

# 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

马小玲<sup>1</sup>, 张宽地<sup>1,2\*</sup>, 杨帆<sup>1</sup>, 杨明义<sup>2</sup>, 董旭<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 杨凌 712100;

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, 杨凌 712100)

**摘要:** 研究细沟形态发育过程对认识细沟侵蚀具有重要作用, 该文采用6种坡度(2°、4°、6°、8°、10°、12°), 5种流量(8、16、24、32、40 L/min)下的组合冲刷试验, 系统研究了坡面细沟横纵断面形态发育影响机制及动力特性。结果表明: 细沟宽深比变化范围为3.006~4.884, 根据水力最佳断面, 细沟水流远未达到稳定。横断面形态系数随坡度的变化范围为0.36~0.522, 细沟横断面形态随流量、坡度以及冲刷历时均趋近于梯形水力最佳断面, 即阻力最小的断面。随着流程长度的增加, 横断面形态由宽深逐渐变窄, 横断面形态系数也随之减小。细沟纵断面形态范围为0.60~11.26, 且随坡度的增大而增大, 与流量相关性不大。综合阻力系数及消能率均与细沟纵断面形态系数呈良好的幂函数关系。

**关键词:** 侵蚀; 试验; 土壤; 细沟形态; 形态指标系数; 跌坑; 消能率

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.029

中图分类号: S279.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-04-0209-08

马小玲, 张宽地, 杨帆, 杨明义, 董旭. 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. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.029 http://www.tcsae.org

Ma Xiaoling, Zhang Kuandi, Yang Fan, Yang Mingyi, Dong Xu. 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 (Transactions of the CSAE), 2017, 33(4): 209-216. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.04.029 http://www.tcsae.org

## 0 引言

坡面土壤侵蚀主要分为细沟间侵蚀和细沟侵蚀2种方式。而细沟侵蚀产沙占总输沙量的50%~70%, 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, 细沟的形态演化迅速。因此细沟形态的演化与水流动力学特性及土壤侵蚀间呈互馈过程<sup>[1-2]</sup>。而目前关于细沟形态的研究主要集中在其与侵蚀因子的响应关系上。吴普特等<sup>[3]</sup>采用稀土元素示踪技术对细沟的垂直分布特征进行了研究, 并采用平均密度和平均深度来表征细沟形态。Bruno等<sup>[4]</sup>根据细沟长度和横断面发展来描述细沟形态, 并得出细沟长度与体积之间呈幂函数变化。和继军等<sup>[5]</sup>选用细沟密度和细沟宽深比等指标表征了杨凌塬上和安塞黄绵土的细沟侵蚀特征差异。沈海鸥等<sup>[6]</sup>选取细沟倾斜度、细沟密度、细沟割裂度和细沟宽深比5个指标, 分别分析各指标与细沟形态的相应关系, 并提出表征细沟形态的最优指标。除了以上所述形态指标, 细沟纵断面形态的另一个宏观表现是跌坑的发育, 跌坑

是坡面细沟开始发育的标志, 关于跌坑的形成机理主要有以下几种观点: 一种认为坡面立地条件差异会影响跌坑的形成, 如地形和土壤特性的差异等<sup>[7-8]</sup>。严冬春等<sup>[9]</sup>通过试验研究发现, 由于土壤颗粒组成成分的不同, 紫色土坡面形成的跌坑边界要比黄土的更为模糊。另一种观点是从能量的角度分析了跌坑的形成机制, 当径流能量积累到一定程度, 坡面侵蚀方式将发生改变, 坡面跌坑开始发育<sup>[10-13]</sup>。坡面上一系列的跌坑是径流侵蚀最为剧烈的地方, 并以此为基准不断地开始溯源侵蚀。两相邻跌坑甚至也会相遇贯通。跌坑的发育是细沟为维持自身稳定而在水流方向做出的形态调整, 跌坑能够集中坡降, 增大坡面形状阻力, 并通过水跃来实现高消能率, 减少坡面下切侵蚀, 从而维持坡面稳定。其消能机理与台阶式溢洪道相似, 即通过各级台阶制造跌水, 消耗下泄的水流能量, 能够有效地预防河床底面掏蚀, 保护下游河床稳定<sup>[14]</sup>。但目前对跌坑的研究仅限于宏观描述, 没有定量地研究。

目前关于细沟形态的研究仅仅局限于地学描述以及基本的宽深变化, 而对横纵断面形态发育过程研究较少。在径流侵蚀作用下, 坡面侵蚀形态发生改变, 从而使得径流的水力学特性也随之发生变化<sup>[15]</sup>。定性描述细沟形态, 揭示其空间分布规律, 对于深刻认识细沟侵蚀规律、促进土壤侵蚀模拟技术发展具有十分重要的意义。

## 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黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室进行。试验所用土

收稿日期: 2016-06-22 修订日期: 2017-01-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目“坡面含沙水流波流耦合特性及泥沙输移机理研究”(51579214), 中央高校基本科研业务费专项资金“黄土坡面含沙水流能量耗散规律研究”(Z109021564); 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室主任基金“基于超声测量技术研究坡面流流动特性”(A314021402-1619); 流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金“坡面滚波演化及挟沙能力研究”(IWHR-SKL-2014)

作者简介: 马小玲, 女, 甘肃白银人, 博士生, 主要从事水土保持及土壤侵蚀方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。

Email: 15002981284@163.com

\*通信作者: 张宽地, 男, 宁夏隆德人, 副教授, 工学博士, 主要从事水工水力学及坡面水流研究。杨凌 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 712100。Email: zhangkuandi428@126.com

壤为杨凌当地的壤土,对试验土壤风干测其机械组成,结果见表1。

表1 土壤颗粒机械组成

机械组成 Distribution of particle size	粒径 Grain size/mm				
	≤0.002	>0.002~0.02	>0.02~0.05	>0.05~0.25	>0.25
百分数 Percentage/%	24.13	39.05	29.32	4.25	3.25
中值粒径 Median particle diameter /mm	0.015				

