

文章编号:1009-3087(2016)05-0028-08

DOI:10.15961/j.jsuese.2016.05.005

黄土细沟流跌坑的形成与作用机理

董旭^{1,2},张宽地^{1,3*},王光谦⁴,王俊杰¹,马小玲¹

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2. 中国电建集团 华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 310000;
3. 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;
4. 清华大学 水沙科学与水利水电工程国家重点实验室,北京 100084)

摘要:跌坑是细沟侵蚀过程中形成的一种床面形态,其是床面形态和水流流动相互作用的结果。借鉴下切型阶梯-深潭理论采用6种坡度(2°、4°、6°、8°、10°、12°),5种流量(8、16、24、32、40 L/min)完全组合冲刷试验,系统研究了黄土坡面细沟流跌坑形态发育过程及动力特性。结果表明:跌坑平均深度随坡度的增加而增加,跌坑平均间距与跌坑平均深度的比值随坡度的增加而减小,表明跌坑随坡度的增加发育越加成熟,且流量对两者影响均较少;跌坑发育系数随坡度的增加而增大,其值介于1.01和1.14之间,与细沟阻力系数呈正势变化,表明随着跌坑发育越显著,水流阻力越大,能量耗散越剧烈。相同坡度下,跌坑消能率随流量的增加呈线性减小趋势;而消能率随坡度和跌坑发育系数的增加呈幂函数增加关系,消能率范围在87.28%~98.58%之间,研究结果表明跌坑的发育及作用机制对细沟流流动特性及侵蚀产沙具有重要作用。

关键词:跌坑;阶梯-深潭;跌坑发育系数SP;消能率

中图分类号:S279.2

文献标志码:A

Formation and Mechanism of Loess Rill Flow Drop Pit

DONG Xu^{1,2},ZHANG Kuandi^{1,3*},WANG Guangqian⁴,WANG Junjie¹,MA Xiaoling¹

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

2. Huadong Eng. Co. Ltd., PowerChina, Hangzhou 310000, China;

3. State Key Lab. of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F Univ., Yangling 712100, China;

4. Water-sediment Sci. and State Key Lab. of Water Resources and Hydropower Eng., Tsinghua Univ., Beijing 100084, China)

Abstract: Drop pit is a kind of bed form developed in rill erosion process, and it is the result from the interaction between rill erosion process and flow characteristics. Six slopes (2°, 4°, 6°, 8°, 10°, 12°) and five discharges (8, 16, 24, 32, 40 L/min) were combined in erosion experiment. Results showed that the average depths of drop pit increased with the increase of slope while average spacing of drop pit decreased. The development coefficient of drop pit increased with the rise of slope, and it was ranged from 1.01 and 1.14 with a positive relationship with SP. With the same slope, the energy dissipation efficiency of drop pit showed a linear decrease trend with the increase of discharge, and it showed a power function increase trend with the rise of slope and SP. The energy dissipation efficiency ranged from 87.28% and 98.58%. Research results showed that the development and mechanism of drop pit played an important role in flow characteristics and erosion sediment yield.

Key words: drop pit; ladder-deep pools; drop pit development coefficient SP; energy dissipation efficiency

黄土高原坡间地的土壤侵蚀主要包括雨滴溅蚀、细沟间面蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀。细沟侵蚀剥

收稿日期:2016-01-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51579214;51209222;41001159);国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB040441);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室开放基金资助项目(A314021402-1619);流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金资助项目(IWHR-SKL-2014);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(Z109021564)

作者简介:董旭(1988—),男,博士生.研究方向:水土保持及土壤侵蚀. E-mail: dongxu2345@126.com

*通信联系人 E-mail: zhangkuandi428@126.com

网络出版时间:2016-9-13 15:30:47

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160913.1530.006.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

蚀土壤和泥沙输移的能力都远远大于雨滴溅蚀、坡面漫流相应的剥蚀土壤和泥沙输移的能力。蔡强国等野外调查试验结果表明,细沟侵蚀形成时,土壤侵蚀量急剧增加,可占土壤侵蚀量的70%以上^[1-3]。

