

# 坡面细沟发育特征及其对流速分布的影响<sup>\*</sup>

和继军<sup>1,2†</sup> 孙莉英<sup>2,3</sup> 蔡强国<sup>3</sup> 张燕翔<sup>1</sup>

(1 首都师范大学初等教育学院城市环境过程与数字模拟国家重点实验室培育基地, 教育部三维信息获取与应用重点实验室, 北京 100048)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100)

(3 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

**摘要** 利用模拟降雨试验, 采用 2 个雨强 ( $1.5 \text{ mm min}^{-1}$ ,  $2.0 \text{ mm min}^{-1}$ ), 4 个坡度 ( $10^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $25^\circ$ ), 对杨凌塬土细沟发育的特征及其坡面流速分布规律进行了研究。结果表明, 坡度增加会造成细沟溯源侵蚀及下切侵蚀的加剧, 但随着坡度的增加, 总侵蚀量的增幅趋于平缓, 暗示可能存在坡面侵蚀量由强转弱的临界坡度。坡度与各侵蚀指标间均表现出极显著的相关性, 说明坡度是影响细沟发育的主要因素, 细沟侵蚀量与总侵蚀量也表现为极显著的相关性, 相关系数高达 0.97, 说明坡面侵蚀加剧主要由细沟侵蚀引起。坡面流速、细沟间及细沟流速与距坡顶距离有较好的正相关关系, 雨强增加会加剧这种趋势的波动性, 同时坡度对坡面、细沟间及细沟流速的影响不大, 且各流速间也没有明显的大小关系, 这与一般认为的细沟流速高于细沟间流速的观点不同, 这也是今后试验过程中需要进一步验证的部分。

**关键词** 细沟侵蚀; 坡度; 雨强; 流速

**中图分类号** S157.1 **文献标识码** A

细沟是发育在坡耕地上一种常见的微地貌形态, 由于每次耕作即被填平, 因此往往容易被忽视, 但是近几十年的研究表明, 细沟侵蚀是坡面水蚀的重要过程以及小流域泥沙的重要来源, 并对流域坡面地貌的发育和演化具有重要的潜在作用<sup>[1]</sup>。细沟侵蚀远大于雨滴打击形成的溅蚀和坡面薄层流引起的片蚀, 例如, 陕北子洲径流试验站 1963 - 1967 年对地面坡度  $22^\circ$ , 坡长 60 m 的小区观测表明, 每年有 45% ~ 60% 的产流降雨会形成细沟, 细沟侵蚀量为小区总侵蚀量的 68% ~ 91%<sup>[2]</sup>。其他大量研究也证明, 坡面细沟产生后, 坡面产沙会增加几倍甚至几十倍<sup>[3-5]</sup>。

准确表征细沟发育的形态特征是认识细沟侵蚀的基础, 在这方面很多学者做了大量的努力, 一般认为坡面跌坑的大量形成和连通是细沟发生的标志<sup>[6-7]</sup>。同时, 由于细沟发育过程的复杂性和随机性, 很难绝对准确定义细沟形态特征, 多采用统计意义上的平均值来描述, 吴普特等<sup>[8]</sup>采用 REE 示

踪研究细沟在坡面的垂直分布特征, 提出了用细沟平面密度和细沟平均深度表征细沟侵蚀形态; 王协康和方铎<sup>[9]</sup>从水动力角度计算了细沟发育完全的形态特征, 进一步提出细沟密度分析坡地土壤侵蚀程度; 雷廷武和 Nearing<sup>[10]</sup>通过测量细沟宽度沿沟长的分布规律对细沟侵蚀特点及形态特征进行了研究; 霍云云等<sup>[11]</sup>在坡度相同条件下, 选取细沟平均沟深、平均沟宽、平均密度和最长沟长等指标, 对细沟侵蚀过程进行了描述。但是这些研究多是在单一坡度或较缓坡度范围内进行的, 选取的指标也相对较少, 无法系统表征复杂的细沟侵蚀特征。

细沟出现后, 坡面侵蚀强度之所以会增大, 主要原因在于水流的流动特征和侵蚀动力发生了本质的改变。当坡面出现细沟后, 水流由面状的薄层水流变为线状水流或股流, 流速、水深相应增加, 侵蚀动力增强。由此看来, 径流流速是坡面流重要的水动力学特征, 许多学者对其进行了大量研究, Rauws<sup>[12]</sup>的数据表明, 在粗糙的表面上流速随坡度增加

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金面上项目(41271304)、国家自然科学基金重点项目(41130744)、黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金项目(10501-1220)资助

<sup>†</sup> 通讯作者: E-mail: hejiun\_200018@163.com

作者简介: 和继军(1979—), 男, 汉族, 河北邢台人, 博士, 副教授, 主要从事土壤侵蚀、流域侵蚀产沙模拟等方面研究。E-mail: hejiun\_200018@163.com