## 1.2 试验设计

1) 装土前在试验土槽底部装填 20 cm 厚的细沙,细沙上铺设土工布 2 层,土槽底部采用梅花形布置打孔,以模拟天然土壤透水状况,填土采用分层装填的方法,每层 10 cm,共 30 cm,根据实际野外土壤状况,土壤平均干体积质量控制在 1.09 g/cm<sup>3</sup>。

2) 试验小区采用可调坡度钢槽,小区结构尺度长×宽×深=6 m×0.4 m×0.6 m,试验段有效长度为 5.8 m。

3) 坡度大于 5°~6°的坡耕地会发生明显的土壤侵蚀现象,而小于 5°~6°的坡耕地亦有轻微的土壤侵蚀。考虑到陡坡耕地实行退耕还林政策,试验主要为缓坡耕地土壤侵蚀提供依据。试验取土地点耕地坡度较缓,故本次试验选取 2°、4°、6°、8°、10°、12°,共 6 个坡度进行研究,以期为缓坡耕地土壤流失治理提供依据。

4) 放水流量冲刷试验应与野外实际相近似,由于室内试验土槽尺寸的限制,因此需要考虑上方汇水因素。放水流量由雨强、上方汇流面积、径流系数等确定。根据野外实际降雨情况及汇流面积、雨强特征,设计试验冲刷流量为 8、16、24、32、40 L/min。

5) 为了消除试验误差,共设置 5 个观测断面,以槽顶为零点,向下取长度 0+0.5、0+1.5、0+2.5、0+3.5、0+4.5 m,并在槽侧作出标记,每段测流长度为 1.0 m,采用 KMnO<sub>4</sub> 染色示踪法观测断面表面优势流速,采用精度为 mm 的钢尺测量各断面水深和水面宽度(重复测量 3 次),最终平均化处理;

6) 试验过程中,间隔 20 min 停止放水,测量跌坑深度(测得跌坑最深处高度和上游结皮段高度,二者的高度差即为跌坑深度)及跌坑长度(铺设于土槽边沿精度为 mm 的米尺)。用测针排架在各断面处测量细沟横断面形态,坡面侵蚀剧烈的部位进行加测(如图 1b 所示)。

7) 试验历时 80 min,土壤前期含水量控制在 8.32%~12.54%,每场试验 2 次重复,并取其均值。

a. 细沟发育  
a. Rill developmentb. 横断面形态测量  
B. Cross-sectional shape measurement

图1 试验照片

Fig.1 Test photos

## 2 横断面形态研究

### 2.1 细沟宽深比变化规律

最小耗能原理是自然界一切运动的普遍原理,基于此理论,可以断定细沟水流在流动过程中亦向能耗最小的趋势发展。径流能量受自身流动,剥离泥沙,输移泥沙等因素共同调配。从细沟侵蚀的发育过程来看,都是有效能量减少、系统趋于稳定的过程。所谓稳定状态即床面泥沙处于不冲不淤状态,服从广义热力学熵增原理<sup>[16]</sup>。细沟流道趋于阻力最小的形态发展。在水力学中,水力最佳断面也是阻力最小,过流量最大的过水断面。根据明渠均匀流公式

$$Q = AC\sqrt{Ri} = \frac{\sqrt{i} A^{5/3}}{n \chi^{2/3}} \quad (1)$$

式中  $Q$  为流量, L/min;  $A$  为过水断面面积, m<sup>2</sup>;  $C$  为谢才系数, m<sup>1/2</sup>/s;  $R$  为水力半径, m;  $i$  为底坡;  $n$  为综合糙率;  $\chi$  为湿周, m。

当  $i$ 、 $n$ 、 $Q$  一定时,湿周  $\chi$  越小,过水断面面积越小。而当过水断面面积一定时,湿周越小,则阻力越小<sup>[17]</sup>。即水力最佳断面亦阻力最小的断面,这一点与径流对细沟流道的比选不谋而合。沙玉清<sup>[18]</sup>经过研究得出河道稳定曲线断面接近边坡系数  $m=1$  的梯形。暂且以边坡系数 1:1 的梯形断面为研究对象,由《水力学》<sup>[17]</sup>知,梯形水力最佳断面宽深比仅与边坡系数有关

$$\frac{b}{h} = \beta_m = 2(\sqrt{1+m^2}) - m \quad (2)$$

式中  $b$  为梯形断面底宽, m;  $h$  为梯形断面深, m;  $m$  为边坡系数;  $\beta_m$  梯形断面宽深比。

当边坡系数  $m=1$  时,宽深比  $\beta_m=0.828$ 。可见,当渠道下垫面相对稳定时,最优水力断面对应的宽深比为 0.828,为探究细沟水流断面宽深比的演化规律,列出了本试验条件下不同流量和坡度下的细沟横断面宽深比(表 2)。

表2 不同流量和坡度下细沟宽深比

Table 2 Rill width depth ratio under different discharge and slope

坡度 Slope/(°)	流量 Discharge/(L·min <sup>-1</sup> )				
	8	16	24	32	40
2	4.205	4.704	4.119	4.841	4.115
4	4.510	4.292	4.884	4.611	4.100
6	3.328	4.099	4.129	3.663	4.088
8	4.216	3.222	3.481	4.467	4.722
10	3.006	3.428	4.409	4.194	4.163
12	3.195	3.433	4.219	4.343	4.429

由表 2 可以看出,细沟宽深比均比较大,在 3.006~4.884 之间变化。与水力最佳断面宽深比  $\beta_m=0.828$  相差甚远,这说明细沟水流系统远未达到稳定状态。细沟侵蚀可分为:下切侵蚀、溯源侵蚀、沟壁坍塌,这 3 种侵蚀方式反映在细沟形态上分别为细沟加深、拓长、加宽。宽深比随流量和坡度的增加而减小,说明细沟在发育过程中主要以下切侵蚀和溯源侵蚀为主,沟壁坍塌侵蚀作