细沟发育过程中会形成一系列近似等间距的冲坑,称为跌坑。目前关于跌坑的形成机理还不是非常的清晰,总结已有的认识大致可以分为两种:一是外在条件的差异性造成的,如土壤微地形差异及土壤空间抗侵蚀的差异等^[4-6];二是水流动力机制形成,如水流波动等因素^[7-9]。沙际德等通过冲刷试验发现发育在黏性土表层内的细沟有跌坑与结皮交错发育的现象^[10]。丁文峰等通过水槽上不同坡度、不同流量的冲刷试验观测到当径流侵蚀力超过土壤的抗侵蚀力时,坡面开始出现一系列近似等间距的跌坎,跌坎的出现使得原本平整的坡面出现起伏,阻力增大,径流流速减小^[11]。白清俊等则认为跌坑的形成与坡面微地形、土壤结构、土壤颗粒的黏粒成分、坡面阻力有关^[12]。严冬春等认为径流动能随坡面呈周期性波动,当能量聚集到一定程度可突破土壤的抗侵蚀能力形成跌坑^[13]。以上可见,跌坑的研究仅停留在地学描述阶段,对跌坑的发育过程及水力特性均涉及较少,而该方面的研究对阐明细沟水流侵蚀输沙机理提供理论支撑。

文章采用下切型阶梯-深潭耗能理论探讨细沟水流床面演化规律,以期为细沟水流的沟床演化规律的研究提供新的思路。细沟水流跌坑的形态发育与下切型山区河流阶梯-深潭系统发育在水流形态阻力耗能方面比较相似(唯不同之处在于细沟侵蚀耗能占水流能量耗散的比重较大)。试验观测发现跌坑上游结皮段到跌坑底部的部分类似于阶梯,此段主要表现为势能的释放,其释放的势能一部分转化为动能,一部分为紊动和掺气耗能;而跌坑内部类似于深潭,此段一方面为动能恢复区,另一方面为紊动能耗散为热能^[14-16]。尽管下切型山区阶梯-深潭河流中,河床相对于细沟水流床面较为稳定,且床面结构对水流的阻力占据总阻力的主要部分,但其在床面结构的发育规律及水力特性方面仍具有一定的相似性。

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。天然降雨条件下,坡面细沟水流是非均匀非恒定渐变

流,受热力学中最小能耗原理。在横向上,其流道左右摆动,床面形态复杂多变;纵向上,出现跌坑与结皮相结合的床面形态,这些均增加了细沟水力参数测定的难度。鉴于此,试验前人为在坡面中部沿水流方向构造细沟雏形,引导细沟构造的发育,以此消除细沟流发育随机性的影响。

土壤质地对细沟侵蚀影响较大,随着土壤黏粒含量的增加,细沟侵蚀演化速度逐渐的减缓,为测定沟床形态变化与水力特性的耦合关系,本次试验土壤采用杨凌当地的壤土。对试验土壤风干测其机械组成,结果见表1。

表1 试验土颗粒机械组成		
Tab.1 Particle size distribution of tested soil		
粒径/mm	百分数/%	中径 d_{50} /mm
<0.002	24.13	—
0.002~0.02	39.05	—
0.02~0.05	29.32	0.015
0.05~0.25	4.25	—
>0.25	3.25	—

1.2 试验设计

装土前在试验土槽底部装填20 cm厚的细沙,细沙上层铺设土工布2层;土槽底部采用梅花形布置打孔,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,土壤平均干体质量控制 1.09 g/cm^3 ,实验填土采用天然野外土壤。试验前通过圆孔筛测量土壤团聚体重量百分比得到小于5 mm粒径占比70.03%,5~20 mm粒径占比23.34%,大于20 mm粒径占比6.63%。

试验小区采用可调坡度钢槽,小区结构尺度长 $\times$ 宽 $\times$ 深 $=6\text{ m}\times0.4\text{ m}\times0.6\text{ m}$,试验段有效长度为5.8 m;坡度分为6级,每级步长为 2° ,分别为 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 、 12° ,共6个坡度;根据野外实际降雨情况及汇流面积、雨强特征,本次试验设计冲刷流量为8、16、24、32、40 L/min;根据关中原野野外调查,试验前在坡面中部人为构造细沟雏形,其为宽8 cm、深4 cm的矩形断面。

试验每隔5 min测量水流流速、水流深度和水面宽度一次,沿土槽下部设置观测断面5个,分别为0+0.5 m、0+1.5 m、0+2.5 m、0+3.5 m、0+4.5 m。测流长度为1.0 m,采用 KMnO_4 染色示踪法观测断面表面优势流速(重复测量3次);采用精度为mm的钢尺测量水流中部水深和水面宽度。对试验小区每间隔5 min采集泥沙样,且进行体积与时间

