

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.020

黄土坡面细沟流土壤侵蚀机理研究

马小玲¹ 张宽地^{1,2} 董旭¹ 杨明义² 杨帆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. 西北农林科技大学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)

摘要: 细沟侵蚀是黄土坡面最主要的侵蚀方式之一, 土壤剥离过程是细沟侵蚀中的重要环节。采用6种坡度(2°、4°、6°、8°、10°、12°)、5种流量(8、16、24、32、40 L/min)组合冲刷试验, 系统研究了黄土坡面细沟流土壤剥蚀率与水动力学和床面形态的耦合关系。结果表明: 土壤剥蚀率与流量、坡度均呈幂函数增加关系, 且坡度对土壤剥蚀率的影响更大; 不同类型土壤无量纲剥蚀率与无量纲流速之间存在分区现象, 表明土壤侵蚀受到除泥沙粒径外其他因素的影响; 不同类型土壤无量纲剥蚀率与无量纲切应力双对数函数呈线性增加关系, 且不存在分区; 不同类型土壤无量纲剥蚀率与无量纲单位水流功率存在分区; 土壤剥蚀率随跌坑发育系数的增加呈幂函数增加趋势, 而土壤剥蚀率随 L/H 增加呈幂函数减小趋势, 说明床面形态越加复杂、跌坑发育越加成熟, 土壤侵蚀就越剧烈。研究结果对细沟水流侵蚀机理的探究具有一定的理论价值, 对黄土坡面水土流失治理及生态修复均具有一定的指导意义。

关键词: 黄土坡面; 细沟侵蚀; 细沟水动力学; 土壤剥离率; 床面形态

中图分类号: S279.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)09-0134-07

Study of Rill Flow Soil Erosion Mechanism on Loess Slope Surface

Ma Xiaoling¹ Zhang Kuandi^{1,2} Dong Xu¹ Yang Mingyi² Yang Fan¹

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

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

Abstract: Rill erosion is one of the most important slope erosion in loess area, and soil detachment process is an important link of rill erosion. However, the existing studies only are based on a single soil conditions, while the simple relationship between soil detachment rate and water dynamics cannot fully reflect the coupling mechanism of the soil detachment rate under different types of soil. More importantly, the existing research involves little on the relationship between the detachment rate and bed surface morphology. The article adopted the combination of six kinds of slope gradients (2°, 4°, 6°, 8°, 10° and 12°) and five discharges (8 L/min, 16 L/min, 24 L/min, 32 L/min, 40 L/min) to do scouring experiment. The results showed that: soil detachment rate had power function relationship with discharge and slope, and slope had a greater influence than discharge; Different types of non-dimensional soil detachment rate and non-dimensional unit stream power had zoned phenomenon with non-dimensional flow velocity which showed that soil detachment had other influence factors except diameter of particles; Non-dimensional soil detachment rate and non-dimensional shear stress double-log function had a linear increase relationship, and there was no partition; Soil detachment rate had a trend of increase power

收稿日期: 2016-07-11 修回日期: 2016-08-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579214)、中央高校基本科研业务费专项资金项目(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项目(A314021402-1619)和流域水循环模拟与调控国家重点实验室开放基金项目(IWHR-SKL-2014)

作者简介: 马小玲(1993—),女,博士生,主要从事水土保持及土壤侵蚀研究,E-mail: 15002981284@163.com

通信作者: 张宽地(1978—),男,副教授,博士生导师,主要从事水工水力学及坡面水流研究,E-mail: zhangkuandi428@126.com

function with the increase of down hole development coefficient, and the soil detachment rate had a power function decreasing trend with the L/H increases. This results show that the more complex bed surface morphology increased, the more mature down hole developed increasingly and the more intense soil detachment is. The results of the study have some theoretical value to the mechanism of sediment transport on rill flow erosion, moreover it has a certain guiding significance on loess slope surface soil detachment control and ecological restoration.

