流; 黄土坡面; 细沟形态; 产沙; 降雨

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.05.015

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2018)-05-0114-06

张攀, 姚文艺, 唐洪武, 肖培青. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.05.015 http://www.tcsae.org
Zhang Pan, Yao Wenyi, Tang Hongwu, Xiao Peiqing. Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(5): 114-119. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2018.05.015 http://www.tcsae.org

0 引言

细沟侵蚀是黄土高原坡耕地土壤侵蚀的主要方式之一^[1-4]。在细沟侵蚀过程中, 细沟形态影响和决定着坡面水流及泥沙的运移规律, 是具有地貌意义的土壤侵蚀影响因素^[5-6], 这一因素体现着坡面水蚀动力学各要素对比关系, 是深入认识流域侵蚀产沙物理过程的关键科学问题^[7-9]。因此, 从坡面微地貌演变来分析坡面侵蚀动力过程, 是当前坡面侵蚀研究领域的热点问题^[10]。

细沟侵蚀有别于其他沟道侵蚀的一个显著特点是, 伴随着侵蚀产沙过程, 细沟的边壁变化剧烈^[11-12], 通过跟踪模拟降雨条件下细沟演变的全过程, 监测坡面泥沙冲淤动态分布, 细沟边壁的剧烈变化可以归纳为沟头前进、沟壁坍塌和沟床下切, 这 3 种侵蚀方式分别对应溯源侵蚀、重力作用和水流剪切分散作用, 溯源侵蚀改变了细沟长度, 沟壁坍塌影响着细沟宽度, 水流剪切分散则是沟床下切的主要动力^[13]。这 3 种侵蚀系统内部驱动作用的侵蚀机理各不相同, 产沙特点与规律也有所不同, 其中, 水流剪切对土壤的分散作用主要受控于细沟流的水动力条件, 而溯源侵蚀与沟壁坍塌则是水力与重力联合作用的结果。虽然目前在细沟发育过程模拟^[14-23]及细沟形态量化^[24-28]等方面已经取得了较为丰富的研究成果,

但研究大多集中在对最终侵蚀形态的分析, 而对动态发育过程中的细沟形态连续演变规律研究较少, 且研究多关注于细沟网络整体形态的复杂程度差异, 而缺乏对其边壁变化规律与侵蚀产沙过程的定量分析。

鉴于此, 本文通过实体模拟试验, 跟踪细沟演变的全过程, 监测坡面泥沙冲淤动态分布, 定量分析沟头溯源、沟壁坍塌、沟床下切变化量, 研究细沟边壁剧烈变化对坡面产沙过程及坡面侵蚀方式的影响, 追溯侵蚀产沙来源, 探讨降雨驱动下溯源侵蚀、重力作用、水流剪切分散对细沟形态的塑造过程, 阐明细沟侵蚀产沙内部驱动机制及主要控制因子, 为细沟侵蚀动态模型的建立提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验在水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室降雨大厅内进行。试验装置主要由人工模拟降雨系统和坡面实体模型 2 部分组成。

人工模拟降雨系统可以模拟 30~180 mm/h 的降雨强度。降雨器喷头距地面 22 m, 可以使 95% 以上的雨滴终速达到天然降雨终速。坡面土壤侵蚀模拟实体模型采用规格为 5 m×1 m×0.6 m 的可调坡度土槽, 可调坡度在 0~30°之间, 可模拟从缓坡到陡坡等不同角度坡面, 本次试验模拟将坡面设定为 20°陡坡坡面, 土槽底设有直径为 5 mm 的透水孔, 可使土壤水自由入渗。试验用土取自位于黄土高原第Ⅲ副区的河南省巩义市邙山表层黄土, 取土位置为去除枯枝落叶层后坡面地表 20cm 以内的黄土。土壤颗粒机械组成的测定在黄河水利科学研究院

收稿日期: 2017-05-22 修订日期: 2018-02-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51409110); 河南省创新型科技人才队伍建设工程(162101510004)

作者简介: 张攀, 高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀与泥沙运动研究。Email: zpyrcc@163.com

*通信作者: 姚文艺, 教授级高级工程师, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持、河流泥沙等研究。Email: wyao@yrihr.com.cn

