水　利　学　报

2017年11月　　SHUILI　XUEBAO　　第48卷　第11期

文章编号:0559-9350(2017)11-1334-07

黄丘区坡面细沟流速分布特征试验研究

张　攀[1]，姚文艺[1]，魏鹳举[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，河南 郑州　450003；
2. 青海大学 水利电力学院，青海 西宁　810016）

摘要：利用坡面水蚀精细模拟降雨试验，对黄丘区陡坡(20°)条件下细沟流速分布特征进行了研究。通过对细沟形态演变过程的观察与分析，同时结合试验中对细沟间及细沟内流速的观测，给出了细沟发育过程中坡面流速沿程分布以及细沟内关键位置的流速分布。结果表明，细沟间流速分布基本不受细沟发育程度的影响，而细沟内水流流速与细沟发育过程之间存在互馈关系，首先坡面漫流向集中股流的转化促使细沟发育，会导致细沟内流速的增加，但随着细沟的进一步发展，汇流面积减小，沟床形态阻力及沟底跌坎消能作用增大，细沟流速又会逐渐减小，沟床形态阻力与径流集中产生的流速增量二者间的相互对比关系影响着细沟内水流速度。

关键词：黄土坡面；细沟侵蚀；形态演变；坡面流速

中图分类号：S157　　**文献标识码：**A　　**doi：**10.13243/j.cnki.slxb.20170496

1　研究背景

在细沟侵蚀过程中，降雨-水沙输移-细沟形态演变组成了一个微型水文地貌系统[1-3]，此系统以降雨径流为主要驱动力，通过水沙运移和能量交换迫使细沟形态不断变化，进而深刻地影响坡面径流、入渗、泥沙输移和产流产沙过程[4-5]。在此过程中，细沟的发育加剧了水流与土体间的互反馈作用，使其非线性特征更加突出，坡面流速分布将发生改变[6-8]，而坡面流速的变化直接影响着土壤的剥离、搬运和沉积等侵蚀动力过程[9-11]，对细沟侵蚀过程及其形态发育起决定作用，是土壤侵蚀机理研究的基础[12-13]。然而现有研究成果对细沟水流速度分布特征的研究多是基于定床试验，对细沟形态演变条件下坡面产汇流及其流速变化特征还缺乏深入研究。且细沟水流为非恒定非均匀沿程变量流，流动形态千变万化，关于坡面径流速度的研究大多是针对整个坡面的平均情况，其在坡面侵蚀过程中的时空分异规律如何，目前尚不清楚。鉴于此，本文采用坡面水蚀精细模拟控制试验，并引入三维激光微地形扫描技术，跟踪细沟发育的全过程，研究细沟形态连续演变过程中细沟间坡面流和细沟流动态分布，通过分析不同细沟发育阶段细沟间及细沟内水流流速分布特征，探究细沟侵蚀及形态与坡面流速变化特征的关系，进而辨识坡面细沟形态发育的作用机理，为坡面侵蚀预报模型的构建提供理论依据。

2　试验材料及设计

2.1　试验材料　试验在位于郑州模型黄河基地的水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室降

收稿日期：2017-05-24；网络出版日期：2017-10-30

网络出版地址：http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1882.TV.20171030.1038.008.html

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(1982-)，女，河南洛阳人，博士，高级工程师，从事土壤侵蚀与泥沙运动研究。E-mail：zpyrcc@163.com

通讯作者：姚文艺(1957-)，男，河南周口人，博士，教授级高级工程师，主要从事土壤侵蚀与水土保持、河流泥沙等研究。E-mail：wyyao@yrihr.com.cn

雨大厅内进行。坡面实体模型采用规格为 5 m × 1 m × 0.6 m(长×宽×高)的可调坡度土槽，可调坡度范围在 0 ~ 30° 之间，土槽底设有直径为 5 mm 的透水孔，以保证土壤水自由入渗。人工模拟降雨系统由压力管道和下喷式模拟降雨器组成，每组降雨器上配备 5 个不同大小的喷头，喷头喷洒雨滴的直径范围在 0 ~ 3 mm，通过计算机控制系统，可以模拟 30 ~ 180 mm/h 的降雨强度，喷头距地面 22 m，可使 95% 以上的雨滴终速达到天然降雨终速。试验用土采用黄土高原第 Ⅲ 副区的河南省巩义市邙山表层黄土，邙山属典型的黄土丘陵沟壑区，位于黄土高原末端，以梁峁为主，局部有残塬，地形支离破碎，沟壑纵横，土壤质地为沙壤土，土质疏松，透气性好。该区域土地利用率较低，农耕地主要分布于塬面、缓坡地、梁峁顶及部分台地上，大面积的荒山荒坡未开发利用，本次取土位置为农耕地去除枯枝落叶层后坡面地表 20 cm 以内的黄土。土壤颗粒机械组成见表 1。