Key words: loess hillslope; rill erosion; rill water dynamics; soil detachment rate; bed form

引言

细沟侵蚀是指坡面上形成细小沟道的情况下,径流对细沟沟壁、沟底、沟头土壤的分散、冲刷和搬运过程,侵蚀产沙包括土壤剥离、输移和沉积3个过程^[1-2],其中土壤剥离是分析细沟土壤侵蚀的重要部分,径流剥离土壤的能力与细沟水流的水动力学特性和坡面土壤情况密切相关^[3]。因此,研究黄土坡面细沟流土壤剥离能力与各水动力学参数以及床面形态的关系,对认识土壤侵蚀过程具有重要作用^[4-8]。

国内外已有的研究多用水流剪切力、单位水流功率、水流功率、过水断面单位能耗等水动力学参数来描述水流剥蚀土壤过程。1965年LYLE等^[9]首次用水槽试验研究了土壤剥离速率与径流剪切应力间的关系。NEARING等^[10]采用变坡水槽得到了水深、坡度与土壤剥蚀率间存在对数函数关系,且土壤剥蚀率的相关程度为坡度大于水深。张光辉^[11]采用不同坡度与流量组合试验得到土壤剥蚀率与坡度、流量、水深之间存在的函数关系,土壤剥蚀率随流量、坡度的增加而增加,且流量对土壤剥蚀率的影响程度大于坡度。李占斌等^[12]根据变坡水槽径流冲刷试验发现土壤剥蚀率与坡面能量损耗存在函数关系。张科利等^[13]根据水槽试验结果,建立了基于水流剪切力的径流剥蚀能力公式。王瑄等^[14]通过径流冲刷试验得出土壤剥蚀率与水流功率呈线性关系,且存在土壤剥蚀的临界水流功率,只有水流功

率达到土壤的临界水流功率土壤才会发生侵蚀。究竟哪一个水动力学参数更能准确地描述土壤分离过程,或各自的适用范围如何,值得进行进一步研究。现有阶段研究主要集中在土壤剥蚀率与水动力学关系方面,对土壤剥蚀率与床面形态耦合关系研究很少,因此本文通过不同坡度的放水冲刷试验分析土壤剥蚀率与水动力学及床面形态之间的关系,以期细沟侵蚀预报、水土流失防治措施的布置提供理论依据。

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,据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^[15]。纵向上,出现跌坑与结皮相结合的床面形态,这些均增加了细沟流水力参数测定的难度^[16]。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(图1)。

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

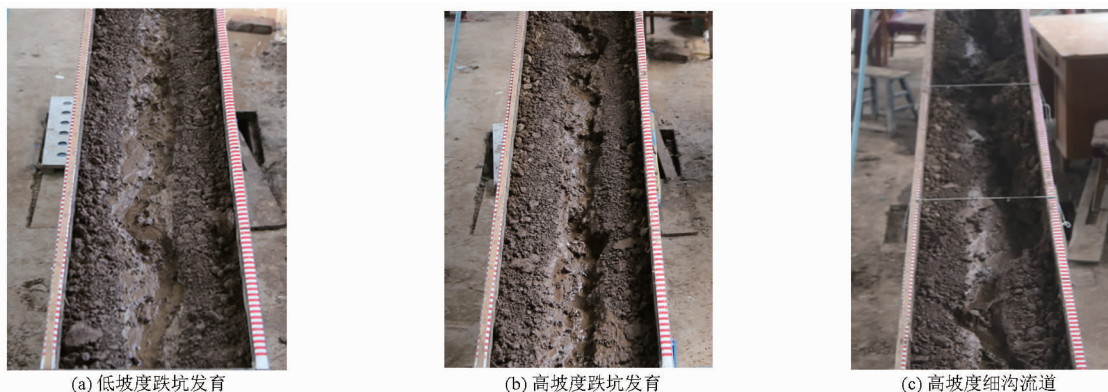


图1 试验照片

Fig. 1 Testing photos

表1 试验土壤颗粒机械组成

Tab.1 Particle size distribution of testing soil

粒径/mm	(0, 0.002]	(0.002, 0.02]	(0.02, 0.05]	(0.05, 0.25]	(0.25, ∞)
百分数/%	24.13	39.05	29.32	4.25	3.25
中径 d_{50} /mm	0.015				

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,土壤平均干体积质量控制在 1.09 g/cm^3 。

试验采用流量和坡度组合冲刷试验。选取 2° 、 4° 、 6° 、 8° 、 10° 、 12° 共 6 个坡度进行研究,主要是为缓坡耕地土壤流失治理提供依据;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,设计冲刷流量为 8、16、24、32、40 L/min,共计 30 场冲刷试验。