用相对较小。细沟侵蚀产沙过程伴随着沟道形态的迅速演化。沙玉清<sup>[18]</sup>认为横断面的变形，主要是决定于断面内流速的分布。当断面湿周上的各泥沙质点所受作用力和该处泥沙本身的稳定性无法平衡时，冲刷仍将继续。

## 2.2 细沟横断面形态指标变化

### 2.2.1 横断面形态指标随冲刷历时变化

径流在坡面流动过程中，不断地对细沟沟壁、沟底及沟头的土壤进行冲刷和运移，即径流的侧蚀、下切侵

蚀及溯源侵蚀作用。不同的侵蚀方式塑造了形态各异的细沟断面形态，同时，细沟的断面形态又对细沟侵蚀起制约作用，即细沟断面形态和侵蚀产沙是相互影响、相互制约的结果。由于细沟发育随机性较大，流道左右摆动，细沟断面形态在水流方向上差异较大。为了能客观评价细沟形态的变化特征，张科利等<sup>[19]</sup>提出了细沟横断面形态指标  $\eta$ ，即细沟断面面积与等深同宽的矩形面积之比。图 2 为 12°条件下细沟横断面形态随冲刷历时变化规律。

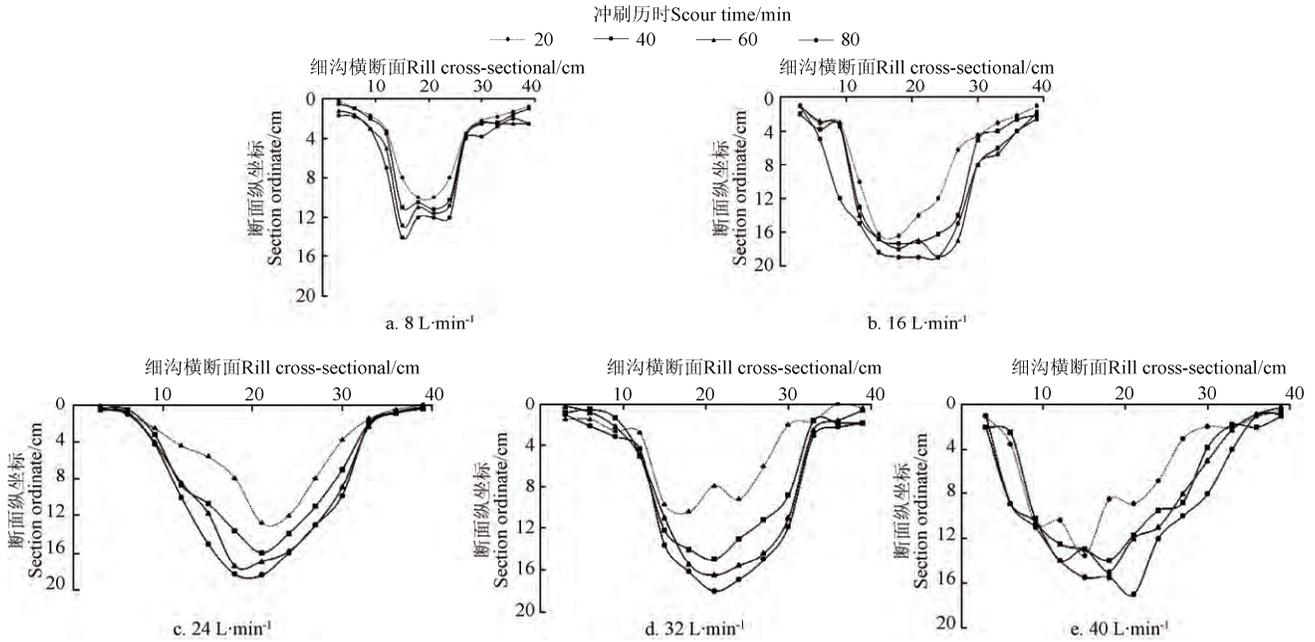


图 2 不同流量下细沟横断面形态随时间的变化

Fig.2 Change of rill cross-sectional shape with time under different discharge

由图 2 可见，冲刷初期 (0~40 min)，沟床主要以下切侵蚀和细沟边壁坍塌为主，断面不断加宽拓深。是因为冲刷初期，水流水层较薄，侵蚀能力有限，随着细颗粒土壤的启动，粗颗粒泥沙逐渐暴露，床面开始粗化，水流逐渐集中，产生束水攻沙现象，沟壁临空面逐渐增加，边坡稳定性降低。当冲刷历时为 40 min 后，细沟宽度基本不再变化，床面以下切侵蚀为主。经过水流的不断冲刷，细沟由上而下呈阶梯状，水流在各级阶梯处跌落，重力作用使得阶梯底部不断加深。冲刷初期 (0~40 min)，细沟横断面形态指标增加了 19.3%，而当冲刷历时为 40 min 后，横断面指标只增加了 10.4%。在流量较小时，流量对细沟的沟深有较大影响，流量为 8、16 L/min 时，最大沟深分别为 14 和 19 cm。而当流量大于 16 L/min 后，随着流量的增加，最大沟深均为 18 cm 左右。

图 3 为 24 L/min 流量下，不同坡度下的细沟横断面轮廓图。由图 3 可以发现，随着坡度的增大，细沟横断面也随之加宽拓深，断面形态也愈加不规则，细沟横断面指标随坡度增大，变化范围为 0.36~0.522。原因是当坡度增大时，径流沿流动方向的重力分力增加，促使径流流速增加，最终导致横断面不规则变化。同时根据图 2 和图 3，横断面形态随历时和坡度的变化都是由倒三角形向倒梯形转变，故前面以梯形的水力最佳断面来分析细沟断面是可行的。