的量测,烘干称重得到水流泥沙含量。

每场试验每间隔 20 min,停止放水,测得跌坑距坡顶的距离(铺设于土槽边沿精度为 mm 的米尺)及深度(采用精度为 mm 的测量排,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)。实验历时 100 min,采用试验结束时的跌坑深度、跌坑距坡顶的距离作为计算值。且此时采用可塑性的铁丝沿细沟底部塑造细沟纵断面形态,得到跌坑发育系数的计算值。

各组次试验条件下,细沟水流中的泥沙含量均已达到稳定(图 1),即认为其在特定流量、特定坡度下的细沟发育较为成熟。土壤前期含水量为 8.32%~12.54%,试验重复 1 次。

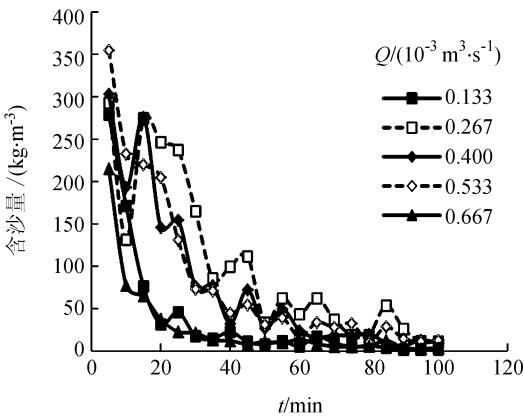


图 1 坡度为 8°时,水流含沙量随冲刷历时变化规律
Fig. 1 Law of flow sediment concentration change with flushing When the slope was 8°

1.3 细沟床面特征 - 跌坑

试验前人为在坡面中部沿水流方向构造一个细沟锥形,来引导细沟构造的发育。水流初始冲刷阶段床面出现一系列近似等间距的跌坑,跌坑深度较浅(图 2);随着冲刷历时的增加,跌坑逐步向下侵蚀,水流从上部跌落至跌坑中,此时跌坑发生向上的溯源侵蚀,侧壁的淘蚀及重力坍塌现象(图 3);之后跌坑在重力坍塌及冲刷作用下逐步展宽、发展扩大,最后趋于稳定(图 4)。且试验条件下,土壤中值粒径相对较小,而土壤团聚体结构强度较高,在细沟水流的侵蚀作用下,大颗粒团聚体不容易分散,最终形成细沟底部结皮和跌坑相互交错的沟床结构形态,其特征类似阶梯-深潭结构。且试验观测发现,当坡度较小时,跌坑沿细沟底部发育数量较少,且深度较浅,只有 1~2 cm 左右(图 5);随着坡度增加,跌坑数量逐步增加,深度也逐渐加深,最深跌坑甚至可达到 10 cm 左右,跌坑的消能能力逐步增强(图 6);坡度在 10°以上,细沟流道出现左右摆动的现象(图

7),这可能是在疏松的表土中,跌坑过大时发生了溯源侵蚀,可蚀土壤增多,水流含沙量急剧增加,而水流强度有限,挟沙能力降低,宏观上呈现出沟槽下切侵蚀减弱,横向调节摆动加剧^[10]。

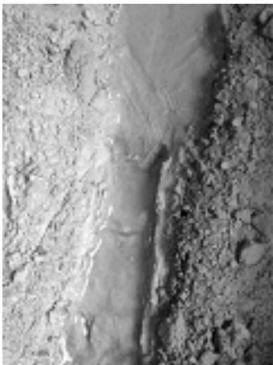


图 2 跌坑初始阶段
Fig. 2 Drop pit initial stage

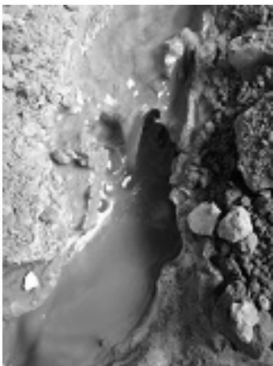


图 3 跌坑发育阶段
Fig. 3 Drop pit development stage



图 4 跌坑成熟阶段
Fig. 4 Drop pit mature stage

为研究问题方便,特定义细沟跌坑的几何特征参数见图 8,其跌坑间距为相邻跌坑最深处之间沿坡度方向的距离,跌坑平均间距为各个跌坑间距的平均值,用 L 表示;跌坑深度为上游结皮段至跌坑底部的垂向距离,平均跌坑深度为各个跌坑深度的平均值,用 H 表示。观测发现细沟床面跌坑深 1 cm 以下难于测量,因此测量忽略深度小于 1 cm 以下跌坑。