收稿日期: 2012-10-11; 收到修改稿日期: 2013-04-24

而增加,但增加的程度不如光滑的表面;关于坡度与流速的关系,目前仍存在较大争议,国外学者 Foster 等<sup>[13]</sup>及 Abrahams 等<sup>[14]</sup>的细沟试验表明,流速随坡度增加;然而, Govers<sup>[15]</sup>的研究表明,对于一条侵蚀细沟而言,流速不受沟坡影响,坡度大时侵蚀增加,相应地土壤表面糙度增加,从而流速并不增大, Nearing 等<sup>[16]</sup>也得出了相同的结论。我国学者张科利<sup>[17]</sup>研究认为,坡度越大,流速增大程度越大,径流深减小变化也越大;张光辉<sup>[4]</sup>的模拟试验结果表明,可用流量和坡度的线性函数或幂函数来准确模拟坡面流平均流速,但坡度对流速的影响不显著。与此同时,大部分研究表明,距坡顶的距离对坡面流速沿程分布有较大影响,一般认为距坡顶距离越远,流速越大<sup>[18-19]</sup>,但也有研究表明,流速并非按照从坡顶至坡底呈正比例增加或减小,而是出现一定的波动性<sup>[20]</sup>。

鉴于以上所述,本文针对细沟发育的复杂性问题,以及坡面流速与坡度的关系尚不统一的研究现状,引入高精度三维扫描技术,在改变雨强和改变坡度条件下,选取适当的细沟侵蚀参数,对坡面细沟发育特征以及细沟发育过程中的坡面水流速度变化规律进行研究,旨在深入揭示细沟侵蚀机理方

面有所进步。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

试验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,使用规格 5 m × 1 m × 0.5 m (长 × 宽 × 高) 移动式可调坡钢制土槽。试验降雨方式为下喷式降雨系统,降雨高度 18 m,能够保证所有雨滴均达到最终速度,降雨覆盖面积为 27 m × 18 m,试验用水为纯净水,采用纯净水进行室内模拟降雨试验的方法已在国际上得到广泛应用,这样可以消除水源本身的差异,适于相关研究结论的对比。降雨系统将水喷射至空中,受空气阻力作用水流破碎形成不同大小的雨滴,降落至地表,产生的雨滴有大有小,与天然降雨下的雨滴比较相似。试验采用杨凌的壤土,取自于当地坡耕地表层。壤土主要分布在关中平原,上层为人工堆垫层,它是人为长期早耕熟化,施入土粪或富含有机质的农家肥而形成的,有机质含量较高,下层是原来的黄土。壤土的主要理化性质见表 1。

表 1 壤土主要理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of experimental soil

土壤类型 Soil types	粒径组成 Mechanical composition (%)					饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity (mm h <sup>-1</sup> )	>0.25 水稳定 团聚体百分比 Percentage of water-stable aggregates (%)
	<0.002 mm	≥0.002 ~ 0.02 mm	≥0.02 ~ 0.05 mm	≥0.05 ~ 0.25 mm	≥0.25 mm		
壤土 Lou soil	26.06	36.55	27.92	4.25	5.22	11.2	6.44

### 1.2 试验设计

试验前将土样自然风干过 10 mm 筛,以除去杂草和石块。试验钢槽底部填入 10 cm 厚的细沙,并在细沙上铺设透水的细纱布,保持试验土层的透水状况接近于天然坡面。然后填入试验用土。装土时采用分层填土法,边填土边压实,每次装土 5 cm,总共填土厚度为 30 cm,壤土的填土容重控制在 1.1 g cm<sup>-3</sup> 左右,使其和采样地耕地表层土体自然状态下的情况相当。为了尽量削弱边坡效应的影响,装土时在隔板处尽量压实,装土结束后,用平尺刮平土壤表面,并平行放置在降雨区以备试验。试验采用 4 个坡度等级(10°、15°、20°和 25°),每个坡度分别在 2 个雨强(1.5 和 2.0 mm min<sup>-1</sup>) 下进行降雨试

验,为使最终降雨量相等,相应降雨历时分别为 60 min 和 45 min。

### 1.3 观测项目

径流量和含沙量:坡面产流后在出水口收集泥沙和径流样品,泥沙采样器容积为 1 000 mL,采样间隔为 1 min 次<sup>-1</sup>,含沙量采用烘干法测定,径流量则采用自制大量桶测量体积(为 1 min 内的产流量),加上泥沙样值,即为该时段总径流量,总径流量乘以该时段含沙量即可得到该时段的总侵蚀量。试验前后采用环刀法测定坡面土壤容重和含水率。

流速:待坡面水流稳定后,用颜色示踪法(KMnO<sub>4</sub> 溶液)测量坡面径流流速,流速主要包括 3 部分内容,完整细沟形成前的坡面径流流速(简称坡面

流速)、细沟形成后的沟内径流流速(简称细沟流速)和细沟相应位置的细沟间径流流速(简称细沟间流速)。测量时,从坡面底端的坡段开始,依次往上坡进行,这样可避免上坡的  $\text{KMnO}_4$  残留溶液干扰对下坡的观察,即依次连续循环测量土槽坡面距坡顶 4、3、2 和 1 m 处 4 个位置的水流流速。