工程力学研究所的土壤物理试验室内进行操作,土壤粒组成见表1。

表1 试验土壤的颗粒机械组成
Table 1 Particle size composition of experimental soil

粒径范围 Particle size class/mm	0.005~0.01	>0.01~0.05	>0.05
组成 Proportion/%	43.40	35.45	21.15

1.2 试验设计

在野外调查的基础上,依据黄土高原野外坡面空间特征,制作裸坡面模型。首先在土槽底部铺一层厚约10 cm的粗沙,以保证土壤的透水性,试验用土要先过直径为10 mm的筛,以去除杂草和石块,在进行土槽装填时,采用分层填土、分层压实、随机测容重的方法进行,以控制下垫面的一致性,每层填土厚度约为10 cm,填土深度为60 cm,土壤容重控制在 1.25 g/cm^3 左右。为控制土壤容重的均一性,每填完一层土,用环刀随机取5个不同部位样本,同时,为消除土壤含水量的影响,填土过程中,用TDR时域反射仪随机测定每一层不同部位土壤的含水量,并通过对于干湿土比例的调整,使土壤水分含量控制在15%左右。

为保证每场试验开始前的土壤前期含水量保持一致,在试验前一天,用不会形成侵蚀的30 mm/h雨强的小雨对试验土槽进行预降雨,直至坡面开始产流为止,静置24 h以备试验。试验开始前再次进行土壤含水量测定,控制土壤水分含量在25%~30%。

为了更客观地反映坡面侵蚀过程中细沟形态的变化,本实验设计了一次侵蚀多次降雨方案,使细沟侵蚀过程既有独立性又有继承性。模拟试验降雨特征参数设计主要包括雨强、历时、降雨场次的选定。细沟侵蚀主要是由短历时暴雨形成径流冲刷产生的,参照黄土高原侵蚀性降雨及其暴雨频率特征,试验选定3个雨强分别为60、90、120 mm/h,分别对应黄土高原地区侵蚀性降雨中的中雨、大雨和暴雨^[29],试验雨强通过压强与喷头组合率定得到。根据细沟发育情况,每种雨强下进行7场降雨,每场降雨历时约为10 min。

为最大限度地消除暂停降雨对坡面产流产沙过程的影响,坡面地形测定采用由美国法如公司生产的FARO Focus3D三维激光扫描仪,其扫描速度快(976,000 bit/s)、精度高(50 m距离实测精度达2.0 mm),扫描一个标准坡面用时约1 min,可最大限度地保持坡面产流产沙的连续性。为了在保证精度的前提下最大限度地压缩扫描时间,将三维激光扫描仪安装于试验土槽正上方的降雨系

统压力管道上,在每场降雨结束后立即进行地形扫描,扫描结束后立即开始下一场次降雨。试验过程中,利用LPM激光雨滴谱仪量测降雨强度和获取雨滴谱图,进行降雨时程分析;用染色剂示踪(KMnO_4)和实时摄像技术相结合的方法测定坡面及细沟内水流流速;用直尺量测坡面水宽和水深;当坡面开始产流时,用径流桶在集流槽处收集径流泥沙样,采样间隔为1~2 min/次;用高清摄像机对坡面地形变化过程进行全程监测,观察并辅助人工记录细沟产生—发展—稳定全过程,坡面关键时间节点信息,如产流开始时间、跌坎出现时间、沟壁坍塌位置等,并每隔一定时间,从不同角度,用数码相机拍摄细沟形态演变过程。每场降雨试验结束后进行样本数据测量,采用自制铁皮量桶测量径流体积,采用烘干法推求坡面产沙量及径流含沙量,采集的径流泥沙样通过体积量测及烘干称质量,可计算得到含沙量,自制铁皮量桶的测精确度约为0.5 L,称质量精度为0.01 g。经测定,实际降雨强度分别为66、94、127 mm/h,雨强均匀性>90%。