图5 低坡度跌坑数量较少、深度浅

Fig.5 Lower slope condition small,shallow depth of drop pit



图6 高坡度跌坑数量多、深度加深

Fig.6 Higher slope condition number,deep depth of drop pit



图7 高坡度细沟流道左右摆动

Fig.7 Higher slope condition rill flow swinging

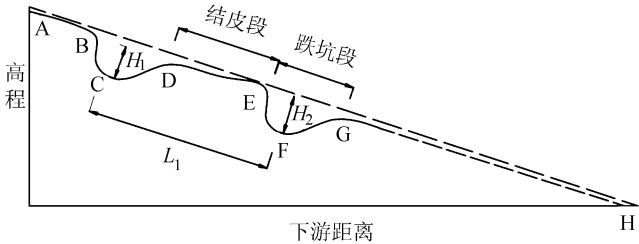


图8 跌坑、结皮发育示意图

Fig.8 Drop pit and crust development schemes

2 跌坑形成影响因素

2.1 跌坑平均深度与坡度和流量关系

跌坑平均深度是表征跌坑发育的关键参数,其变化特征反映了细沟床面形态对水流强度的耗散能力。徐江等通过改变河床泥沙最大粒径试验,得到阶梯-深潭的阶梯高度随着构成阶梯的泥沙颗粒最大粒径的增大而增大,而与坡度之间并没有明显的关系^[14];Wohl 在野外试验中也得到阶梯-深潭的阶梯高度随着构成阶梯卵石粒径的增大而增大^[17]。为分析细沟跌坑平均深度与坡度与流量的关系,将本试验各组次跌坑平均深度列出(表2)。

表2 各试验组次跌坑平均深度

Tab.2 Different number conditions of drop pit average depth

cm					
试验坡度/ $J = \sin \theta$	试验流量/($10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)				
	0.133 3	0.266 7	0.400 0	0.533 3	0.666 7
0.034 9	0.867	1.533	2.833	2.133	0.850
0.069 8	1.500	2.640	3.820	2.800	2.425
0.104 5	3.156	3.140	4.320	3.900	3.290
0.139 2	3.054	3.850	5.733	3.375	5.220
0.173 6	5.220	2.978	4.413	3.200	5.729
0.207 9	5.440	4.578	5.229	4.514	5.522

由表2可知,跌坑平均深度 H 位于0.85 ~ 5.73 cm 之间, H 在各组流量情况下,随坡度的增加呈现出增加的趋势;而相同坡度下,流量对其影响较小。究其原因主要为水流流经上游结皮段唇部时发生水跃,水流跌入下游跌坑的过程中产生强烈的漩涡,剧烈的掺混和紊动;流量越大,下游跌坑水深越大,水流混掺消耗的能量也就越多。因此,流量增加,对应的消能率也增加;即提供的能量多了,消耗的能量也增加了,跌坑的深度也就很难增加。

2.2 无量纲参数 L/H 与坡度和流量关系

跌坑平均深度并不能全部地反映跌坑的发育程度,跌坑平均间距也是跌坑发育程度的另一表现参数,于是采用 L/H 这个无量纲参数来代替单一参数 H 进行分析更为科学合理。 L 越小、 H 越大,表明跌坑发育越加成熟。因此, L/H 值越小,代表细沟床面形态越加复杂,消能效果越显著。表3 列出了各组次情况下 L/H 值。

由表3 分析可知,同一流量下, L/H 值随坡度的增加逐渐减小,意味着坡度的增加,跌坑数量和跌坑深度宏观上都表现出增加的趋势,而同一坡度下,

L/H 值与流量的关系不明显。

分析原因主要在于流量的增加,水流流速增加,水流能量的增加主要表现为水流动能的增加;而坡度增加,水流能量的增加主要表现为跌坑的塑造,发育与成熟,这也说明坡度越大,细沟床面形态越加复杂,水流消能效果越好。

表 3 各试验组次跌坑平均间距与平均深度比值
Tab.3 Different number condition ratio of drop pit average space and average depth

试验坡度/ $J = \sin \theta$	试验流量/ $(10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$				
	0.133 3	0.266 7	0.400 0	0.533 3	0.666 7
0.034 9	167.24	126.09	68.23	135.96	170.59
0.069 8	64.47	43.94	30.37	34.54	47.84
0.104 5	20.41	18.47	16.78	21.26	19.57
0.139 2	14.60	13.69	10.12	21.48	11.11
0.173 6	11.11	19.48	10.11	22.66	9.19
0.207 9	8.88	11.51	9.24	14.27	11.66