试验小区采用可调坡度钢槽,小区结构尺度(长×宽×深)为 $6 \text{ m} \times 0.4 \text{ m} \times 0.6 \text{ m}$,试验段有效长度为 5.8 m,沿试验小区土槽下部设置 5 个观测断面,距离槽顶分别为 0.5、1.5、2.5、3.5、4.5 m,测流长度为 1.0 m。每个断面处分别测量断面表面优势流速(3 次)、水深和水面宽度(1 次);试验总历时 100 min,试验过程中每间隔 20 mm 即停止放水,测得跌坑距坡顶的距离(铺设于土槽边沿精度为毫米的米尺)及跌坑深度(采用精度为毫米的测量排,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)。

2 土壤剥蚀率影响因素

土壤剥蚀率定义为单位时间、单位面积被剥蚀掉的土壤质量,土壤剥蚀率越大,表明土壤被侵蚀的程度越剧烈。主要包括溯源侵蚀、下切侵蚀以及边壁的侧蚀冲刷^[17]。为分析土壤剥蚀率与坡度和流量的关系,各组次试验结果如表 2 所示。

由表 2 分析发现,土壤剥蚀率随着流量和坡度的增加基本都呈增加的趋势,在同一流量不同坡度下增加了 7.60~18.81 倍,而在同一坡度不同流量下增加了 1.47~2.34 倍。由此可见,坡度对土壤剥蚀率的影响程度远远大于流量。坡度是影响细沟侵蚀的重要因素,随着坡度的增加,细沟侵蚀量和细沟平均深度均随之增加^[18]。但从表 3 方差分析可知坡度和流量与剥蚀率 Sig. 值均小于 0.01,表示坡度和流量与土壤剥蚀率均极显著相关,说明虽然流量

表2 各试验组次土壤剥蚀率 D_r

Tab.2 Different number condition of soil detachment rate

试验坡度/ rad	试验流量/($\text{L} \cdot \text{s}^{-1}$)				
	0.133 3	0.266 7	0.400 0	0.533 3	0.666 7
0.034 9	2.16	7.84	5.72	3.26	4.60
0.069 8	7.33	20.75	22.46	20.21	26.65
0.104 5	16.64	28.07	40.25	46.38	29.25
0.139 2	27.40	55.65	53.59	58.67	40.34
0.173 6	29.28	59.03	58.74	71.20	68.78
0.207 9	30.22	59.64	55.79	61.33	65.27

对土壤剥蚀率的影响相对较小,但其对土壤剥蚀率仍有极显著影响。由此通过 SPSS 软件分析发现土壤剥蚀率与坡度、流量均呈幂函数关系,关系式为

$$D_r = 26853.44Q^{0.461}J_r^{1.446} \quad (R^2 = 0.891) \quad (1)$$

式中 D_r ——土壤剥蚀率, $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

Q ——试验流量 J_r ——试验坡度

文献[19]与式(1)坡度项指数相差很小,但流量指数比本文大 4.43 倍,说明其试验土壤更易受到流量的影响。这是由于其试验土壤主要为粉壤土,而本试验粘性土占比较大,土壤颗粒组成对土壤抗蚀性有重要影响,土壤颗粒越细,更容易形成团状结构体,抗蚀能力较高。

表3 方差分析

Tab.3 Variance analysis

变异来源	SS	DF	MS	$F_{0.05}$	Sig.
坡度	10 945.42	5	2 189.08	40.94	0.000
流量	2 272.23	4	568.06	10.63	0.000

注:SS 代表方差,DF 代表自由度,MS 代表均方差。

3 土壤剥蚀率与水动力学关系

为方便今后土壤侵蚀的研究,将水流流速、水流切应力、单位水流功率和水流剥蚀率进行了无量纲化,关于水流动力学参数的无量纲化计算式分别为

$$u^* = u / \sqrt{(\gamma_s / \gamma - 1)gd_{50}} \quad (2)$$

$$\theta = \gamma h J / [(\gamma_s - \gamma)d_{50}] \quad (3)$$

$$p^* = uJ / \sqrt{gh} \quad (4)$$

水流无量纲剥蚀率为

$$\Phi = \frac{D_r}{\gamma_s \sqrt{\frac{\gamma_s - \gamma}{\gamma}gd_{50}^3}} \quad (5)$$