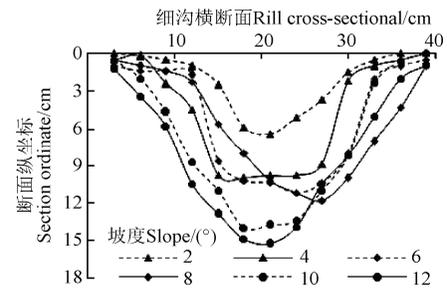


图 3 细沟横断面形态随坡度的变化

Fig. 3 Change of rill cross-sectional shape with slope

细沟横断面形态变化多样，如对其进行概化，大致可以分为矩形、倒梯形、倒三角形等形态。当断面形态近似为矩形时，断面面积最大，倒三角断面面积最小，而倒梯形体断面面积居中。即  $\eta$  值越大，代表细沟断面形态越接近矩形。 $\eta$  值越小，表示细沟断面形态越接近于倒三角形<sup>[19]</sup>。经计算，断面形态为边坡系数 1:1 的梯形水力最佳断面时，对应的形态指标  $\eta_m$  为 0.646。表 3 为图 2 中各细沟横断面所对应的形态指标系数  $\eta$  随时间的变化过程， $\eta$  变化范围为 0.361~0.574。将表 3 的计算结果与图 2 进行对比发现，横断面形态指标能够很形象地描述横断面变化过程，指标  $\eta$  随流量和时间的增大大体呈增大趋势。即  $\eta$  值随流量、坡度以及冲刷历时均趋近于梯形水力最佳断面对应的横断面指标  $\eta_m$ 。

表 3 不同流量下细沟横断面形态指标  $\eta$  随时间的变化

Table 3 Change of rill cross-sectional shape index  $\eta$  change with time under different discharges

试验时间 Test time/min	试验流量 Discharge/(L·min <sup>-1</sup> )				
	8	16	24	32	40
20	0.394	0.430	0.361	0.409	0.406
40	0.414	0.513	0.423	0.439	0.506
60	0.415	0.520	0.445	0.450	0.525
80	0.423	0.574	0.456	0.461	0.535

2.2.2 横断面形态指标随坡长变化

在试验过程中观察到，细沟侵蚀速率随着流程长度的增加而逐渐减小。沿细沟纵断面方向上，按流程距坡顶距离将坡面分为坡上（0~0+1.5 m）、坡中（0+2.0~0+3.5 m）、坡下（0+4.0~0+5.5 m）3 个坡段。本次选取侵蚀最为剧烈的坡度 12° 进行分析。图 4 为 12°、不同流量条件下坡上、坡中、坡下 3 个坡段的横断面形态。

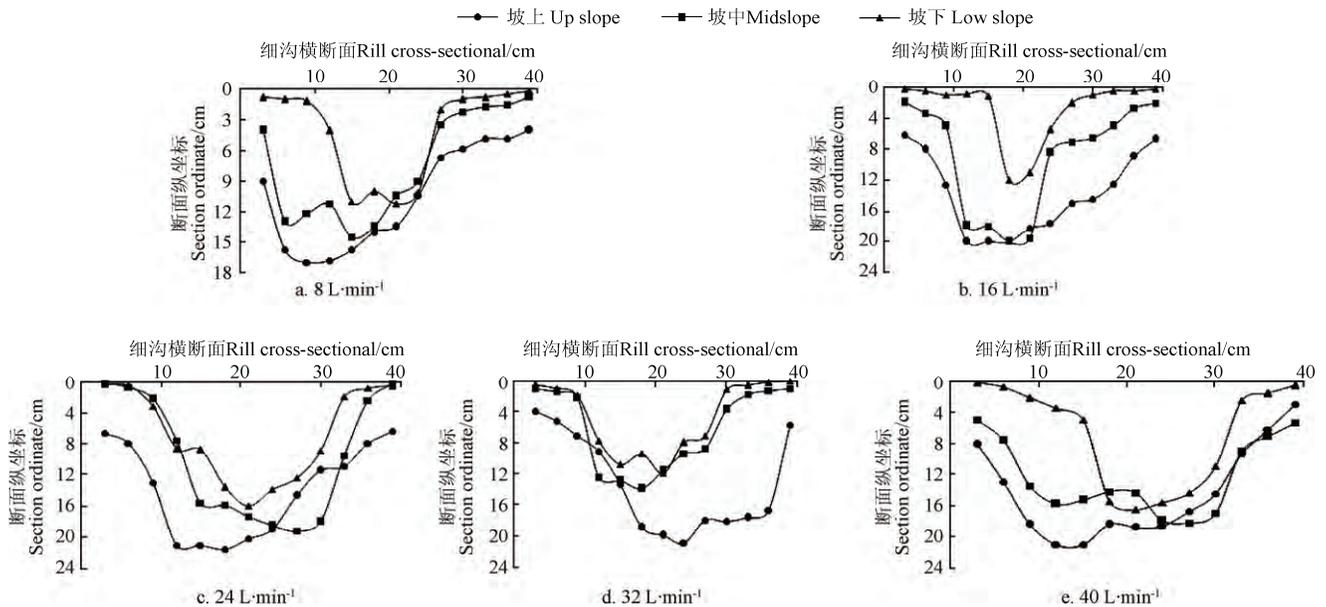


图 4 不同流量下细沟横断面形态随坡段变化

Fig.4 Change of rill cross-sectional shape with slope section under different discharges

表 4 为图 4 所对应的各坡段处细沟横断面形态指标  $\eta$ 。

表 4 不同流量下横断面形态指标  $\eta$  随坡段的变化

Table 4 Change of rill cross-sectional shape index  $\eta$  with slope section under different discharges

坡段 Slope section	试验流量 Discharge/(L·min <sup>-1</sup> )				
	8	16	24	32	40
坡上 Up slope	0.615	0.676	0.636	0.679	0.631
坡中 Midslope	0.515	0.447	0.511	0.664	0.448
坡下 Low slope	0.369	0.232	0.496	0.415	0.431