2.3 跌坑发育系数 SP 与坡度关系

为更好地描述跌坑的发育程度,特引入跌坑发育系数 SP ,其定义为细沟形态发育较为成熟后,其轮廓外沿的曲线长度与细沟床面底部首尾连线的直线长度的比值^[16]。以图 5 所示跌坑、结皮段为例,发育系数 SP 表达式为:

$$SP = \frac{(AB + BCD + DE + EFG + GH)}{AH} \quad (1)$$

由式(1)可见,沟床中跌坑未发育时, $SP = 1$; 沟床中有连续结皮、跌坑发育时, $SP > 1.11$ ^[14]。试验观察发现各组次水槽细沟河床都发育有连续的跌坑、结皮段,其值 $1.01 < SP < 1.14$ 。

由图 9 分析可知,跌坑发育系数 SP 与坡度呈正势变化规律。总体上,随着坡度的增加跌坑发育系数也增加。这说明随着坡度的增加,为保持河床稳定,需要更多的跌坑、结皮系列消耗水流能量,故跌坑发育的更加显著。

由图 9 还可以看出,小坡度时点据较为密集,坡度大时点据较为分散。说明大坡度下,流量对跌坑发育的效应就会凸显出来,究其原因坡度较小时跌坑发育不显著,跌坑数量少、跌坑深度浅,跌坑发育系数的值都较小;而当坡度较大时,跌坑发育显著,跌坑数量变多、跌坑深度加深,跌坑发育系数的值变大,由于受到水流强度与细沟床面形态的互馈机制的影响,其点据在大坡度下分布较为分散。

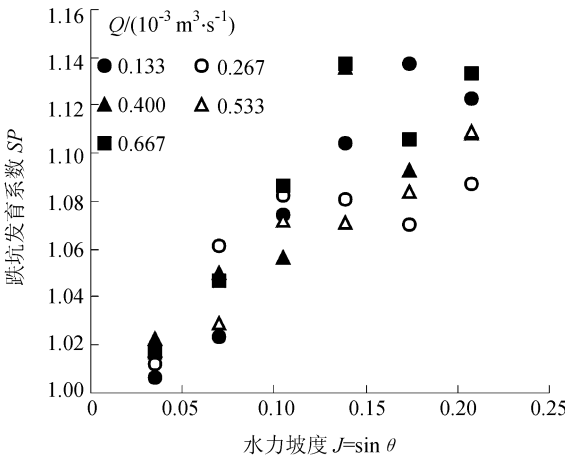


图 9 跌坑发育系数随坡度的关系
Fig.9 Relationship between drop pit development coefficient and slope

3 跌坑的水动力学作用

3.1 跌坑发育系数 SP 与用曼宁糙率系数 n 之间关系

细沟流道在水流的作用下,通过发育跌坑,产生结皮来增大床面阻力,消杀水流能量,从而使自身发育达到稳定,水流输沙趋于动态稳定。从能量角度分析可知,水流阻力主要来自 3 个方面:1) 沙粒本身对水流的阻碍作用;2) 沟槽形态对水流的阻碍作用;3) 水流挟带泥沙消耗的能量^[4,18]。Curran 等指出在山区河流中沙粒本身对水流的阻碍和水流挟带泥沙消耗的能量总共占水流总阻力的不到 10%,所以该结构的阻力组成主要是形态阻力^[19]。试验采用曼宁糙率系数 n 的变化来表征水流阻力变化特征,以期建立与跌坑发育系数的响应关系,其中曼宁糙率系数 n 的计算式为:

$$n = (R^{2/3} J^{1/2})/v \quad (2)$$

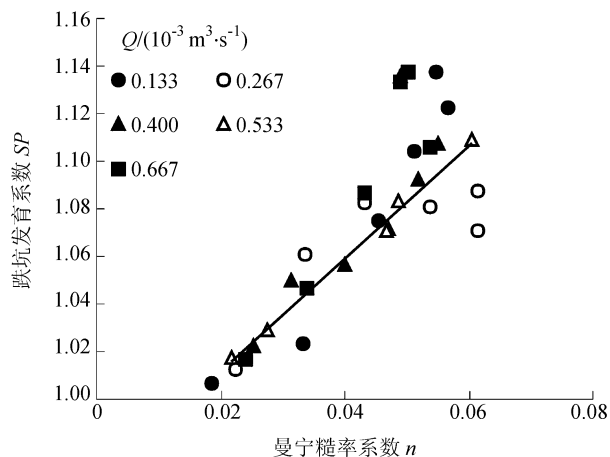
式中: R 为水力半径, m ; J 为水力坡度,对于均匀流, $J = \sin \theta$, θ 为水槽坡度; v 为断面平均流速, m/s ,其值等于平均优势流速乘以 0.75。