式中 u^* ——无量纲水流平均流速
 θ ——无量纲水流切应力
 p^* ——无量纲单位水流功率
 Φ ——无量纲剥蚀率
 u ——水流平均流速, m/s
 γ ——水的容重, g/cm³
 J ——能坡, rad h ——水深, m
 γ_s ——泥沙容重, g/cm³
 g ——重力加速度, 取 9.81 m/s²

3.1 无量纲土壤剥蚀率与无量纲水流流速关系

流速是土壤侵蚀研究中的重要因子,是计算坡面汇流和冲刷的基础,主要受地表特征、坡度和坡面水深(或坡面流量)3方面影响^[20],同时也是剥离土壤、输移泥沙的关键因素,因而其在土壤分离过程模拟中占有重要地位。为解决实际问题,一般将细沟流视为一维恒定非均匀的沿程变量流^[21]。为统一量纲,方便试验对比研究,分析无量纲水流流速与无量纲土壤剥蚀率之间关系,结果如图2所示。

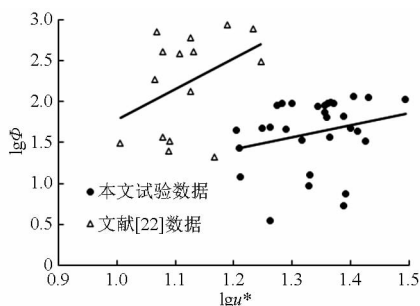


图2 不同土壤类型下无量纲土壤剥蚀率与无量纲水流流速双对数关系

Fig.2 Double logarithmic diagram of non-dimensional soil detachment rate and non-dimensional flow velocity under different types of soil

由图2可知,不同土壤类型下无量纲土壤剥蚀率与无量纲水流流速之间存在分区现象,经SPSS回归分析得出无量纲剥蚀率与无量纲流速呈幂函数关系,关系式为

$$\Phi = 0.0117u^{*3.7146} \quad (R^2 = 0.5609) \quad (6)$$

$$\Phi = 0.4787u^{*1.451} \quad (R^2 = 0.5593) \quad (7)$$

式(6)为文献[22]试验数据,式(7)为本文试验数据。且由式(6)、(7)分析知,文献[22]试验幂指数大于本试验幂指数,原因是其试验土壤中值粒径为0.05 mm,而本试验土壤中值粒径为0.015 mm,根据马鞍形 shields 曲线可知,当泥沙中值粒径为0.20 mm时,起动流速最小,在最低起动中值粒径前粘结力起主要作用,因此中值粒径较大的土壤颗粒更易被携带在水流中,由此造成了文献[22]试验数据无量纲流速幂指数大于本文试验数据。

3.2 无量纲土壤剥蚀率与无量纲径流切应力关系

由水力学和流体力学理论可知,坡面径流在流动过程中,沿坡面梯度方向产生一种作用力,即径流切应力,且径流切应力与坡面土壤侵蚀密切相关^[21]。文献[22]采用不同坡度的冲刷试验得到:土壤剥蚀率与径流切应力呈幂函数关系。本文分析了不同土壤类型下无量纲土壤剥蚀率与无量纲径流切应力的关系,结果如图3所示。

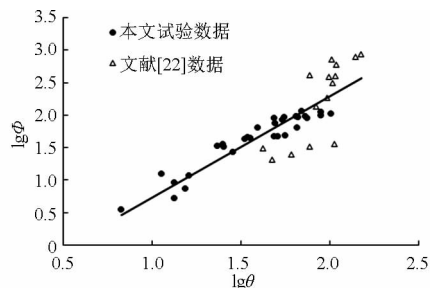


图3 不同土壤类型下无量纲土壤剥蚀率与无量纲径流切应力双对数关系

Fig.3 Double logarithmic diagram of non-dimensional soil detachment rate and non-dimensional shear stress under different types of soil