表 1　试验土壤的颗粒机械组成

土壤类型	土壤质地	粒径组成		
		0.005 ~ 0.01 mm	0.01 ~ 0.05 mm	>0.05 mm
黄褐土	沙壤土	43.40 %	35.45 %	21.15 %

2.2　试验设计　试验前将风干土样过直径为 10 mm 的筛，以去除杂草和石块。坡面模型制作时，首先在土槽底部铺一层厚约 10 cm 的粗砂，以保证土壤的透水性。装土时采用分层填土、分层压实、随机测容重的方法，每层填土厚度约为 10 cm，每完成一层填土，用环刀随机取 5 个不同部位土样进行容重测定，以保证土壤容重的均一性，根据对黄土坡耕地和撂荒地的野外调查结果，控制土壤容重在 1.25 g/cm^3 左右，使其和自然状态下耕地表层的土壤容重相当。为控制土壤前期含水量一致，试验前一天，用不会形成侵蚀的 30 mm/h 雨强的小雨对土槽进行预降雨，直至坡面开始产流为止，静置 24 h 以备试验，试验开始前再进行一次含水量测定，土壤前期含水量约为 30% ~ 35%。

依据黄土高原野外坡面空间特征，试验在 20° 裸坡条件下进行，以模拟陡坡侵蚀过程。参照黄土高原侵蚀性降雨及其暴雨频率特征，试验选定降雨强度为 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。试验雨强通过压强与喷头组合率定得到，为保证降雨均匀度和降雨强度达到试验设计水平，试验开始之前，先进行雨强率定。进行率定的操作时，在试验土槽的左右两边放置 6 个雨量桶，将其均匀布置在坡面的上、中、下三个部位，降雨开始 10 min 后测定各雨量筒内的雨量，率定雨强，计算其平均值，根据所测结果，调整模拟降雨系统管道压力、喷头尺寸等，并重新率定。如此反复进行，直至符合设计水平并连续 3 次率定结果的误差不超过 5%，经测定实际降雨强度分别为 66、94、127 mm/h，雨强均匀性 > 90%。降雨历时根据试验过程中细沟发育情况而定，当坡面发生沟壁滑塌，坡面下部逐渐出现浅沟，遂停止降雨，试验结束。

试验过程中，将三维激光地形扫描仪安装于土槽正上方的降雨系统压力管道上，对地形变化进行动态监测，获取实时坡面 DEM；流速测量分细沟间坡面流和细沟流分别进行，采用染色剂示踪($KMnO_4$)和实时摄像技术相结合的方法，将坡面从上到下依次划分为 5 个断面，每个断面间距为 1 m、坡长为 5 m 的土槽从坡顶至坡脚分别在距坡顶 1、2、3、4 和 5 m，在各断面上方 20 cm 范围内依次循环测量，通过记录水流通过一定长度(20 cm)的时间，计算得到流速；当坡面开始产流时，每隔 1 ~ 2 min 用径流桶在集流槽处收集径流泥沙样，用烘干法推求坡面产沙量及径流含沙量；用高清摄像机对试验过程进行全程监测，并辅助人工记录关键节点信息，如流速测量位置、产流开始时间、跌坎出现时间等。用染色剂法测得的流速为水流表面的最大速度，不是表层水流的平均流速，根据以往研究结果，将表面流速乘以修正系数 0.75 作为该断面的平均流速值[14]。

3　试验结果与分析

3.1　细沟形态演变过程　图 1 为高精度相机拍摄的坡面细沟形态演变过程，图中所示为 94 mm/h 雨强下产流开始 8、12、16、24、29、34、39、45、52 min 时的坡面细沟形态。从细沟形态演变过程来