分析图 10 发现, SP 随曼宁糙率系数 n 的增加而增加,且坡度越大, SP 、 n 值都越大。这就说明了 SP 越大,跌坑发育越完全,其对水流的阻力作用就越强烈,消耗的水流能量就越多;且图 10 中观察发现二者之间近似是一种线性关系,表明跌坑发育系数可以作为表征细沟阻力的参数。

通过拟合得到两者关系式为:

$$SP - 1 = 2.627 4(n - 0.014 7), R^2 = 0.741 3 \quad (3)$$

令 $SP = 1$, 即没有冲刷出跌坑,得出 $n = 0.014 7$ 。这就表明在没有跌坑发育时,细沟的初始

图10 曼宁糙率系数 n 与 SP 之间关系Fig. 10 Relationship between the Manning roughness coefficient n and SP

曼宁阻力系数为 0.014 7;当细沟沟槽随着坡度的增加逐渐发育出跌坑,曼宁阻力系数开始急剧增加,最大能达到初始曼宁阻力系数的数倍,说明跌坑发育造成的形态阻力占据细沟总阻力的大部分,同时也说明跌坑对水流耗能作用至关重要。且其消能转化过程水流动能在跌坑前端达到最大,跌入跌坑过程中,动能减小,水潭消能作用显现;动能降到最低,紊动能达到最大,最后在跌坑出口紊动能通过漩涡的逐级分解最终耗散成热能。

3.2 消能率的响应因素

对下切型山区河流系统,阶梯-深潭系统最大消能率可达到 91%^[20],可忽略侵蚀耗能作用。而对于本试验细沟流的消能方式主要包括跌坑形态阻力耗能和水流剥离、输移泥沙的侵蚀耗能两部分,其中跌坑耗能方式占主要作用。由水力学知识可知,整个坡面细沟的总能量可通过任意 2 个计算断面进行分析:

$$\eta = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E - E_0}{E} \quad (4)$$

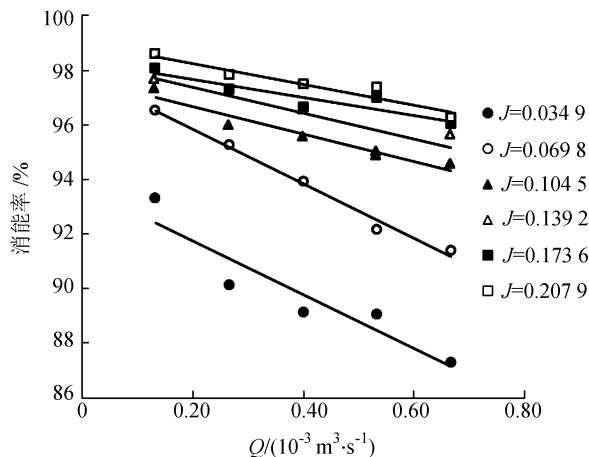
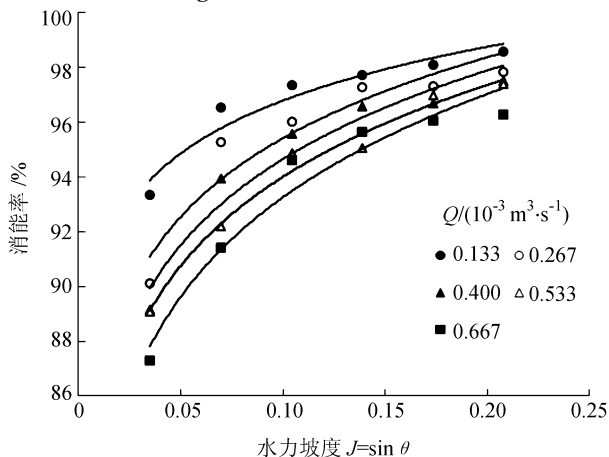
E 和 E_0 的计算公式为:

$$E = \frac{\alpha_1 v_1^2}{2g} + h_1 + H \quad (5)$$

$$E_0 = \frac{\alpha_2 v_2^2}{2g} + h_2 \quad (6)$$

式中: η 为消能率,%; E 和 E_0 分别为进水口和出水口断面总能量, m ; v_1 和 v_2 为二者随时间断面平均流速, m/s ; h_1 和 h_2 为二者随时间断面平均水深, m ; H 为二者断面高度差, α_1 和 α_2 分别为进水口与出水口的动能修正系数,本试验近似取值为 1.0; g 为重力加速度, m/s^2 。