坡面微地形数据:试验前后采用三维激光扫描仪(Scanstation2)对坡面微地形数据进行扫描,有效扫描距离 300 m,表面扫描精度 1~2 mm,可以精确确定细沟的形态特征(长度、宽度、深度等),据此可以精确计算细沟侵蚀量。其中三维扫描数据中,25°坡度  $2 \text{ mm min}^{-1}$  雨强时的试验为本试验中的首场降雨,由于中途停电,实际降雨历时为 32 min,小于设计时间 45 min;实际采集到的三维激光扫描数据主要包括壤土  $1.5 \text{ mm min}^{-1}$  雨强时的 4 个坡度数据(10°、15°、20°和 25°)和  $2.0 \text{ mm min}^{-1}$  雨强时的 3 个坡度数据(10°、20°和 25°)。

## 1.4 数据处理

采用 Cyclone 软件对扫描所得土槽 DEM 数据进行去噪等初始处理,从而得到去除无效点后的完整坡面 DEM;之后采用 ArcGIS 软件将降雨后扫描结果 B 与初始扫描结果 A 进行对比,获取坡面各点的坐标高程差数据 C 即  $C = A - B$ ;同时采用 ArcGIS 软件提取细沟沟长、沟宽、沟深和细沟的体积,并以此可以计算细沟侵蚀其他方面的特征参数<sup>[21]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 降雨及坡度与细沟侵蚀的关系

所统计的细沟侵蚀特征参数的类型及结果如表 2 和表 3。同时,通过对比三维激光扫描仪计算出的侵蚀总量和出水口实测侵蚀总量,发现两者误差范围为 7%~15%,由此说明三维激光扫描仪的精度及测量得出的数据是可靠的。

表 2 坡面细沟侵蚀的基本特征

Table 2 Basic characteristics of rill erosion on slope

降雨强度 Rainfall intensity ( $\text{mm min}^{-1}$ )	坡度 Slope gradient (°)	细沟总长 Total rill length (m)	坡面细沟 密度 Rill density ( $\text{m m}^{-2}$ )	平均沟深 Mean rill depth (cm)	最长沟长 Maximal rill length (m)	最大沟深 Maximal rill depth (cm)	平均沟宽 Mean rill width (cm)	细沟 宽深比 Rill width- depth ratio	细沟 侵蚀量 Rill erosion amount (kg)	总侵蚀量 Total erosion amount (kg)	细沟侵蚀 量占比例 Proportion of rill erosion to total erosion(%)
1.5	10	17.74	3.55	3.9	4.10	6.4	2.4	0.62	17.63	46.31	38.06
	15	16.46	3.29	4.3	3.80	9.4	2.5	0.58	17.61	48.23	36.51
	20	24.47	4.89	6.1	4.11	10.2	1.9	0.31	30.49	63.44	48.06
	25	34.46	6.89	6.4	4.85	12.5	1.6	0.25	38.92	63.51	61.29
2.0	10	16.65	3.33	2.9	3.36	4.1	2.1	0.72	11.76	35.02	33.58
	15	—	—	—	—	—	—	—	—	69.67	—
	20	36.40	7.28	6.2	4.38	10.9	1.9	0.31	47.68	97.12	49.09
	25	37.84	7.57	6.6	4.76	8.1	1.9	0.29	56.40	107.03	52.69

注:“—”表示没有数据 Note:“—” indicates no data.

由表 2 可知,在相同雨强下,坡面细沟总长度、细沟密度、平均沟深、最长沟长、最大沟深、细沟侵蚀量及占总侵蚀量的比例和总侵蚀量随坡度变化的总体趋势是同步增加,而平均沟宽和细沟宽深比则随坡度增加相应减小。从表 2 中还可以看出,从所统计细沟侵蚀的绝大部分参数来看,10°和 15°时变化较小,超过 15°后有较快的变化,1.5 mm 雨强时尤为明显。从不同坡度下的细沟侵蚀量及所占比例来看,对于小雨强,坡度对侵蚀量的影响,主要通过影响细沟发育的长度来起作用,且坡度增加会导致细沟侵蚀所占比例较快增加;对于大雨强,坡

度对侵蚀量的影响,主要通过影响细沟发育的深度起作用,但坡度增加所导致的细沟侵蚀量所占比例的增加速度有所减弱。总体来看,大雨强大坡度是细沟侵蚀的关键因素。从总侵蚀量来看,当雨强为 1.5 mm 时,20°和 25°的侵蚀量几乎相等,而对于 2.0 mm 雨强,尽管 25°时降雨过程只有 32 min(其他几场降雨历时为 45 min),但是细沟侵蚀量和总侵蚀量均明显高于 20°,由此本文推断,在学术界一直讨论的临界坡度并不是一个确定的数值,它可能随降雨强度、降雨量、汇水面积及土壤性质的变化而变化,尤其与降雨强度密切相关,当其他条件相