看，细沟的发育经历了跌坎—连续跌坎—断续细沟—连续细沟的演变过程，跌坎的出现是细沟发育开始的标志，其发生位置通常在坡面的中下部，跌坎随着侵蚀的发展会逐渐演变成下切沟头，下切沟头的溯源侵蚀和随之而来的沟壁崩塌，使其发展成为断续细沟[15]。随着侵蚀的继续发展，伴随着沟头前进、沟壁坍塌、沟床下切，断续沟网相互贯通并继续扩张，逐渐演变为完整的细沟网络。

由细沟形态演变过程(图1)，可将细沟发育过程划分为跌坎形成、细沟形成、细沟发育、沟网形成、沟网调整等几个阶段。坡面自降雨开始3 min后开始产流，此时产沙量较少，径流含沙量约为0.03 g/ml，坡面侵蚀方式以雨滴溅蚀为主。当降雨持续至第5 min，随着土壤含水率的增加，下渗作用减弱，坡面漫流开始形成，面流的出现削弱了雨滴对坡面的打击作用，侵蚀方式开始由溅蚀向面蚀转化，径流含沙量逐渐增大，约为0.05 g/ml。在降雨持续约8 min时，由于坡面初始地形导致的能量分布不均，面蚀的不平衡加剧，坡面径流由面流逐渐汇聚形成集中股流，集中股流使侵蚀能量汇聚并不断冲刷土体，被带走的土体在坡面上形成跌坎，这一现象标志着细沟侵蚀的开始，此时径流含沙量约为0.11 g/ml。在降雨持续约16 min后，沿坡面逐渐形成许多小的跌坎链，细沟雏形开始显现。此后，在水流的继续冲刷掏蚀下，细沟不断发育，汇流能量增加，在溯源侵蚀作用下跌坎链逐渐形成断续细沟。随着降雨的继续，在降雨持续约29 min后，沟头溯源和沟底下切加剧，细沟边壁不断崩塌，断续细沟间的分水岭被逐渐侵蚀，贯通形成树枝状连续细沟网络，此时细沟发育进入沟网形成阶段，这一阶段径流含沙量急剧增加，达0.3 g/ml。在降雨持续约45 min后，连续输沙通道基本形成，在水流冲刷作用下沟床继续下切，沟网汇流加剧，细沟网络发育趋于成熟，沟网进入调整阶段，这一阶段径流含沙量趋于稳定，在0.38 g/ml上下振荡。径流含沙量变化过程见图2。

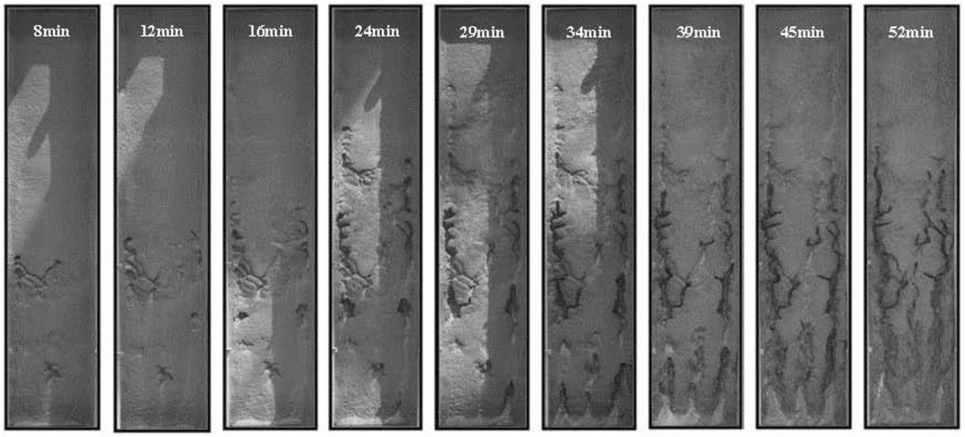


图1　坡面细沟形态演变过程

3.2　细沟演变过程中流速分布特征　图3所示为94 mm/h雨强下，坡面细沟不同发育演变阶段的细沟间流速及细沟内流速分布图。坡面自上而下划分为5个断面，图中标示出了每个断面细沟间的平均流速及细沟发育过程中关键位置的细沟流速。