由图 11 ~ 12 可知,同一坡度下,消能率随流量的增加呈线性减小的趋势,同一流量下,消能率随坡度的增加呈幂函数增加的趋势。分析可知,随着流量的增大,土壤团聚体逐渐被水流淹没,边界形成的阻力和边界凸起造成的水流翻滚而导致的能量消耗就会大大的减少;而各流量工况下,跌坑发育成熟度相差不大,输移泥沙的能耗也就差别不大,因此,消能率会随着流量的增加而减小;随着坡度的增加,跌坑发育系数增加,跌坑发育更加成熟,水流阻力增大,水流能量消耗增大,且坡度增加,水流剥离、输移的泥沙就越多,水流能量也消耗得越多,故消能率随坡度的增加呈现增加的趋势。

图11 不同坡度下 η 与流量之间关系Fig. 11 Different slope relationship between η and discharge图12 不同流量下 η 与坡度之间关系Fig. 12 Different discharge relationship between η and slope

3.3 跌坑发育系数 SP 与消能率关系

李文哲等指出 SP 值越大,河床结构发育越好,从而其消能效率越高^[20]。徐江等得出河床结构发育系数与消能率之间有正相关关系^[14]。图 13 绘制

出本实验条件细沟的消能率与跌坑发育系数的关系。

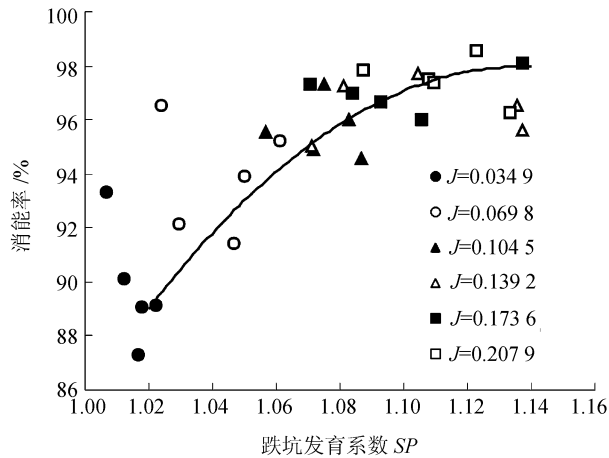


图 13 坑发育系数与消能率之间关系

Fig. 13 Relationship between η and drop pit development coefficient

由图 13 中可见,消能率随 SP 的增加呈现幂函数的增加趋势。前面分析已知,跌坑发育越成熟,阻力也就越大,即随着阻力的增加,水流消耗的能量就越多。因此,消能率随 SP 的增加而增加,且分析发现在小坡度下,随 SP 的增加,跌坑消能效果显著;大坡度下,随 SP 增加,消能率增加幅度很小,说明跌坑发育到一定程度后消能效果便不再明显。阅读文献总结得出山区河流下切型阶梯-深潭系统消能率与坡降、糙率、粒径和阶梯高度成正比,与上游来水流量成反比^[20],分析本试验可知跌坑消能率与坡度、糙率、跌坑深度成正比,与流量成反比,对比二者的消能率有相同的响应关系。至于跌坑消能率与泥沙粒径之间的关系,可以通过改变泥沙粒径或加入不同粒径的卵石做进一步试验分析。

4 结 论

跌坑是坡面土壤特性和细沟水流水动力学参数的耦合作用而形成,基于山区河流床面结构发育理论探讨了细沟水流沟床结皮跌坑发育规律,并对跌坑发育的影响因素及跌坑的水动力学作用进行分析。

1) 同一流量下,跌坑平均深度随坡度的增加而增加, L/H 值随坡度的增加而减小,说明跌坑发育随着坡度的增加,发育越加成熟,且两者均与流量的相关性较小。

2) 跌坑发育系数 SP 与坡度成正比关系,小坡度时,流量对其影响较小;随着坡度的增加,流量对其影响逐渐凸显,其值 $1.01 < SP < 1.14$ 。 SP 越大,

即跌坑发育越完全,曼宁糙率系数随 SP 的增加而增加。

3) 同一坡度下,消能率随流量的增加而减小,两者表现出线性相关关系;同一流量下,消能率随坡度的增加而增加,两者表现出幂函数关系,消能率与 SP 呈正相关关系。其值范围在 87.28% ~ 98.58% 之间,表明该沟床结构具有较高的消能效果,从而促使水流挟沙与床面结构达到动态平衡,水流含沙量趋于稳定值,出现滩槽结合的独特结构形式。