同时,随着雨强的增大,小雨强时出现的临界坡度可能相应增加或不出现<sup>[22]</sup>。

同时,统计了坡面发育细沟的条数、节点数量和最长细沟距坡面顶部的距离。从数据显示来看(表3),当雨强相同时,上述统计指标均与坡度呈正比关系,说明坡度变陡会使坡面发生细沟的频率显著增加,且细沟的溯源侵蚀也会加剧,或者细沟发生所需的汇水面积会缩小,且会使坡面细沟之间相互连通,致使坡面的破碎度加剧;当坡度相同时,上述统计指标随雨强变化也有类似关系。增加雨强不仅加大雨滴对表层土壤的分散能力,还会增加地表径流,从而提高径流对土壤表层的冲刷能力和挟沙能力,最终促使坡面侵蚀量增加;相对而言,坡度增加对坡面侵蚀的影响较为复杂,增加坡度会降低坡面土壤的不稳定性,使土壤表层的分散土粒和径流沿坡面向下的分力增加,有利于坡面侵蚀的发生,但是坡度增加的同时,坡面的承雨面积也相应减少,致使径流量降低,抑制坡面侵蚀的发生,因此坡度和雨强的变化对坡面侵蚀发生存在此消彼长的作用。

表3 不同坡度细沟发育参数

Table 3 Data of rill evolution on slopes different in gradient

降雨强度 Rainfall intensity (mm min <sup>-1</sup> )	坡度 Slope gradient (°)	细沟节点 Rill node	细沟条数 Number of rills	最长细沟距坡顶距离 Distance of the longest rill from the top of the slope (m)
1.5	10	5	8	1.43
	15	6	13	1.14
	20	13	18	0.92
	25	22	30	0.83
2.0	10	5	10	1.34
	20	18	36	0.69
	25	24	40	0.65

注:几条细沟相交点为细沟节点;2个相邻细沟节点间为一条细沟  
Note: node is the intersection point of rill and the part between two near nodes is called a rill

## 2.2 细沟侵蚀各指标间的相关性

鉴于以上分析,结合表2和表3中的数据,考虑到数据之间的联系,选取了坡度、雨强、坡面细沟密度、细沟宽深比、细沟侵蚀量、总侵蚀量、细沟节点、细沟条数和最长细沟距坡顶的距离等指标,进行相关分析,分析结果如表4。

表4 细沟侵蚀各指标间的相关性

Table 4 Correlations between various indices of rill erosion

项目 Items	降雨强度 Rainfall intensity	坡度 Slope gradient	坡面细沟 密度 Rill density	细沟宽深 比 Rill width- depth ratio	细沟侵蚀 量 Rill erosion amount	总侵蚀量 Total erosion amount	细沟侵蚀 量占比例 Proportion of rill erosion to total erosion	细沟节点 Rill node	细沟条数 Number of rills	最长细沟 距坡顶距离 Distance of the longest rill from the top of the slope
降雨强度 Rainfall intensity	1									
坡度 Slope gradient	0.00	1								
坡面细沟密度 Rill density	0.39	0.89 **	1							
细沟宽深比 Rill width-depth ratio	0.00	-0.95 **	-0.89 **	1						
细沟侵蚀量 Rill erosion amount	0.39	0.88 **	0.97 **	-0.88 **	1					
总侵蚀量 Total erosion amount	0.47	0.75 *	0.90 **	-0.78 *	0.97 **	1				
细沟侵蚀量占比例 Proportion of rill erosion to total erosion	-0.05	0.93 **	0.88 **	-0.94 **	0.81 *	0.64	1			
细沟节点 Rill node	0.27	0.96 **	0.97 **	-0.91 **	0.95 **	0.84 *	0.93 **	1		
细沟条数 Number of rill	0.47	0.88 **	0.98 **	-0.84 *	0.98 **	0.94 **	0.80 *	0.95 **	1	
最长细沟距坡顶距离 Distance of the longest rill from the top of the slope	-0.32	-0.93 **	-0.93 **	0.92 **	-0.94 **	-0.90 **	-0.81 *	-0.93 **	-0.95 **	1

\*\* 在 0.01 水平上极显著相关; \* 在 0.05 水平上显著相关 \*\* means significant correlation at  $p < 0.01$ ; \* means significant correlation at  $p < 0.05$

由表 4 可知,坡度与细沟侵蚀指标间均呈现出显著相关,且大部分表现为极显著相关,说明坡度在坡面细沟侵蚀中的重要作用,也证明了上述分析的合理性。同时,绝大部分所选细沟侵蚀指标之间也表现出显著或极显著的相关性,且相关系数很高,其中,细沟侵蚀量与总侵蚀量之间相关系数高达 0.97,这间接证明了细沟侵蚀是坡面侵蚀的主要组成部分,同时这些指标之间的密切关联性也说明它们可以作为表征细沟侵蚀严重程度的统计指标。但从相关分析结果来看,降雨强度与细沟侵蚀各指标之间的相关性较弱,这主要是由于雨强设置水平较少(只有两个水平)造成的,并不代表雨强对细沟侵蚀的真实影响,这也是后期试验需要补充和完善的地方。