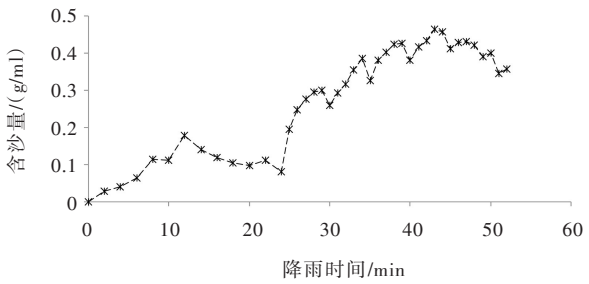


图2　94 mm/h雨强下径流含沙量变化过程

从细沟间坡面流速分布可见，不同细沟发育阶段的细沟间流速变化规律基本一致，坡面上段流速最小，不足0.1 m/s，中段流速略有增加，为0.1～0.2 m/s，坡面下段流速增加迅速，可达0.5 m/s。这是由于坡面上段集雨能力较小，随着坡长的增加集雨面积增大，集雨能力随之增大，导致汇流能量增加，坡面流速增大。从细沟的发育过程看，跌坎的发生多始于断面2～4之间，位于坡面的中下部，此时的坡面流速约为1.5～2.5 m/s，这说明跌坎的发生需要有一定的坡面流速，尤其在坡面流速达2.0 m/s左右时，最易产生跌坎。

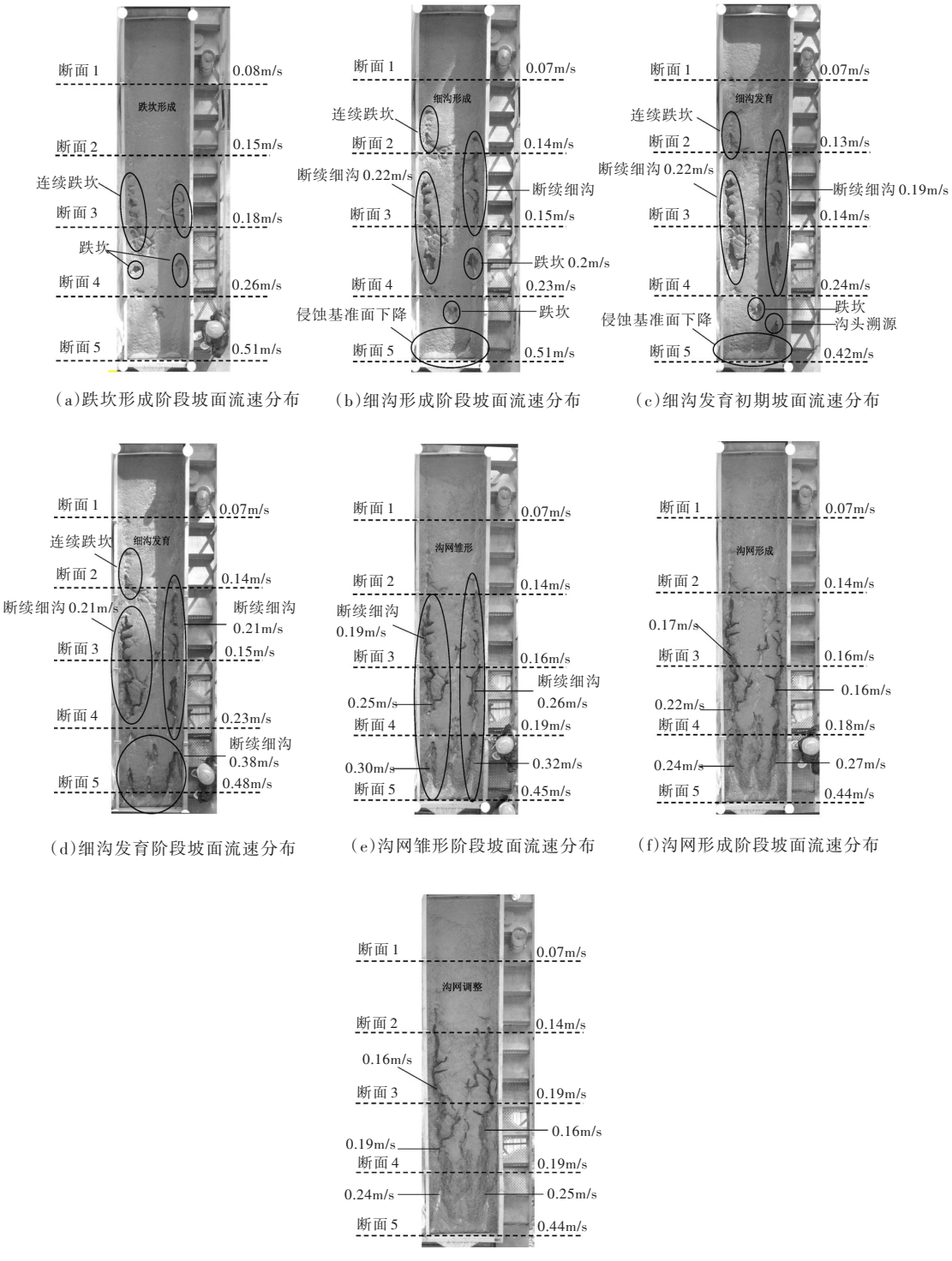
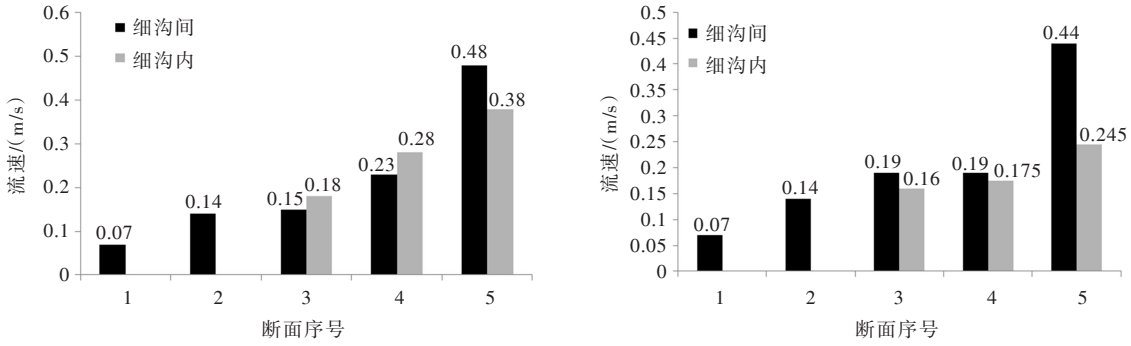