从图3可知,不同类型土壤无量纲剥蚀率与无量纲径流切应力之间不存在分区现象,且通过分析,二者呈幂函数关系,其关系式为

$$\Phi = 0.1493\theta^{1.5629} \quad (R^2 = 0.7591) \quad (8)$$

由此,可采用式(8)来近似预测不同类型土壤下的无量纲剥蚀率,这是由于在细沟流流路稳定后,可以通过流量和径流宽等换算得出径流深,从而计算出径流无量纲切应力,从观测角度可知无量纲切应力较无量纲剥蚀率更易于获得,所以,可选择无量纲切应力进行土壤侵蚀预测,但预测精度较低。试验结果与文献[21]研究结果相似,同为幂函数关系,且幂指数相差较小。

3.3 无量纲土壤剥蚀率与无量纲单位水流功率关系

单位水流功率于1972年被YANG等^[23]定义为:作用于泥沙床面的单位质量水体势能随时间消耗减少的变化率,表示单位质量水体势能消耗的快慢。GOVERS等^[24]认为,单位水流功率相对水流切应力容易确定,因此,推荐用单位水流功率进行坡面流剥蚀能力的计算。本文无量纲剥蚀率与无量纲单位水流功率关系如图4所示。

从图4可见,不同土壤类型下无量纲土壤剥蚀率与无量纲单位水流功率之间存在分区现象,经回归分析得出无量纲剥蚀率与无量纲单位水流功率呈幂函数关系,关系式为

$$\Phi = 3863p^{*1.6902} \quad (R^2 = 0.8409) \quad (9)$$

$$\Phi = 1198p^{*1.502} \quad (R^2 = 0.8100) \quad (10)$$

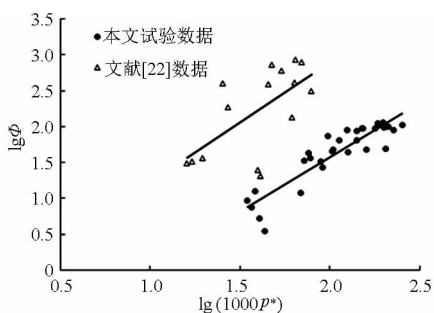


图4 不同土壤类型下无量纲土壤剥蚀率与无量纲单位水流功率双对数关系

Fig.4 Double logarithmic diagram of non-dimensional soil detachment rate and non-dimensional unit stream power under different types of soil

式(9)为文献[22]试验数据,式(10)为本文试验数据。由式(9)、(10)可以发现,两式幂指数相差很小,且相关性较高。对比无量纲剥蚀率与无量纲流速、无量纲切应力、无量纲单位水流功率关系,按照决定系数由大到小依次为:无量纲流速、无量纲切应力、无量纲单位水流功率,因此采用单位水流功率来近似计算土壤剥蚀率最具有代表性。

4 土壤剥蚀率与床面形态关系

现有研究主要集中在土壤剥蚀率与水动力学参数的关系上,但对于土壤剥蚀率与床面形态之间的关系研究甚少,本试验粘性土含量较高,在水流冲刷作用下易形成结构强度较高的土壤团聚体,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^[25]。

为研究方便,定义细沟跌坑的几何特征参数如图5所示,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。床面形态结构如图5所示。



图5 跌坑、结皮发育示意图

Fig.5 Drop pit and crust development schemes

为描述床面形态跌坑的发育程度,定义跌坑发育系数为细沟形态发育较为成熟时,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^[26],以图5所示跌坑、结皮段为例,发育系数 S_p 表达式为

$$S_p = \frac{l_{AB} + l_{BCD} + l_{DE} + l_{EFG} + l_{GH}}{l_{AH}} \quad (11)$$

式中 l_{AB} 表示点 A 、 B 间长度,其余类推。

由式(11)可见,沟床中跌坑未发育时, $S_p = 1$;本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,且 $1.01 < S_p < 1.14$ 。

4.1 土壤剥蚀率与跌坑发育系数 S_p 关系

跌坑发育系数代表了床面形态的发育程度,其值越大,表明土壤被水流侵蚀的越剧烈,因此,土壤侵蚀程度与床面形态发育程度必然存在一定关系,两者关系如图6所示。

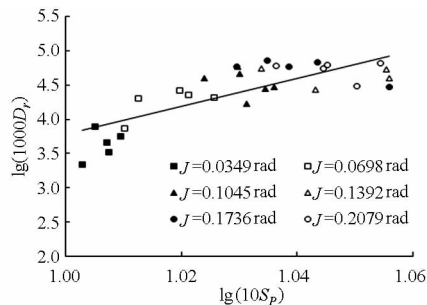


图6 土壤剥蚀率与跌坑发育系数关系

Fig.6 Relationship between soil erosion rate and down hole development coefficient figure