### 2.3 细沟侵蚀对径流流速的影响

图 1 是两种雨强不同坡度不同坡段径流流速的分布统计结果,图 1a 为细沟侵蚀发生前或未发生细沟侵蚀坡段的径流流速(简称坡面流速),图 1b 为有细沟发生坡段的细沟间径流流速(简称细沟间流速),图 1c 为细沟内的径流流速(简称细沟流速)。

对于 1.5mm 雨强,各坡度下,随着距坡顶距离的增加,坡面流速增加趋势明显(图 1a),细沟间流速(图 1b)随距坡顶距离变化有相似的变化规律,但趋势没有坡面流速明显(10°和 15°在距离坡顶 1m 范围内均没有细沟发育)。首先,细沟发生前,随着坡段的下移,坡面径流量会不断增加,薄层水流的厚度也相应增加,使得地表的粗糙度对径流的阻碍效应降低,这有利于径流流速沿坡面下移不断增加,已有的研究表明,流量和流速关系十分密切,多呈幂函数增长<sup>[19]</sup>;其次,从径流从坡顶流向坡脚的过程来看,受重力沿坡面向下的分力作用使径流流速存在一个加速度,距离坡顶距离越大水流速度必然增加越多<sup>[23]</sup>。而一旦细沟发生,会使相当部分细沟间的径流汇入细沟内,细沟间的水流厚度会变的很小,影响到水流流速,同时由于细沟的边壁侵蚀或坍塌也会影响细沟间的地貌形态,改变近细沟附近的水流方向,这也会影响到沿坡面的细沟间流速的增加水平。因此,细沟间径流速度随距坡顶距离增加而增加趋势没有坡面流速增加明显。

从细沟流来看(图 1c),随着距坡顶距离变化的规律与细沟间流速类似,但有一定的波动性,不过整体仍符合距坡顶越远,速度越大的规律。分析原因,首先沿坡面向下,汇集到细沟内的径流量增大,

水深增厚,有利于细沟内水流速度的增加;同时细沟的形态相对细沟间更为复杂,细沟的弯曲程度、横断面的形状、边壁和细沟沟底的形态特征等均会使细沟内的径流流速变得复杂,如细沟底部的坡降并不是一致的,而是存在大量的跌坎,水流进入跌坎,流速就会减小,水流的方向也不再一致,随着深度不同,水流会流向下游或上游方向,流出跌坎后又逐渐加速<sup>[24-25]</sup>,跌坎对水流速度的影响,类似于水利工程的跌水池对水流的消能作用。同时细沟侵蚀过程中由土壤分离与沉积周期性变化引起的细沟宽度沿沟长的周期性的宽窄变化也会影响到水流的波动性<sup>[10]</sup>。

相对于 1.5mm 雨强,2.0mm 雨强时,除 10°在距坡顶距离 1m 范围内没有细沟发育外,其他坡度均在坡面不同位置产生细沟,说明大雨强可以在较缓坡度上增加形成细沟的范围。从坡面统计的 3 种径流速度来看,径流速度随距坡顶距离的增加并不是一致性的增加关系,而是在不同坡度之间或同一坡度不同坡位之间存在较大的波动性,不过总体上距坡顶越远,径流流速越大(25°坡面上的细沟流除外)。2.0mm 雨强下,坡面不同坡位间的流速波动性较大,可能与大雨强更容易形成复杂的微地貌有关。从表 2 和表 3 可以看出,相对于 1.5mm 雨强,2.0mm 雨强时的细沟密度、细沟数量等指标均较高,这说明大雨强侵蚀下的坡面更加破碎,并且细沟密度的增大,还会使每条细沟中流量减小,相对水流深度降低,有研究指出<sup>[10, 13, 15-16]</sup>,坡面流速随着流量的减小呈幂函数减小,细沟流速同样受此因素的影响,这些影响均会增加细沟径流的空间分布的波动性。与此同时,大雨强下的雨滴对坡面的打击力更大,更容易形成大面积的跌坎,这些微地貌也会影响到坡面流速和细沟间流速。

### 2.4 细沟侵蚀下不同径流流速的统计特征

表 5 为不同雨强和坡度时,距坡顶不同距离间流速变化范围和平均流速的统计情况。由表 5 可知,雨强相同时,各统计流速随坡度变化没有明显的规律可循,也就是说坡度对坡面径流流速影响不大,这与 Govers<sup>[15]</sup>、Nearing 等<sup>[16]</sup>的试验结果一致。本研究表明当坡度相同时,坡面流速、细沟间流速及细沟流速之间的波动性较大,且细沟流速并没有明显大于细沟间流速和坡面流速。从图 1 也可看出,相同雨强和坡度情况下,相同坡面位置上的坡面流速、细沟间流速和细沟流速间并不存在一致性的大小关系。这与一些人的研究结果差异较大,刘