1.3 数据处理

由于受现场条件的干扰和扫描误差的影响,利用三维激光地形扫描仪得到的DEM中往往含有许多离散点数据,同时产生噪点,因此,建模前首先要对数据进行诊断处理,即运用相应算法对数据进行平滑、对齐、滤波等处理工作,为模型的构建做好准备。接下来,根据定位小球的位置,完成点云数据的拼合、滤波、精简、曲面生成等操作,形成完整的坡面DEM。细沟沟长、沟宽及沟深等数据通过ArcGIS 10的空间分析功能提取得到。

2 结果与分析

2.1 降雨对细沟边壁的塑造过程

2.1.1 溯源侵蚀与沟头前进

溯源侵蚀是发生在细沟沟头部位的侵蚀产沙过程,在溯源侵蚀作用下,沟头前进和多条细沟的连通是坡面细沟长度增加的主要方式。通过对比降雨前后细沟累积长度之差,作为沟头前进的变化量,对溯源侵蚀作用进行定量研究。根据图1a的统计结果,66、94、127 mm/h三种雨强下,细沟累积长度分别介于0.5~5.3、1.3~9.7、1.2~9.0 m之间,随降雨场次的增加,增加的幅度逐渐变小。同一降雨历时下,细沟累积长度94 mm/h > 127 mm/h > 66 mm/h,说明在雨强适中的情况下溯源侵蚀最强烈,沟头前进最活跃;当降雨强度过大,细沟网发育达到稳定的时间较短,导致细沟累积长度的增加幅度减小;当降雨强度过小,细沟径流能量较小,溯源侵蚀减弱。

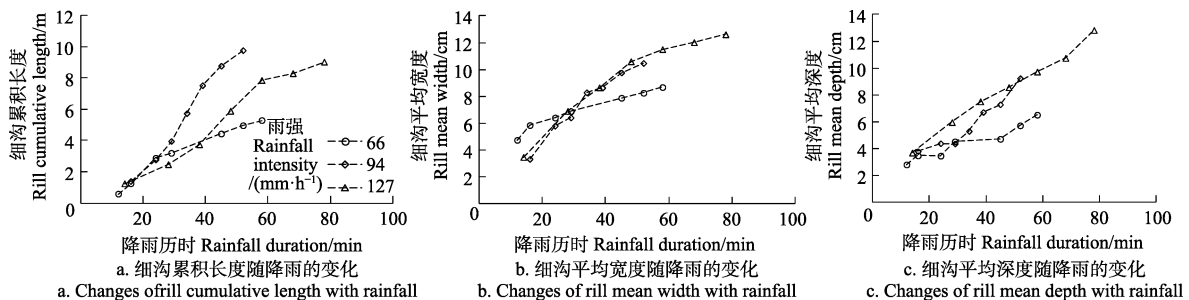


图1 细沟形态随降雨的变化

Fig.1 Changes of rill morphology with rainfall

2.1.2 重力侵蚀与沟壁坍塌

沟壁坍塌是发生在沟壁的侵蚀产沙过程,在重力侵蚀作用下,沟壁坍塌和相邻细沟的合并是细沟加宽的主要方式。采用降雨前、后细沟平均宽度之差,作为沟壁坍塌的变化量,对重力侵蚀作用进行定量研究。根据图 1b 的统计结果,66、94、127 mm/h 三种雨强下,细沟平均宽度分别变化于 4.7~8.7、3.3~10.5、3.4~12.6 cm,降雨强度对细沟宽度的影响不明显,但在不同的降雨历时下,细沟宽度变化表现出明显的分异规律。分析其原因,重力作用受降雨强度的影响较小,而与降雨入渗、土体含水量关系密切,因此细沟沟壁坍塌现象在不同降雨强度下变化不明显,而在不同的降雨历时下表现出明显的分异性。

2.1.3 径流剪切分散与沟底下切

沟底下切是发生在沟床底部的侵蚀产沙过程,在径流剪切分散作用下,沟底下切侵蚀和细沟内再次出现的下切沟头的进一步溯源侵蚀是细沟加深的主要方式。采用降雨前后细沟平均深度之差,作为沟底下切的变化量,对径流的剪切分散作用进行定量研究。根据图 1c 的统计结果,66、94、127 mm/h 三种雨强下,细沟平均深度分别变化于 2.8~6.5、3.8~9.2、3.7~12.8 cm,且对降雨强度表现出较强的分异规律。同一降雨历时下,细沟平