由图6分析可知,土壤剥蚀率与跌坑发育系数 S_p 双对数函数曲线近似呈线性增加关系,即床面形态发育越成熟,土壤侵蚀越剧烈,且随着坡度的增加, D_r 、 S_p 均增加。这是由于随着坡度增加,径流能量增加,径流冲刷坡面土壤就越剧烈,由于受到径流强度和床面形态相互制约的关系,床面由一种不成熟的形态逐步发育为结构强度更高、成熟度更好的构造来抵抗能量的增加,由此得到了一种新的平衡态,而此时 D_r 、 S_p 均增大。

4.2 土壤剥蚀率与 L/H 关系

跌坑的发育还可以采用跌坑的平均间距 L 与跌坑的平均深度 H 的比值来描述。 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,消能效果越加显著。图7显示了土壤剥蚀率与 L/H 之间关系。

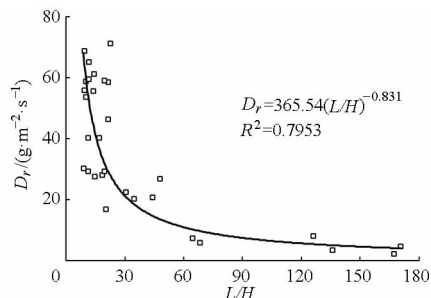


图7 土壤剥蚀率与 L/H 之间的关系

Fig.7 Relationship between soil erosion rate and L/H value

由图7分析可知,随着 L/H 逐渐增加,土壤剥蚀率出现幂函数减小的趋势,表示跌坑数量和跌坑深度宏观上都表现出增加趋势时,土壤剥蚀率也增加,可见细沟底部发育形态的复杂性与土壤侵蚀的剧烈程度相辅相成。且对试验结果进行观测发现 L/H 小于20时,土壤剥蚀率增加了6.32倍, L/H 大于20时,土壤剥蚀率仅增加了1.35倍。且 L/H 越小,曲线切线斜率越大,即跌坑发育越成熟,土壤被剥离的程度越剧烈。造成此现象的原因可能是由于 L/H 越小,表明坡度越大,此时坡度增加,造成土壤颗粒的稳定性降低,在水流冲刷且试验坡度达到一定程度后会出现细沟侧壁土壤的崩塌现象,从而造成在大坡度下土壤剥蚀急剧增加的现象。

5 结论

(1)土壤剥蚀率随坡度、流量的增加而增加,且与二者呈幂函数关系,坡度对其影响更为显著一些。土壤类型不同,坡度和流量的影响作用也有差异,粘性含量越高的土壤,抗蚀能力更好。

(2)分析了无量纲土壤剥蚀率与无量纲流速、无量纲切应力和无量纲单位水流功率的关系,得出无量纲剥蚀率与三者均表现为幂函数关系,且相关程度由小到大依次为:无量纲流速、无量纲切应力、无量纲单位水流功率。