图 3　细沟不同发育阶段坡面流速分布

从不同细沟发育阶段细沟内流速分布可见，细沟内流速随细沟形态发育阶段的不同而存在差异。同时随着侵蚀基准面的变化，溯源侵蚀的发展速率随之改变，对细沟形态产生重要影响。在细沟形成和发育阶段(图 3(a)—(d))，细沟流速是细沟间流速的 1.2 ~ 1.5 倍，随着细沟发育的进一步加剧，细沟内流速逐渐减小，直至沟网调整阶段(图 3(g))，相同位置的细沟内流速普遍低于细沟形成和发育阶段，是细沟间流速 0.7 ~ 1.0 倍。分析其原因，在细沟形成和发育阶段，有细沟发育的坡段细沟间径流大部分汇入细沟内，沟内径流集中流速加快，细沟间水层厚度小，阻力大，因而细沟间流速较细沟内

慢；在沟网形成和调整的阶段中，坡面细沟密度加大，细沟间面积被形成的细沟网络割裂，汇流面积减小，由于细沟不断地出现沟壁坍塌进而展宽，细沟内水流流路曲折蜿蜒，沟床形态阻力增大，且细沟沟底存在多处跌坎，从一定程度上削减了细沟内水流能量，因此细沟内流速呈减小趋势(图4)。



(a)细沟发育阶段坡面流速对比　　(b)细沟调整阶段坡面流速对比

图4　细沟发育及调整阶段坡面流速对比

以上分析表明，细沟侵蚀过程中，细沟内水流流速与细沟发育过程之间存在相互影响，水流速度通过水沙运移和能量交换迫使细沟形态不断变化，变化的细沟形态又反作用于细沟内水流速度分布，从而形成一种互馈关系[16]。一方面，坡面漫流向集中股流的转化促使细沟发育，导致细沟内流速的增加；另一方面，沟床对细沟流的阻碍作用也在增加，有可能抵消或超越径流集中产生的流速增量。二者间相互制约，互为消长，影响着细沟内水流速度。