均深度 $127 \text{ mm/h} > 94 \text{ mm/h} > 66 \text{ mm/h}$,且随着降雨历时的增加,呈波动增加趋势。分析其原因,一方面随着降雨强度的增加,细沟径流剪切力增大,侵蚀作用增加;另一方面,细沟内的水流为水沙二相流,侵蚀作用的增大使细沟内水流含沙量增加,而含沙量的变化会影响坡面流水动力学参数,从而间接影响坡面径流能量消耗。

2.2 细沟形态参数之间的关系

为揭示细沟形态特征参数之间的关系,通过相关分析,判断其内在联系。图 2 所示为点绘的细沟形态参数之间的关系,其中细沟累积长度与平均密度之间呈现明显的线性关系,相关系数 $R = 0.90$;细沟累积长度与平均深度之间呈现较明显的指数关系,相关系数 $R = 0.88$;细沟平均宽度与平均深度之间呈现明显的指数关系,相关系数 $R = 0.93$ 。可见,细沟形态参数之间并不是相互独立的,而是相互影响、相互联系的,细沟形态的演变不是一个单向的发展过程,而是一个多维度变化过程。在坡面侵蚀系统内部溯源侵蚀、重力侵蚀、径流剪切并不是独立发生的,而是一个相互耦合的协同作用系统,细沟形态的变化受控于各作用力间的对比关系,是坡面侵蚀系统能量的综合反映。

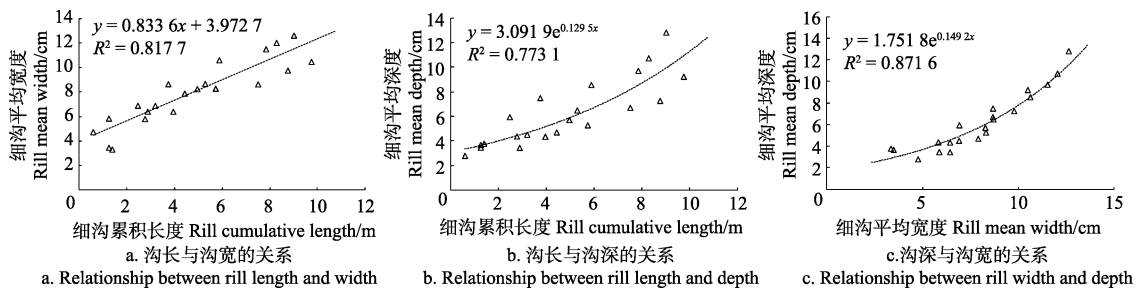


图 2 细沟形态参数之间的关系

Fig.2 Relationship between rill morphology parameters

2.3 细沟形态与产沙过程之间的关系

为揭示细沟形态变化与坡面产沙过程的耦合关系,图 3、图 4 点绘了细沟形态参数与含沙量、侵蚀率之间的关系。由图可见,细沟累积长度、平均宽度、平均深度与径流含沙量、径流侵蚀速率间均存在对数函数关系,且相关系数 $r > 0.70$,呈较显著相关,说明细沟的形成和发展与坡面水沙过程的关系密切,且沟头前进、沟壁扩张、沟头下切对坡面产沙过程的影响基本一致。一方面,细沟

形成后,为径流和侵蚀产物提供了输送通道,坡面水流由面流转变为沟内集中股流,水流性质的转变引起侵蚀量的急剧增加,必将使坡面水沙关系发生变化;另一方面,细沟形态在演变过程中,通过分叉、分级、密度、频度、数目以及长度等因素,影响着沟内水流结构,从而影响坡面侵蚀过程中的径流、入渗、泥沙输移和汇流等,尤其对于黏粒含量低的黄土,侵蚀过程中易发生细沟边壁的剧烈变化,必将引起水沙过程发生显著改变。