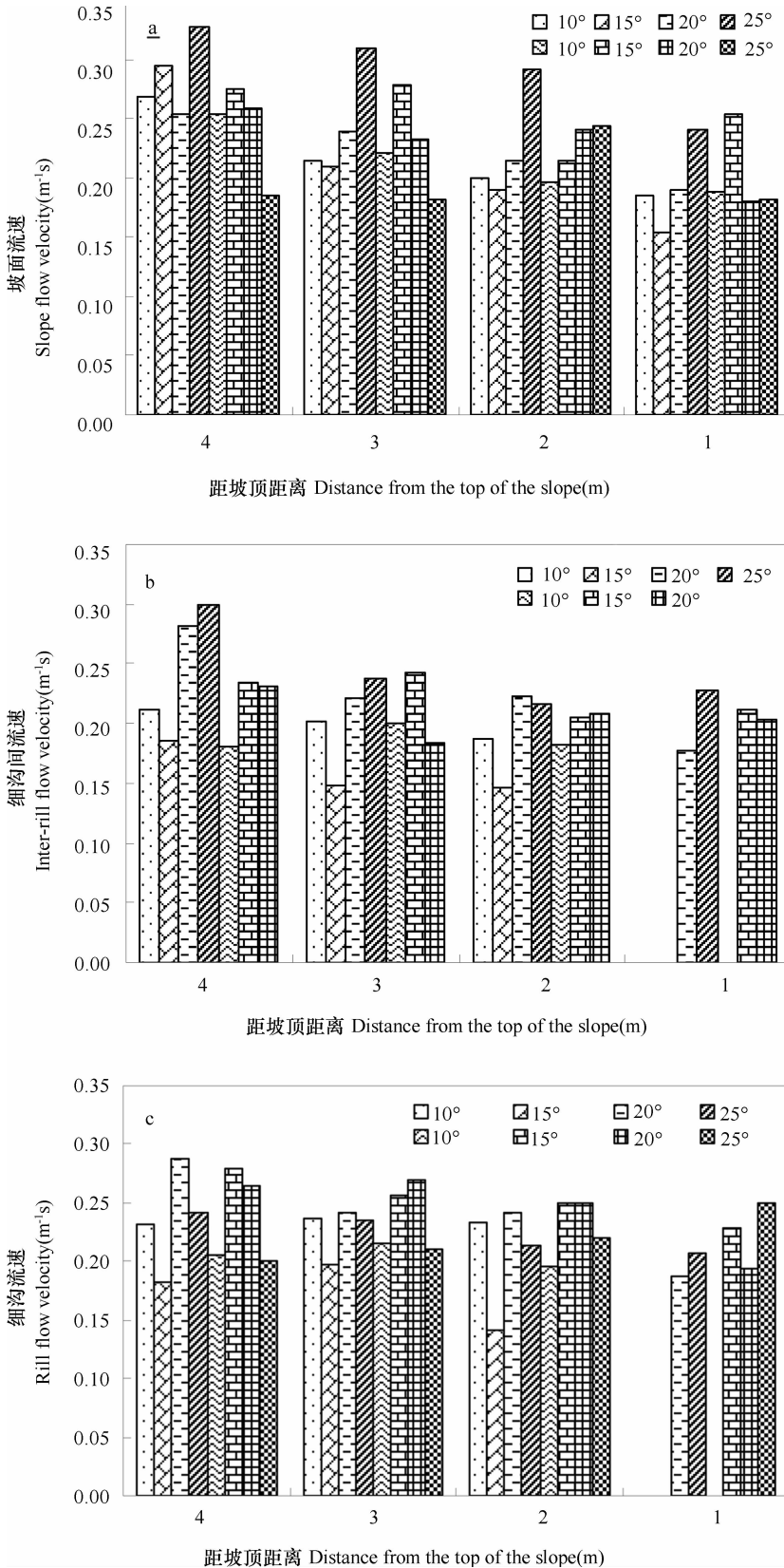


图 1 坡面水流速的空间分布

( $1.5 \text{ mm min}^{-1}$ 雨强: [dots], [diagonal lines];  $2.0 \text{ mm min}^{-1}$ 雨强: [cross-hatch], [grid])

Fig. 1 Spatial distribution of flow velocity (at rainintensity  $1.5 \text{ mm min}^{-1}$  and  $2.0 \text{ mm min}^{-1}$ )

和平等<sup>[19]</sup>的研究结果表明整个坡面平均细沟流速是细沟间流速的2倍~4倍,郑粉莉和高学田<sup>[5]</sup>的测量结果也表明细沟内水流流速是细沟间流速的2.06倍。本研究认为,细沟沟道并不像坡面其他位置那样相对平坦,细沟的弯曲程度、沟道底部的微地形变化、沟壁的不规则形态均会阻碍沟内径流的流速,同时沟道径流随着自身携带泥沙的不断饱