(3)土壤剥蚀率与跌坑发育系数及 L/H 均表现出幂函数关系,表明跌坑发育越成熟、床面形态越复杂,相应的土壤剥蚀率越大。

参 考 文 献

- 1 王龙生,蔡强国,蔡崇法,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(11): 110-117.
WANG Longsheng, CAI Qiangguo, CAI Chongfa, et al. Morphological changes of rill on loess slope and its relationship with flow velocity[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(11): 110-117. (in Chinese)
- 2 赵宇,陈晓燕,米宏星,等. 估算细沟含沙水流剥蚀率的改进方法[J]. 农业工程学报, 2014,30(15): 174-181.
ZHAO Yu, CHEN Xiaoyan, MI Hongxing, et al. Improved approach for estimation of detachment rate of rill sediment loading flow [J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(15): 174-181. (in Chinese)
- 3 谭贞学,王占礼,刘俊娥,等. 黄土坡面细沟径流输沙对水动力学参数的响应[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(5): 1-6.
TAN Zhenxue, WANG Zhanli, LIU Jun'e, et al. Response of runoff-induced sediment discharge to hydrodynamic parameters of rill on loess hillslope[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2011, 9(5): 1-6. (in Chinese)
- 4 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)
- 5 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.
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. (in Chinese)
- 6 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.
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 CSAE, 2008, 24(6): 64-68. (in Chinese)
- 7 沈海鸥,郑粉莉,温磊磊,等. 雨滴打击对黄土坡面细沟侵蚀特征的影响[J]. 农业机械学报, 2015, 46(8): 104-112, 89.
SHEN Haiou, ZHENG Fenli, WEN Leilei, et al. Effects of raindrop impact on rill erosion characteristics on loess hillslope[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(8): 104-112, 89. (in Chinese)
- 8 FOSTER G R, MEYER L D, ONSTAD C A. An erosion equation derived from basic erosion principles[J]. Transactions of the ASAE, 1977, 20(4): 678-682.
- 9 LYLE W M, SMERDON E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils[J]. Transactions of the ASAE, 1965, 8(3): 419-422.
- 10 NEARING M A, BRADFORD J M, PARKER S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(2): 339-344.
- 11 张光辉. 国外坡面径流分离土壤过程水动力学研究进展[J]. 水土保持学报, 2000, 14(3): 112-115.
ZHANG Guanghui. Summary study on runoff detachment processes based on hydraulics [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2000, 14(3): 112-115. (in Chinese)
- 12 李占斌,鲁克新,丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(2): 5-7, 49.
LI Zhanbin, LU Kexin, DING Wenfeng. Experimental study on dynamic processes of soil erosion on loess slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16(2): 5-7, 49. (in Chinese)
- 13 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 characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope [J]. Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 9-15. (in Chinese)

- 14 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 CSAE, 2006, 22(2): 185-187. (in Chinese)
- 15 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):39-44.
SHA Jide, BAI Qingjun. Experimental study on hydraulic characteristics of rill flows over clay soil slope[J]. Journal of Sediment Research, 2001(6): 39-44. (in Chinese)
- 16 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. Mechanism of flow drop pit forming during process of rill erosion over slope[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2001, 15(6): 62-65. (in Chinese)
- 17 雷廷武,张晴雯,赵军.陡坡细沟含沙水流剥蚀率的试验研究及其计算方法[J].农业工程学报,2001,17(3):24-27.
LEI Tingwu, ZHANG Qingwen, ZHAO Jun. Laboratory experiments and computational method of soils detachment rate of sediment loading flow in rills[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(3): 24-27. (in Chinese)
- 18 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 for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 162-170. (in Chinese)
- 19 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J].土壤学报,2002,39(6):882-886.
ZHANG Guanghui, LIU Baoyuan, ZHANG Keli. Experimental simulation of hydraulic mechanism of soil detachment by surface runoff on sloped land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(6): 882-886. (in Chinese)
- 20 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[J].农业工程学报,2011,27(3):73-78.
LI Junlan, CAI Qianguo, SUN Liying, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 73-78. (in Chinese)
- 21 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J].中国水土保持科学,2010,8(6):53-57.
YANG Chunxia, YAO Wenyi, XIAO Peiqing, et al. Distribution of shear stress and the relationship between soil detachment rate and shear stress under experiments[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010, 8(6): 53-57. (in Chinese)
- 22 王瑄,李占斌,郑良勇.土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验[J].沈阳农业大学学报,2007,38(4):577-580.
WANG Xuan, LI Zhanbin, ZHENG Liangyong. An indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and shear stress[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38(4): 577-580. (in Chinese)
- 23 YANG C T, SONG C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105(7): 769-784.
- 24 GOVERS G, RAUWS G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds[J]. Earth Surface Process and Landforms, 1986, 11(5): 515-524.
- 25 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):48-55.
XU Jiang, WANG Zhaoyin. Formation and mechanism of step-pool system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(10): 48-55. (in Chinese)
- 26 余国安,王兆印,张康,等.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):162-167.
YU Guoan, WANG Zhaoyin, ZHANG Kang, et al. Effect of artificial step-pools on improving aquatic habitats and stream ecological in incised river channel[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(2): 162-167. (in Chinese)