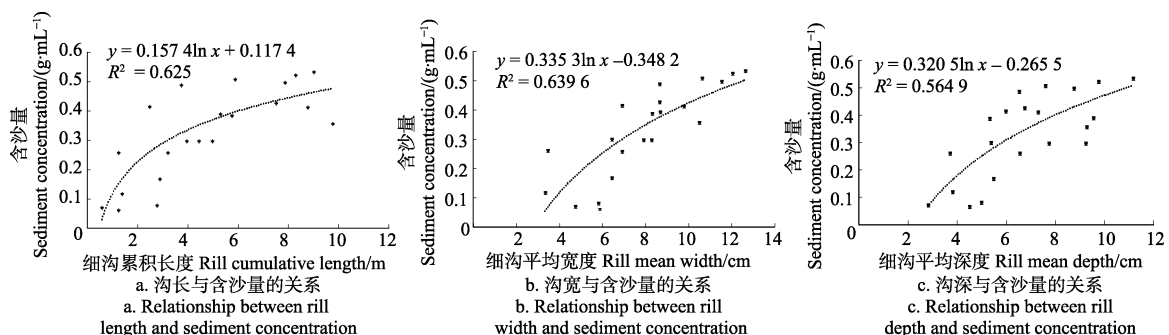


图 3 细沟形态与含沙量的关系

Fig.3 Relationship between rill morphology and sediment concentration

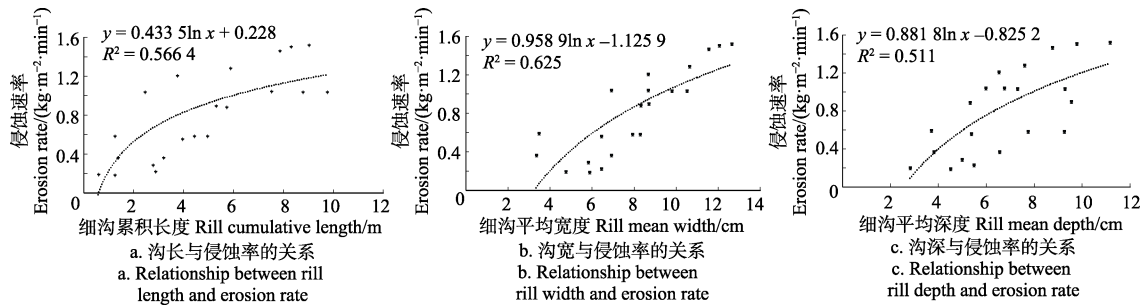


图 4 细沟形态与侵蚀率的关系

Fig.4 Relationship between rill morphology and erosion rate

3 结 论

本研究以坡面细沟形态为切入点，通过实体模拟试验和三维激光地形扫描，跟踪细沟网络发展全过程，量化其发育演化规律，对坡面侵蚀过程中的溯源侵蚀、重力作用、径流剪切作用进行了定量研究，揭示了细沟形态参数之间及与产沙过程之间的关系。结果表明：

1) 降雨强度对细沟长度、深度的影响显著，细沟宽度受降雨历时的影响较大，不同雨强、历时下细沟形态发育的分异规律显著。

2) 细沟形态参数之间存在明显的相关关系，其中细沟累积长度与平均宽度呈线性关系，累积长度、平均宽度与平均深度之间呈明显的指数关系。细沟形态与含沙量、侵蚀速率之间存在着显著的对数函数关系。

3) 细沟形态参数与含沙量、侵蚀率之间均呈较显著的对数函数关系，说明细沟的形成和发展与坡面水沙过程的关系密切，且沟头前进、沟壁扩张、沟头下切对坡面产沙过程的影响基本一致。

[参 考 文 献]

[1] 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, 19(11): 1319—1325. Li Junlan, Cai Qianguo, Sun Liying, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion[J]. Progress in Geography, 2010, 19(11): 1319—1325. (in Chinese with English abstract)

[2] Wirtz S, Seeger M, Ries J B. Field experiments for understanding and quantification of rill erosion processes[J]. Catena, 2012, 91: 21—34.

[3] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究[J]. 泥沙研究, 1998, (1): 52—59. Cai Qianguo. Research of rill initiation condition on loess hillslopes[J]. Journal of Sediment Research, 1998, (1): 52—59. (in Chinese with English abstract)

[4] 郑良勇, 李占斌, 李鹏, 等. 稀土元素示踪坡面次降雨条件下的侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2010, 26(3): 87—91. Zheng Liangyong, Li Zhanbin, Li Peng, et al. Slope erosion process tracing in simulated raining with rare earth elements[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(3): 87—

91. (in Chinese with English abstract)

[5] Horton R E. Erosional development of streams and drainage basins: hydro-physical approach to quantitative morphology[J]. Bulletin of Geological Society of America, 1945, 56: 275—370.