和,能量不断消耗,也会影响到流速,因此细沟流速并不一定较坡面流速和细沟间流速大。同时,由表5还可以看出,相同条件下,大雨强下的流速并没有明显地大于小雨强下的流速,造成这种差异的原因,可能主要在于大雨强下的坡面侵蚀更加剧烈,造成的坡面地形更为破碎(表2和表3),坡面的整体粗糙度较大,对径流流速阻力较大。

表5 不同雨强和坡度下的径流流速

Table 5 Runoff velocity as affected by rain intensity and slope gradient

降雨强度 Rainfall intensity (mm)	坡度 Slope gradient (°)	坡面流速 flow velocity on slope (m s <sup>-1</sup> )		细沟间流速 inter-rill flow velocity (m s <sup>-1</sup> )		细沟流速 rill flow velocity (m s <sup>-1</sup> )	
		范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean	范围 Range	平均 Mean
		1.5	10	0.18~0.27	0.22	0.19~0.21	0.20
	15	0.15~0.30	0.21	0.15~0.19	0.16	0.14~0.20	0.17
	20	0.19~0.25	0.22	0.18~0.28	0.23	0.19~0.29	0.24
	25	0.24~0.33	0.29	0.22~0.24	0.25	0.21~0.24	0.22
2.0	10	0.19~0.25	0.21	0.18~0.20	0.19	0.20~0.22	0.21
	15	0.22~0.28	0.26	0.21~0.24	0.22	0.23~0.28	0.25
	20	0.18~0.26	0.23	0.18~0.23	0.21	0.19~0.27	0.24
	25	0.18~0.24	0.20	-	-	0.20~0.25	0.22

注:“-”表示没有数据 Note:“-” indicates no data.

### 3 结 论

研究表明,坡度对细沟侵蚀有重要作用,坡度增加会造成细沟溯源侵蚀及下切侵蚀的加剧,但是随着坡度的增加,总侵蚀量的增幅趋于平缓,暗示可能存在坡面侵蚀量由强转弱的临界坡度。各变量间的相关分析,进一步验证了坡度是影响细沟发育的主要因素,坡面侵蚀加剧主要由细沟侵蚀引起。整体来看,坡面流速、细沟间及细沟流速与距坡顶距离有较好的正相关关系,坡度对它们的影响不大,其中,在较小雨强下,随着距坡顶距离的增加,坡面流速增加的趋势较为明显,细沟间流速增加趋势较弱,而细沟流速则有较大的波动性;当雨强较大时,坡面、细沟间和细沟流速随距坡顶距离增加而增加的趋势均存在较大波动性,且各统计流速并没有明显大于小雨强下的相应流速,这说明细沟发育水平引起的坡面破碎程度会加剧不同径流流速变化的复杂性。同时,坡面流速、细沟间和细沟流速间没有明显的大小关系,这与一般认为的细

沟流速高于细沟间流速的观点差异较大,这也是在以后试验过程中需要进一步验证的部分。

### 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. 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 (In Chinese). Advances in Water Science, 2004, 15(1): 12—18
- [2] 沙际德,白清俊. 粘性土坡面细沟流的水力特性试验研究. 泥沙研究, 2001(6): 39—44. Sha J D, Bai Q J. Experimental study on hydraulic characteristics of rill flows over clay soil slope (In Chinese). Journal of Sediment Research, 2001(6): 39—44
- [3] 郑良勇,李占斌,李鹏. 黄土区陡坡径流水动力学特性试验研究. 水利学报, 2004, 35(5):46—51. Zheng L Y, Li Z B, Li P. Experimental study on hydraulic characteristics of runoff on steep slope in loess area (In Chinese). Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(5):46—51
- [4] 张光辉. 坡面薄层流动力学特性的实验研究. 水科学进展, 2002,13(2): 159—165. Zhang G H. Study on hydraulic properties of shallow flow (In Chinese). Advances in Water Science, 2002,13(2): 159—165
- [5] 郑粉莉,高学田. 坡面汇流汇沙与侵蚀—搬运—沉积过程.