3.3　细沟形态特征与水流速度的关系　通过对细沟形态发育过程中坡面流速变化特征分析，发现黄土细沟形态演变过程对细沟流速有较大影响，二者存在明显的对应关系，说明细沟的形成和发展直接影响坡面水力学特性。为定量研究细沟形态与坡面流速间的相关程度，首先对细沟形态进行量化描述。根据细沟形态发育特点，选取分形维数和密度描述细沟沟网的复杂程度，用坡面地貌信息熵描述坡面地形的发育程度，用结点数和分叉比描述细沟网络的拓扑结构。其数学表达式为：

分形维数

$$N = Cr^{-D_f} \tag{1}$$

式中：r 为尺度；N 为与 r 有关的物体数目；D_f 为分形盒维数；C 为常数。

细沟密度

$$\rho = \sum_{j=1}^{n} L_{tj} \Big/ A_0 \tag{2}$$

式中：A_0 为试验小区的面积，m^2；L_{tj} 为细沟的总长度，m，j=1，…，n 代表研究区域中的细沟数目。

坡面地貌信息熵

$$H = S - \ln S - 1 = \int_0^1 f(x)\mathrm{d}x - \ln\left[\int_0^1 f(x)\mathrm{d}x\right] - 1 \tag{3}$$

式中：H 为地貌信息熵；S 为 Strahler 面积-高程积分值；$f(x)$ 为 Strahler 面积-高程积分曲线。

细沟形态特征的提取及量化参数的计算，是在三维激光地形扫描获取的坡面 DEM 基础上，借助 ArcGIS 的空间分析功能实现的，具体计算方法及步骤详见参考文献[17-18]。

以上形态参数分别从分形特征、熵、拓扑特征等几方面表达了细沟形态的复杂性，为定量研究细沟形态与流速分布的相关性，需要进行相关分析，判定不同形态量化参数对细沟内流速分布的敏感程度。统计数据采用流速测量数据及与之相对应的地形扫描数据，包括模拟试验中获取的 66、94 和 127 mm/h 雨强下的 15 组细沟流速平均值(V)、细沟网络分形维数(D_f)、密度(d)、坡面地貌信息熵(H)、合并结点数(N)和分叉比(R_b)等数据，运用 SPSS 软件，依据表2中的统计参数，利用 Pearson

表2　参数描述性统计分析

	最大值	最小值	平均值	*SD*	*n*
V	0.34	0.18	0.25	0.053	15
D_f	1.238	1.186	1.209	0.015	15
H	0.299	0.214	0.245	0.026	15
N	68	25	42.67	12.816	15
R_b	7.17	4.12	5.34	1.004	15
d	6.40	2.31	4.33	1.229	15

表3　细沟流速与形态量化参数间的相关系数矩阵

	V	D_f	*H*	*N*	R_b	*d*
V	1.000	−0.063	0.503*	−0.299	0.847**	−0.528*
D_f		1.000	0.435	0.821**	0.097	0.721**
H			1.000	0.459	0.624*	0.349
N				1.000	0.065	0.861**
R_b					1.000	0.232
d						1.000

注：显著性：*$p \leqslant 0.05$，**$p \leqslant 0.01$，***$p \leqslant 0.001$

相关分析法分析细沟形态量化参数与细沟流速的相关关系。

细沟流速与细沟形态量化参数的关系见表3，细沟流速与坡面地貌信息熵、细沟网络分叉比为正相关关系，且相关系数分别为 0.503 和 0.847，呈较显著相关和显著相关；与细沟密度为负相关关系，相关系数为 −0.528，呈较显著相关。说明坡面细沟形态随着降雨的持续不断发展，会导致细沟流速做出相应调整，细沟形态与细沟流速之间存在一定的相关关系。

与坡面细沟流速关联性最为密切的形态量化参数为细沟网络分叉比，其次为细沟密度和坡面地貌信息熵，关联度的排序依次为：$R_b > d > H$。上述结果表明，针对不同的形态特征参数，细沟水流流速的响应程度各不相同，细沟分叉比是表征细沟流速变化的最佳形态参数，细沟密度和坡面地貌信息熵次之，其余各形态参数对细沟流速变化的表达较弱。