参考文献:

- [1] Wang Longsheng, Cai Qiangguo, Cai Chongfa, et al. Loess slope surface groove shape change and the relationship between the flow velocity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 111 - 117. [王龙生, 蔡强国, 蔡崇发, 等. 黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 111 - 117.]
- [2] Zhang Pan, Yao Wenyi. Simulated rainfall conditions downhill side groove shape evolution and the quantitative method[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(1): 51 - 58. [张攀, 姚文艺. 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.]
- [3] Li Peng, Li Zhanbin, Zheng Liangyong. Hydrodynamics process of soil erosion and sediment yield by runoff on loess slope[J]. Advances in Water Science, 2006, 17(4): 444 - 449. [李鹏, 李占斌, 郑良勇. 黄土坡面径流侵蚀产沙动力过程模拟与研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 444 - 449.]
- [4] Li Zhanbin, Qin Baishun, Kang Wei, et al. Indoor experimental studies on hydrodynamic characteristics of runoff in rill erosion procession steep slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(6): 64 - 68. [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.]
- [5] Zhang Yongdong, Wu Shufang. The loess steep slope rill erosion dynamic development process and its experimental study on critical power conditions[J]. Journal of Sediment Research, 2013(2): 25 - 32. [张永东, 吴淑芳. 黄土陡坡细沟侵蚀动态发育过程及其发生临界动力条件试验研究[J]. 泥沙研究, 2013(2): 25 - 32.]

- [6] He Jijun, Lyu 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. [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.]
- [7] Wang Longshen, Cai Qiangguo. Loess slope surface groove between the groove and water flowing water dynamics research[J]. Journal of Sediment Research, 2013(6): 45–52. [王龙生, 蔡强国. 黄土坡面细沟与细沟间水流水动力学特性研究[J]. 泥沙研究, 2013(6): 45–52.]
- [8] Li Junlan, Cai Qiangguo, Sun Liying, et al. Reviewing on factors and critical conditions of rill erosion[J]. Progress in Geography, 2010, 29(11): 1319–1325. [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.]
- [9] Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effect of rainstorm patterns and soil erosion control practices on soil and water loss in small watershed on loess plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2): 169–175. [晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. 农业机械学报, 2014, 45(2): 169–175.]
- [10] Sha Jide, Bai Qingjun. Stickness soil slope surface of rill flow hydraulic characteristics experimental study[J]. Journal of Sediment Research, 2001(6): 39–43. [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.]
- [11] Ding Wenfeng, Li Zhangbin. Slope rill erosion process of water dynamic characteristics test research[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(3): 72–75. [丁文峰, 李占斌. 坡面细沟侵蚀过程的水动力学特征试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(3): 72–75.]
- [12] 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. [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.]
- [13] 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): 30–36. [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, 2001, 30(1): 30–35.]
- [14] Xu Jiang, Wang Zhaoyin. Ladder-deep pools formation and mechanism of action[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(10): 48–54. [徐江, 王兆印. 阶梯–深潭的形成及作用机理[J]. 水利学报, 2004(10): 48–54.]
- [15] 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. [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.]
- [16] Yu Guoan, Wang Zhaoyin, Zhang Kang, et al. Artificial ladder-deep pools improve incised river aquatic habitats and ecological role[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 161–167. [余国安, 王兆印, 张康. 人工阶梯–深潭改善下切河流水生栖息地及生态的作用[J]. 水利学报, 2008, 39(2): 161–167.]
- [17] Wohl E, Madsen S, MacDonald L. Characteristics of log and clast bedsteps in step pool streams of northwestern Montana[J]. Geomorphology, 1997, 20(1): 1–10.
- [18] Zhang Keli. Distribution of loess slope surface erosion and sediment yield and rainfall characteristic relation research[J]. Journal of Sediment Research, 1991(4): 39–46. [张科利. 黄土坡面侵蚀产沙分配及其降雨特征关系的研究[J]. 泥沙研究, 1991(4): 39–46.]
- [19] Curran J H, Wohl E E. Large woody debris and flow resistance in step-pool channels[J]. Geomorphology, 2003, 51(3): 141–157.
- [20] Li Wengzhe, Wang Zhaoyin, Li Zhiwei, et al. Experiments on energy dissipation mechanism of step-pool system[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(5): 537–546. [李文哲, 王兆印, 李志威, 等. 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.]

(编辑 张琼)