[6] 牛耀彬, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J]. 农业工程学报, 2016, 32(19): 154—161. Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Rill morphology development of engineering accumulation and its relationship with runoff and sediment[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(19): 154—161. (in Chinese with English abstract)

[7] 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 Pan, Tang Hongwu, Yao Wenyi, et al. Rill morphology evolution and runoff and sediment yielding processes[J]. Advance in Water Science, 2016, 27(4): 535—541. (in Chinese with English abstract)

[8] 何小武, 张光辉, 刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离实验研究[J]. 农业工程学报, 2003, 19(6): 52—55. He Xiaowu, Zhang Guanghui, Liu Baoyuan. Soil detachment by shallow flow on slopes[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(6): 52—55. (in Chinese with English abstract)

[9] 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. Lei Tingwu, Zhang Qingwen, Zhao Jun, et al. Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(4): 476—482. (in Chinese with English abstract)

[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 Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. Effects of Rainfall intensity and slope gradient on rill morphological characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 162—170. (in Chinese

- with English abstract)
- [11] 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.
Shen Haiou, Zheng Fenli, Wen Leilei, et al. An experimental study on rill morphology at loess hill slope[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(19): 5514—5521. (in Chinese with English abstract)
- [12] 霍云云, 吴淑芳, 冯浩, 等. 基于三维激光扫描仪的坡面细沟侵蚀动态过程研究[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 32—37.
Huo Yunyun, Wu Shufang, Feng Hao, et al. Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laserscanner[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(2): 32—37. (in Chinese with English abstract)
- [13] 韩鹏, 倪晋仁, 李天宏. 细沟发育过程中的溯源侵蚀与沟壁崩塌[J]. 应用基础与工程科学学报, 2002, 10(2): 115—125.
Han Peng, Ni Jinren, Li Tianhong. Headcut and bank landslip in rill evolution[J]. Journal of Applied Basic and Engineering Science, 2002, 10(2): 115—125. (in Chinese with English abstract)
- [14] Vinci A, Brigante R, Todisco F, et al. Measuring rill erosion by laser scanning [J]. Catena, 2015, 124: 97—108.
- [15] Brunton D A, Bryan R B. Rill network development and sediment budgets [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25: 783—800.
- [16] 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: 38—44.
- [17] 陈俊杰, 孙莉英, 蔡崇法, 等. 不同土壤坡面细沟侵蚀差异与其影响因素[J]. 土壤学报, 2013, 50(2): 281—288.
Chen Junjie, Sun Liying, Cai Chongfa, et al. Rill erosion on different soil slopes and their affecting factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(2): 281—288. (in Chinese with English abstract)
- [18] Shen H O, Zheng F L, Wen L L, et al. An experimental study of rill erosion and morphology[J]. Geomorphology, 2015, 23: 193—201.
- [19] 雷廷武, Mark A Nearing. 侵蚀细沟水力学特性及细沟侵蚀与形态特征的试验研究[J]. 水利学报, 2000, 31(11): 49—54.
Lei Tingwu, Nearing M A. Flume experiments for determining rill hydraulic characteristic erosion and rill patterns[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(11): 49—54. (in Chinese with English abstract)
- [20] 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 Dongchun, Wang Yifeng, Wen Anbang, et al. Configuration evolution of rill development on purple slope land[J]. Journal of Mountain Science, 2011, 29(4): 469—473. (in Chinese with English abstract)
- [21] 肖培青, 郑粉莉, 汪晓勇, 等. 黄土坡面侵蚀方式演变与侵蚀产沙过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(1): 24—27.
Xiao Peiqing, Zheng Fenli, Wang Xiaoyong, et al. Experimental study on erosion pattern evolution and sediment process on loessal hillslopes[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(1): 24—27. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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 Jijun, Lv Ye, Gong Huili, 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. (in Chinese with English abstract)
- [23] Fujiwara T, Fukada M. An experimental study of the rill formation process on a bare slope[J]. Technology reports of the Yamaguchi University. 1990, 4 (4): 313—323.
- [24] Gomez J A, Darboux F, Nearing M A. Development and evolution of rill networks under simulated rainfall[J]. Water Resources Research, 2003, 39 (6): 1—13.
- [25] 张凤宝, 杨明义. 基于 ^7Be 示踪和细沟沟网分形维数研究坡面土壤侵蚀[J]. 核农学报, 2010, 24(5): 1032—1037.
Zhang Fengbao, Yang Mingyi. Plot-slope soil erosion using ^7Be measurement and rill fractal dimension[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(5): 1032—1037. (in Chinese with English abstract)
- [26] Zhang Pan, Tang Hongwu, Yao Wenyi, et al. Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope[J]. Catena, 2016, 137: 536—544.
- [27] 张攀, 姚文艺, 唐洪武, 等. 模拟降雨条件下坡面细沟形态演变与量化方法[J]. 水科学进展, 2014, 26(1): 51—58.
Zhang Pan, Yao wenyi, Tang Hongwu, et al. Evolution and quantization methods of rill morphology on the slope under rainfall simulation[J]. Advance in Water Science, 2014, 26(1): 51—58. (in Chinese with English abstract)
- [28] Gatto L W. Soil freeze-thaw-induced changes to a simulated rill: Potential impacts on soil erosion[J]. Geomorphology, 2000, 32: 147—160.
- [29] 周佩华, 王占礼. 黄土高原土壤侵蚀暴雨的研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(3): 1—5.
Zhou Peihua, Wang Zhanli. A study on rainstorm causing soil erosion in the loess plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(3): 1—5. (in Chinese with English abstract)