从表 4 可以观察到，由坡上段到坡下段，横断面指标  $\eta$  逐渐减小。即在径流侵蚀的作用下，随着流程长度的增加，细沟断面形态由宽深状逐渐变窄，同时细沟侵蚀深度也减小。出现这种现象的原因有 2 个：径流在冲刷过程中，除了自身流动所需的动能外，还需要剥离和搬运泥沙，径流从坡顶流下时，首先对坡顶土壤进行剥离，径流中携带了大量的泥沙，径流因输运泥沙而消耗了大量能量，以致其流经坡中和坡下部位时，用于剥蚀土壤的能量相对较小，故而对细沟的侵蚀能力减弱<sup>[20]</sup>；整个冲刷过程中，水流能量的分配是不断调整变化的，同时被水流输移的泥沙颗粒和沟床泥沙不断地进行交替变化。随着流程长度的增加，径流对坡面土壤颗粒由侵蚀作用逐渐过渡为侵蚀和沉积交替进行<sup>[21]</sup>。本文对不同

流量和坡度条件下冲刷结束后细沟的各断面形态进行分析，发现细沟横断面形态指标  $\eta$  变化范围在 0.29~0.69 之间，其变化范围服从正态分布，并得出各个坡段横断面形态指标频率分布图（图 5）。由图 5 可以看出，相较于坡下部，坡上部和坡中部细沟横断面形态指标范围更大，即坡上部细沟横断面形态呈宽深式，随着距坡顶距离的增加，细沟横断面形态逐渐变窄。这与沈海鸥等的研究结果有所不同，沈海鸥试验侵蚀强度变化为：坡中部>坡下部>坡上部<sup>[6]</sup>。产生这种差异的原因在于其试验是在降雨条件下开展的，坡上部汇水面积相对较小，断面形态为窄浅式。而其试验中，坡中部位（530~600 cm）处于侵蚀增强带，坡下（840~860）处于侵蚀减弱带。

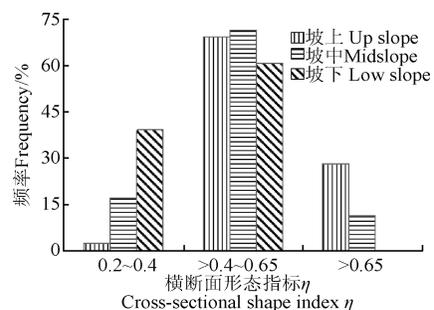


图 5 不同坡段处横断面形态指标  $\eta$  频率分布

Fig.5 Different slope section of cross-sectional shape index  $\eta$  of frequency distribution

### 3 纵断面形态研究

#### 3.1 细沟纵断面形态指标

坡面侵蚀过程中，随着径流的持续冲刷作用，细沟纵断面方向逐渐出现一系列跌坑，水流在跌坑处发生跌水，并不断地进行溯源侵蚀，故跌坑的发育是细沟侵蚀的重要环节<sup>[22]</sup>。为了描述细沟纵断面方向上跌坑的发育程度，现引出无量纲参数  $100 H/L$ ，特定义其为细沟纵断面形态系数  $\delta$ 。其中  $H$  为跌坑平均深度，cm； $L$  为各组次相邻两跌坑最深处沿坡面方向距离的平均值，cm；表 5 为不同流量和坡度下的细沟纵断面形态系数  $\delta$ 。

表 5 不同试验组次纵断面形态系数  $\delta$   
Table 5 Different group profile form factor  $\delta$

试验坡度 Slope/(°)	试验流量 Discharge/(L·min <sup>-1</sup> )				
	8	16	24	32	40
2	0.60	0.79	1.47	0.74	0.59
4	1.55	2.28	3.29	2.90	2.09
6	4.90	5.41	5.96	4.70	5.11
8	6.85	7.31	9.88	4.66	9.00
10	9.00	5.13	9.89	4.41	10.87
12	11.26	8.69	10.83	7.01	8.57

本试验条件下纵断面形态系数范围为  $0.60 < \delta < 11.26$ 。由表 5， $\delta$  随坡度增加了 17.8 倍，而随流量最大增加了 1.45 倍。即相较于流量， $\delta$  随坡度的增加更为显著。是因为纵断面形态的发育代表了床面侵蚀的剧烈程度，而径流的侵蚀能力受流量影响不大，主要与坡度有关。试验过程中观察到，随着坡度的增大，床面跌坑平均间距减小，跌坑深度增大，故  $\delta$  也随之增大。从能量角度来分析，径流在坡面流动过程中，能量不断地调整变化，当坡度愈大，径流能量也随之加大，需要更多的跌坑来消耗水流能量，故而纵断面形态系数  $\delta$  增大。

#### 3.2 纵断面形态系数 $\delta$ 与糙率系数 $n$ 之间的响应关系

坡面细沟在水流的冲刷作用下，跌坑与结皮逐渐发育，跌坑和结皮是细沟土壤对水流冲刷起抑制作用的一种手段<sup>[23]</sup>，徐江等<sup>[24]</sup>通过水槽试验来模仿河流阶梯-深潭系统，发现河床由粗化层、沙波发展形成阶梯-深潭，即通过增加床面阻力来消耗径流能量。而在阶梯-深潭河段，颗粒阻力和形状阻力平均占总阻力的 4%<sup>[25]</sup>，因此水流阻力主要与跌坑发育程度有关。本次选用糙率系数  $n$  来描述阻力与纵断面发育系数的耦合关系。

由图 6a 可以看出，综合阻力系数  $n$  随纵断面形态系数的增加而增大。细沟径流是细沟侵蚀发育的主要作用力，而坡面形态的发育又对径流侵蚀有一定的控制作用，故细沟水力特性和细沟形态之间呈相互联系、相互制约的作用与反作用系统<sup>[26]</sup>。对于水槽试验，径流能量主要消耗在剥离和输移泥沙颗粒以及坡面结构 2 方面，且这 2 部分呈此消彼长的关系<sup>[27]</sup>。在坡面径流刚开始冲刷时，坡面较为平整，细沟还未完全发育，径流开始大量剥蚀土壤颗粒，随着越来越多的泥沙被输移出坡面，坡面跌坑开始发育，跌坑数量和深度不断增加，即  $\delta$  增大，坡面形状阻力也随之增大。经分析，糙率系数  $n$  与  $\delta$  呈良好的幂函数关系： $n=0.024\delta^{0.356}$  ( $R^2=0.8694$ )。