- 土壤学报, 2004, 41(1): 134—139. Zheng F L, Gao X T. Up-slope runoff and sediment and down-slope erosion-transport-deposition processes (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(1): 134—139
- [ 6 ] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究. 土壤学报, 1989, 26(2): 109—116. Zheng F L, Tang K L, Zhou P H. Study on affecting factor about rill erosion on slopland (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(2): 109—116
- [ 7 ] 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究. 泥沙研究, 1998(1): 52—59. Cai Q G. A study on critical condition about rill taken place on slope (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 1998(1): 52—59
- [ 8 ] 吴普特, 周佩华, 武春龙, 等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究. 水土保持研究, 1997, 4(2): 47—56. Wu P T, Zhou P H, Wu C L, et al. Research on the spatial distribution characters of slope rill erosion (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(2): 47—56
- [ 9 ] 王协康, 方铎. 临界细沟水力几何形态问题的研究. 山地学报, 1997, 15(1): 24—29. Wang X K, Fang D. Study on hydraulic geometry properties for the shreshold cross-section of the rill (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 1997, 15(1): 24—29
- [ 10 ] 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. 水利学报, 2000, 31(11): 49—55. Lei T W, Nearing M A. Flume experiments for determining rill hydraulic characteristic erosion and rill patterns (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 31(11): 49—55
- [ 11 ] 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. 中国水土保持科学, 2011, 9(2): 32—37. Huo Y Y, Wu S F, Feng H, et al. Dynamic process of slope rill erosion based on three-dimensional laser scanner (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(2): 32—37
- [ 12 ] Rauws G. Laboratory experiments on resistance to overland flow due to composite roughness. *Journal of Hydrology*, 1988, 103(1/2): 37—52
- [ 13 ] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I velocity relationships. *American Society of Agricultural Engineers*, 1984, 27: 790—796
- [ 14 ] Abrahams A D, Li G, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21(1): 35—47
- [ 15 ] Govers G. Relations between discharge, velocity, and flow area for rill eroding loss, non-layered material. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(2): 515—528
- [ 16 ] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1999, 24(8): 677—686
- [ 17 ] 张科利. 黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究. 泥沙研究, 1999(1): 56—60. Zhang K L. Hydrodynamic Characteristics of rill flow on loess slopes (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 1999(1): 56—60
- [ 18 ] Chaplot V, Le Bissonnais Y. Field measurement of interrill erosion under different slopes and plot sizes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2000, 25(2): 145—153
- [ 19 ] 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. 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 (In Chinese). *Geographical Research*, 2011, 30(9): 1660—1668
- [ 20 ] 丁文峰, 李占斌, 鲁克新. 黄土坡面细沟侵蚀发生的临界条件. 山地学报, 2001, 19(6): 551—555. Ding W F, Li Z B, Lu K X. The study of critical condition of rill erosion on loess sloping surface (In Chinese). *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(6): 551—555
- [ 21 ] 陈俊杰. 不同土壤坡面细沟侵蚀影响试验研究. 武汉: 华中农业大学(硕士论文), 2011. Chen J J. Experimental study on effects of different soils on rill erosion (In Chinese). Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011
- [ 22 ] 和继军, 蔡强国, 刘松波. 次降雨条件下坡度对坡面产流产沙的影响. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1263—1268. He J J, Cai Q G, Liu S B. Effects of slope gradient on slope runoff and sediment yield under different single rainfall conditions (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(5): 1263—1268
- [ 23 ] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系. 农业工程学报, 2011, 27(3): 73—78. Li J L, Cai Q G, Sun X LY, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(3): 73—78
- [ 24 ] 夏卫生, 雷廷武, 张晴雯, 等. 冲刷条件下坡面水流速度与产沙关系研究. 土壤学报, 2004, 41(6): 876—880. Xia W S, Lei T W, Zhang Q W, et al. Relationship between velocity of slope flow and sediment generation during erosion (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(6): 876—880
- [ 25 ] Gimnez R, Planchon O, Silvera N, et al. Longitudinal velocity patterns and bed morphology interaction in a rill. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2003, 28(1): 105—114



## CHARACTERISTICS OF RILL DEVELOPMENT ON SLOPE AND THEIRS EFFECTS ON FLOW VELOCITY DISTRIBUTION

He Jijun<sup>1,2†</sup> Sun Liying<sup>2,3</sup> Cai Qianguo<sup>3</sup> Zhang Yanxiang<sup>1</sup>

(1 Capital Normal University, Elementary Educational College, Base of the State Laboratory of Urban Environmental Processes and Digital Modeling, Key Laboratory of 3D Information Acquisition and Application, Ministry of Education, Beijing 100048, China)

(2 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Water and Soil Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, CAS, Beijing 100101, China)

**Abstract** A field experiment was carried in Yangling using simulated rainfalls, designed to have two rainfall intensities ( $1.5$  and  $2.0 \text{ mm min}^{-1}$ ), on slopes of Lou soil, different in gradient ( $10^\circ, 15^\circ, 20^\circ$  and  $25^\circ$ ), to study characteristics of rill development and distribution of flow velocity along the slopes. Results show that slope gradient is positively related to rill density and average depth of the rills, but with the increase in slope gradient, the increment of total erosion rate tends to level off in amplitude, which implies that there is likely a threshold slope gradient where soil erosion begins to turn from strong into weak. Slope gradient shows extremely significant relationship with to the various indices of soil erosion, indicating that slope gradient is the major factor affecting development of rills. Rill erosion rate is also found to be closely related to total erosion rate, with correlation coefficient being  $0.97$ , indicating that the aggravation of soil erosion on the slope is caused mainly by rill erosion. Flow velocities on the slope, in and in-between rills are all positively related to their distances to the slope top. Rainfall intensity intensifies fluctuation of the trend. However, slope gradient does not have much influence on flow velocities on slopes, in and in-between rills and, moreover, no significant relationship is found between these flows in velocity, which is contradictory to the general conclusion that flow velocity is higher in rills than in-between rills, and remains to be further verified in future experiments.

**Key words** Rill erosion; Slope gradient; Rain intensity; Flow velocity

(责任编辑:檀满枝)