Rill morphology change and its effect on erosion and sediment yield on loess slope

Zhang Pan^{1,2}, Yao Wenyi^{1*}, Tang Hongwu², Xiao Peiqing¹

(1. Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau of Ministry of Water Resources, Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The rill morphology changes directly affect the slope hydrological process, and thus forms a mutual feedback effect with runoff yield and concentration, sediment yield and transport. This process embodies the relationship between the elements of water erosion dynamics on the slope, and is a key scientific problem in understanding the physical process of erosion and sediment yield. Morphological development of rill on slope forms a micro relief dynamic response system with soil erosion driven by rainfall. To reveal the formation mechanism of this system, scientific quantification is the key problem. In the past research, one-factor quantification parameter based on mathematical statistics was used, which was hard to express the complexity of the whole system effectively. In this paper, the influence of rill morphology evolution on runoff and sediment process was studied. The rainfall, rill evolution, runoff and sediment yield were used as a hydrodynamic coupling system to study the rill morphological characteristics and implementation methods, to reveal the law of spatial and temporal differentiation of rill morphology, and clarify the quantitative response of rill morphology to rainfall-runoff and sediment yield. The aim of this study was to break through the unresolved spatial variability problem in the existing water erosion prediction model, and to provide scientific basis for the prediction of soil erosion process. The indoor simulated rainfall experiment was conducted to reveal the variation regularity of the rill boundary and the response of the erosion and sediment yield under the fixed slope gradient (20°) and 3 rainfall intensities (66, 94, 127 mm/h). The parameters such as rill cumulative length, mean width and depth were used to describe the change of the rill morphology with the rainfall. Results show that the effect of rainfall intensity on rill length is significant, the change of rill width is influenced by the rainfall duration, and the change of rill depth shows a strong differentiation rule with the rainfall intensity. Rill morphology parameters are not independent of each other, and there is a clear correlation between them. This shows that the evolution of rill morphology is not a one-dimensional development process, but a multi-dimensional change process. Sediment yield is affected by the development of rill. There is a logarithmic function relationship between the rill morphology and the sediment concentration and erosion rate. The results show that the formation and development of the rill are closely related to the water and sediment yield on the slope, and the influence of rill forwarding, rill wall expansion and rill bed undercutting on the sediment yield is basically the same. This study can provide basic data for the establishment of rill erosion dynamic model.

Keywords: soils; erosion; runoff; loess slope; rill morphology; sediment yield; rainfall