#### 3.3 纵断面形态系数 $\delta$ 与消能率 $\Delta$ 之间的响应关系

根据能量守恒方程，以跌坑上下段能量差与跌坑上游总能量的比值作为消能率。计算公式为

$$\Delta H = \Delta h + \frac{Q^2}{2gb^2} \left( \frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \quad (3)$$

$$\Delta = \frac{\Delta H}{\Delta h + \frac{Q^2}{2gb^2} \frac{1}{h_1^2}} \quad (4)$$

式中  $\Delta H$  为总水头差，cm； $\Delta h$  为跌坑深度，cm； $Q$  为流经跌坑的流量，L/min； $h_1$  为跌坑上游水深，cm； $h_2$  为跌坑下游水深，cm； $\Delta$  为消能率，%； $g$  为重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $b$  为细沟沟宽，cm。

径流在流动过程中，势能不断地转化为动能，水流流入跌坑内时，动能通过水流的强烈紊动转化为紊动能，能量因此大量耗散。本试验  $\delta$  与消能率  $\Delta$  的关系如图 6b 所示。

由图 6b 可知，随着坡度的增大，消能率增加了 15.3%。消能率  $\Delta$  随  $\delta$  的增大而增大，二者呈幂函数关系增长 ( $R^2=0.805$ )。 $\delta$  越大，表示跌坑发育愈成熟，即跌坑对于消能有明显的影响。水流进入跌坑后，水流强烈紊动并掺气，此阶段紊动的主要来源是水流跌入跌坑后所形成的尾流和漩滚作用，在没有跌坑发育的床面上，水流主要通过床面肤面摩擦来产生紊动。但相对于肤面摩擦，由跌坑产生的紊动消能效果更为显著<sup>[28]</sup>。跌坑的这种消能原理与阶梯-深潭系统有类似之处，即消能率与阶梯高度呈正比，但两者之间也存在一些差别。阶梯-深潭是由山区河流中较大的卵石形成的独特构造，而一些学者利用水槽试验模拟阶梯-深潭系统时，也会选用粒径较粗的泥沙颗粒，土壤级配不均匀，如徐江<sup>[24]</sup>选用泥沙粒径范围为 1~3 cm。两者的破坏形式也不同，阶梯-深潭是由粒径较大的卵石所构成的互锁结构，其稳定性主要靠阶梯上最关键石块的受力情况决定，一旦阶梯失稳，整个系统都将崩塌破坏<sup>[29]</sup>。而跌坑在径流的持续掏蚀作用下，表现为溯源发展，跌坑间距逐渐减小，通过增加床面阻力来抑制径流继续侵蚀。

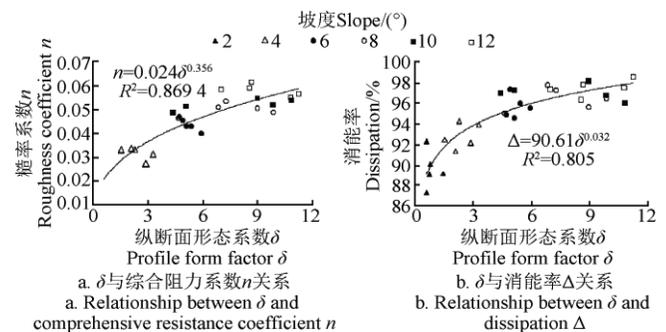


图 6  $\delta$  与综合阻力系数  $n$  和消能率  $\Delta$  的关系

Fig.6 Relationship between  $\delta$  and comprehensive resistance coefficient and dissipation  $\Delta$

### 4 讨论

由于黄土坡面土壤流失情况日益加剧，使得水土流

失治理成为当务之急, 现行的研究多基于坡面细沟水流水动力学特性之上。所以本文尝试从细沟纵横断面形态指标入手, 研究细沟形态指标的变化过程, 探究影响细沟形态指标的影响机制, 以期构建黄土坡面细沟侵蚀预报模型提供一定的理论支撑。结果表明, 本试验研究结果与野外试验结果基本相同, 但由于试验条件的不同也存在一些差异。

已有野外试验结果表明, 描述细沟形态的基本参数细沟宽和细沟深均随流量和坡度的增加而增加, 而宽深比却呈减小趋势<sup>[30]</sup>。这一结果与本文结论一致。这表明坡面细沟在流量和坡度较小时以沟壁坍塌侵蚀为主, 而在大流量和大坡度条件下以下切侵蚀为主。其原因是随着流量的增大, 径流动能增大, 随着坡度的增大, 流速增大, 径流剪切应力增大; 在野外试验中, 细沟横断面随流程长度的增加呈现出先增后减的变化趋势<sup>[31]</sup>。是因为细沟侵蚀沿坡面呈现出强弱交替的波动趋势。而降雨试验研究表明, 细沟横断面随流程长度的增加而增加<sup>[6]</sup>。其原因主要与汇水面积的增加有关。这与本文研究结果存在差异, 室内冲刷试验条件下, 径流能量既要用于剥蚀床面, 还要输移泥沙颗粒, 随着流程长度的增加, 径流输移的泥沙颗粒逐渐增多, 对床面的剥蚀能力则减小。

由于目前试验条件和方法所限, 细沟发育过程中瞬时细沟形态变化还无法准确获得, 而野外动态监测细沟侵蚀过程的方法和技术还不成熟, 缺乏对细沟形态特征参数量化效果的评价。因此今后关于细沟断面形态的研究需要不断改进试验方法, 来准确测量瞬时细沟断面形态等指标, 为进一步认识细沟侵蚀机理奠定基础。