4　结论

本文通过分析细沟形态演变对坡面水流速度变化过程的影响，阐明了细沟形成和发展过程中坡面流速变化规律，初步揭示了细沟形态变化与坡面流速间的互反馈作用，取得主要结论如下：(1)细沟间流速变化规律在不同细沟发育阶段基本一致，20° 黄土陡坡坡面在 94 mm/h 雨强下，坡面上段流速最小，不足 0.1 m/s，中段流速略有增加，约为 0.1 ~ 0.2 m/s，坡面下段流速增加迅速，可达 0.5 m/s，流速的改变与坡面汇流能力的变化有关，且在坡面流速达 2.0 m/s 左右时，最易产生跌坎。(2)细沟内水流流速与细沟发育过程之间存在互馈关系，首先坡面漫流向集中股流的转化促使细沟发育，会导致细沟内流速的增加，但随着细沟的进一步发展，汇流面积减小，沟床形态阻力及沟底跌坎消能作用增大，细沟流速又会逐渐减小，沟床形态阻力与径流集中产生的流速增量二者间的相互对比关系影响着细沟内水流速度。(3)细沟形态演变特征参数与细沟水流速度的相关分析表明，黄土细沟形态演变过程对细沟流速有较大影响，且细沟水流速度对不同形态特征参数的响应程度各不相同，关联度的排序依次为：$R_b > d > H$。

参　考　文　献：

[1] 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 .

[2] 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 .

[3] 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 .

[4] BRUNTON D A, BRYAN R B . Rill network development and sediment budgets[J] . Earth Surface Processes and Landforms, 2000, 25: 783-800 .

[5] GOVINDARAJU R S, KAVVAS M L . A spectral approach for analyzing the rill structure over hillslopes . Part 2.

Application[J]. Journal of Hydrology, 1994, 158: 349-362.
[6] OWOPUTI L O, STOLTE W J. Soil detachment in the physically based soil erosion process: a review[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38: 1099-1110.
[7] 郑粉莉, 康绍忠. 黄土坡面不同侵蚀带侵蚀产沙关系及其机理[J]. 地理学报, 1998, 53(5): 422-428.
[8] 陈力, 刘青泉, 李家春. 坡面细沟侵蚀的冲刷试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 2005, 20(6): 761-766.
[9] 夏卫生, 雷廷武, 刘春平, 等. 降雨条件下坡面薄层水流速度特征[J]. 水利学报, 2004(11): 119-123.
[10] 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.
[11] 和继军, 吕烨, 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.
[12] 姚文艺, 肖培青, 申震洲, 等. 坡面产流过程及产沙临界对立地条件的响应关系[J]. 水利学报, 2011, 42(12): 1438-1444.
[13] 雷廷武, NEARING M A. 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(11): 49-54.
[14] 李占斌, 秦百顺, 亢伟, 等. 陡坡面发育的细沟水动力学特性室内试验研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(6): 64-68.
[15] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1): 36-48.
[16] GIMENEZ R, GOVERS G. Interaction between bed roughness and flow hydraulics in eroding rills[J]. Water Resources Research, 2001, 37(3), 791-799.
[17] 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.
[18] ZHANG P, TANG H W, YAO W Y, et al. Experimental investigation of morphological characteristics of rill evolution on loess slope[J]. Catena, 2016(137): 1131-1134.

Experimental study of the velocity profile of rill in the loess region

ZHANG Pan[1], YAO Wenyi[1], WEI Guanju[2], XIAO Peiqing[1]

(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. *College of Water Resources and Electric Power, Qinghai University, Xining* 810016, *China*)

Abstract: The flow velocity distribution under the condition of steep slope (20°) is studied by using the method of indoor fine simulated rainfall experiment. Through the observation and analysis of the rill morphology evolution and the overland flow velocity during the experiment, the variation rule of the flow velocity during the rill formation and development was studied. The results show that the overland flow velocity between the rills is not affected by the degree of rill development, but there is a relationship between the flow velocity within the rill and the rill development. First, the emergence of the rill will lead to an increase of runoff in the rill, but with the rill development, the confluence area decreases, the rill bed morphological resistance increases, resulting in the gradual decrease of the rill flow velocity. The reciprocal contrast between the rill bed morphological resistance and the flow velocity increment caused by runoff concentration affects the flow velocity in the rill.

Keywords: loess slope; rill erosion; morphology evolution; overland flow velocity

(责任编辑: 祁 伟)