## 5 结 论

细沟纵横断面形态是水流冲刷的结果, 水流冲刷后所呈现的细沟纵横断面形态也较复杂。径流侵蚀造就了不同的断面形态, 而细沟断面形态宏观上对径流侵蚀有一定的抑制作用。通过对纵横断面形态参数的分析来研究细沟形态变化规律, 以及坡面形态与侵蚀的内在耦合机制。

1) 横断面方向上, 细沟宽深比随坡度的增加而减小, 且与梯形水力最佳断面所对应的宽深比相差较远, 即床面还未达到稳定状态。细沟横断面形态指标(细沟断面面积与等深同宽的矩形面积之比  $\eta$ ) 随冲刷历时和坡度的增加而增大, 并逐渐趋近于梯形水力最佳断面对应的横断面形态指标  $\eta_m$ 。即断面形态随着冲刷历时和坡度的增加向宽深式发育。

2) 跌坑平均深度与纵向间距比值  $\delta$  范围为:  $0.60 < \delta < 11.26$ 。  $\delta$  随坡度的增大而增大, 而与流量相关性不大。随着坡度的增大, 床面跌坑平均间距减小, 跌坑深度增大,  $\delta$  也随之增大。

3) 糙率系数  $n$  和消能率均与  $\delta$  呈良好的幂函数关系。细沟水力特性和细沟形态之间呈相互联系、相互制约的作用与反作用系统。 $\delta$  越大, 即床面形状阻力增大, 跌坑也随之发育愈成熟。水流在跌坑内强烈紊动并掺气, 对于消能有显著的影响。

## [参 考 文 献]

- [1] 张乐涛, 李占斌, 王杉杉. 坡面径流类型对侵蚀产沙及水沙传递关系的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(20): 124—131.  
Zhang Letao, Li Zhanbin, Wang Shanshan. Impact of runoff regimes on sediment yield and sediment flow behavior at slope scale[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(20): 124—131. (in Chinese with English abstract)
- [2] Dong Y Q, Zhuang X H, Lei T W, et al. A method for measuring erosive flow velocity with simulated rill[J]. Geoderma, 2014, 232(11): 556—562.
- [3] 吴普特, 周佩华, 武春龙, 等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 47—56.  
Wu Pute, Zhou Peihua, Wu Chunlong, et al. Research on the spatial distribution characters of slope rill erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(2): 47—56. (in Chinese with English abstract)
- [4] Bruno C, Stefano C D, Ferro V. Field investigation on rilling in the experimental Sparacia area, South Italy[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(2): 263—279.
- [5] 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 Jijun, Gong Huili, Li Xiaojuan, et al. Effects of rill development on runoff and yielding processes[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(1): 90—97. (in Chinese with English abstract)
- [6] 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. The intensity of rainfall and slope comprehensive effects of rill morphological characteristics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 162—170. (in Chinese with English abstract)
- [7] 唐克丽, 郑世清. 杏子河流域坡耕地的水土流失及其防治[J]. 水土保持通报, 1984, 4: 5—8.
- [8] 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 Qiangguo. A study on critical condition about rill taken place on slope[J]. Journal of Sediment Research, 1998(1): 52—59. (in Chinese with English abstract)
- [9] 严冬春, 文安邦, 史忠林, 等. 紫色土坡面水流跌坑形态特征及其成因[J]. 山地学报, 2012, 30(1): 30—35.  
Yan Dongchun, Wen Anbang, Shi Zhonglin, et al. Purple soil water flow down pit morphological characteristics and its causes[J]. Journal of Mountain Research, 2001, 30(1): 30—35. (in Chinese with English abstract)
- [10] 雷阿林, 唐克丽. 坡沟系统土壤侵蚀研究回顾与展望[J]. 水土保持通报, 1997, 17(3): 37—43.

- Lei Alin, Tang Keli. Retrospect and prospect of soil erosion research slope gully system[J]. Journal of soil and water conservation bulletin, 1997, 17(3): 37—43. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李占斌. 黄土地区坡沟系统暴雨侵蚀试验及小流域产沙模型研究[D]. 西安: 西安理工大学, 1991.
- Li Zhanbin. Heavy rain Erosion Slope Gully Loess Region System Test and Small Watershed Sediment Yield Model Research[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 1991. (in Chinese with English abstract)
- [12] Church M, Zimmermann A. Form and stability of step - pool channels: Research progress[J]. Water Resources Research, 2007, 43(43):10—1029.
- [13] 徐江, 王兆印. 阶梯-深潭的形成及作用机理[J]. 水利学报, 2004, 35(10): 48—56.
- Xu Jiang, Wang Zhaoyin. Ladder-deep pools formation and mechanism of action[J]. Journal of hydraulic engineering, 2004, 35(10): 48—56. (in Chinese with English abstract)
- [14] 田嘉宁. 台阶式泄水建筑物水力特性试验研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2005.
- Tian Jianing. Experimental Study Terraced Building Drainage Hydraulic Characteristics[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [15] 肖培青, 郑粉莉, 姚文艺. 坡沟系统坡面径流流态及水力学参数特征研究[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 236—240.
- Xiao Peiqing, Zheng Fenli, Yao Wenyi, et al. Slope gully slope surface runoff flow and hydraulics parameters characteristics research[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 236—240. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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, 2015, 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]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 51—58. (in Chinese with English abstract)
- [17] 吴持恭. 水力学(上册)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1982: 249—251.
- [18] 沙玉清. 冲淤平衡稳定渠道设计方法[J]. 水利学报, 1959(4): 25—44, 85.
- [19] 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 Keli, Tang Keli. A study on hydraulic characteristic of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope[J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 9—15. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8): 145—153.
- Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Li yonghong, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(8): 145—153. (in Chinese with English abstract)
- [21] 丁文峰, 李勉, 张平仓, 等. 坡沟系统侵蚀产沙特征模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 10—14.
- Ding Wenfeng, Li Mian, Zhang Pingcang, et al. Experimental study on the sediment yield characteristics in slope-gully system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2006, 22(3): 10—14. (in Chinese with English abstract)
- [22] 白清俊, 马树升. 细沟侵蚀过程中水流跌坑的发生机理探讨[J]. 水土保持学报, 2001, 15(6): 62—65.
- Bai Qingjun, Ma Shusheng. Flow down to the pit in the process of rill erosion mechanism[J]. Journal of soil and water conservation. 2001, 15(6): 62—65. (in Chinese with English abstract)
- [23] 沙际德, 白清俊. 粘性土坡面细沟流的水力特性试验研究[J]. 泥沙研究, 2001(6): 39—43.
- Sha Jide, Bai Qingjun. Stickness soil slope surface of rill flow hydraulic characteristics experimental study[J]. Journal of Sediment Research, 2001(6): 39—43. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐江, 王兆印. 山区河流阶梯-深潭的发育及其稳定河床的作用[J]. 泥沙研究, 2003(5): 21—26.
- Xu Jiang, Wang Zhaoyin. Ladder-deep pools of mountainous rivers development and its effect on the stability of riverbed[J]. Journal of Sediment Research, 2003(5): 21—26. (in Chinese with English abstract)
- [25] Curran Janet H, Wohl Ellen E. Large woody debris and flow resistance in step 2 pool channels[J]. Cascade Range, Washington, Geomorphology, 2003, 51(1/2/3): 141—157.
- [26] 张霞, 李鹏, 李占斌, 等. 黄土高原丘陵沟壑区临界地貌侵蚀产沙特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 129—136.
- Zhang Xia, Li Peng, Li Zhanbin, et al. Characteristics of erosion and sediment yield under critical landform in hill-gully area of loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(4): 129—136. (in Chinese with English abstract)
- [27] 王瑄, 李占斌, 李雯, 等. 土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 185—187.
- Wang Xuan, Li Zhanbin, Li Wen, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 185—187. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李文哲, 王兆印. 阶梯-深潭系统消能机理的实验研究[J]. 水利学报, 2014, 45(5): 537—546.
- Li Wenzhe, Wang Zhaoyin, et al. Step-deep pools system energy dissipation mechanism of experimental research[J].

- Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 537–546. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李志威, 王兆印, 张晨笛, 等. 人工阶梯-深潭破坏案例与稳定性分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 820–828. Li Zhiwei, Wang Zhaoyin, Zhang Chendi, et al. Artificial ladder-deep pools damage cases and stability analysis[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 820–828. (in Chinese with English abstract)
- [30] 吴普特, 周佩华, 武春龙, 等. 坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 47–56. Wu Pute, Zhou Peihua, Wu Chunlong, et al. Research on the spatial distribution characteristics of slope rill erosion[J]. Research of Soil and Water Conservation, 1997, 4(2): 47–56. (in Chinese with English abstract)
- [31] Di Stefano C, Ferro V, Pampalone V, et al. Field investigation of rill and ephemeral gully erosion in the Sparacia experimental area, South Italy [J]. Catena, 2013, 101(2): 226–234.

## Influencing factor analysis of rill erosion section morphology development on slope and its dynamic characteristic experiment

Ma Xiaoling<sup>1</sup>, Zhang Kuandi<sup>1,2\*</sup>, Yang Fan<sup>1</sup>, Yang Mingyi<sup>2</sup>, Dong Xu<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, 712100, China;

2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Rill erosion is the process of soil particles separating in the groove and handling by rill flow, and it is one type of surface corrosion, and the rill formed can be completely filled by normal farming activities. In the loess plateau region, rill erosion of slope accounts for more than 70% of the total erosion, and rill erosion is a major erosion in the loess plateau hilly land, and is also an important part of mechanism of slope erosion prediction. Rills are small channels which function as both sediment sources and sediment transport vehicles on hill slopes. It is a quantum leap during the process of soil erosion on slopes, and is also the beginning of qualitative changes in the process of soil erosion. The rill morphology development plays an important role in the understanding of rill erosion. Rill morphology changes have many influence factors in the process of rill erosion, so systematically studying the relationship between rill shape coefficient and influencing factors can make us better understand the process of rill erosion and erosion mechanism. For the study of rill morphological development process, the combination scouring tests of 6 slopes (2°, 4°, 6°, 8°, 10°, and 12°) and 5 discharges (8, 16, 24, 32, and 40 L/min) were carried out, and the effect mechanism of rill transverse profile morphological development on the loess slope surface was investigated, as well as the dynamic characteristics of the impact. The results showed that rill width-depth ratio ranged from 3.006 to 4.841, and according to the hydraulic optimum section, the rill flow was far from steady state. In rill erosion, downward erosion and lateral erosion gradually transitioned to downward erosion. Because of incised and lateral erosion, rill cross-sectional shape was gradually widened and deepened with the increase of slope and time. Along with the change of slope, cross-sectional shape coefficient varied within the range of 0.36-0.522. Research showed that: The rill cross-sectional shape was approximating to the trapezoidal hydraulic best section with the increase of the flow, slope and scour lasted time, namely the section with the least resistance. With the increase of water flow length, cross section shape changed gradually from wide and deep to narrow, and the cross-sectional shape coefficient was reduced. Through calculation, the groove profile form ranged within 0.6-11.26, and increased with the increase of slope, but had no significant correlation with discharge. With the increase of slope, the average spacing of drop pit on bed face decreased, the depth of drop pit increased, and the groove profile shape coefficient increased. Comprehensive resistance coefficient and energy dissipation showed a good power function relationship with groove profile shape coefficient, and with the increase of profile shape coefficient, the slope shape resistance increased. Rill hydraulic characteristics and groove shape showed the role of mutual connection and restriction and reaction system. Groove profile shape coefficient was larger, the bed surface shape resistance increased, and drop pit also would be developed more maturely. The water in drop pit had strong turbulence and aeration, which had significant effect on energy dissipation.

**Keywords:** erosion; experiment; soils; rill morphology; form index coefficient; drop pit; energy dissipation efficiency