

坡面细沟发生临界水动力条件初探*

袁峰¹ 李占斌² 鲁克新³ 登山¹

(1 南京大学城市与资源学系, 南京 210093)

(2 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

(3 西安理工大学水资源研究所, 西安 710048)

摘 要 通过玻璃水槽试验和土槽放水冲刷试验对坡面细沟侵蚀发生的临界水动力条件进行了初步研究。结果表明, 坡面径流在顺坡向下流动过程中以滚波形式运动并发生叠加是造成侵蚀方式发生变化的主要原因。由于径流流动过程中发生滚波叠加, 造成在径流流路上出现局部水深增加, 导致侵蚀切应力激增, 当切应力大于该处的土壤抗蚀力时便发生侵蚀, 并最终造成细沟沟头的出现。通过对土槽冲刷试验的结果分析, 运用能量守恒原理建立了径流能耗和径流侵蚀产沙率之间的关系, 给出了给定土壤条件下坡面细沟侵蚀率估算模型。结果表明, 坡面土壤侵蚀的发生具有一定的临界条件, 当径流能耗大于 7.38(J) 时坡面开始有细沟侵蚀发生。

关键词 坡面, 细沟侵蚀, 临界

中图分类号 S157.1

坡面是土壤侵蚀发生的最基本单元, 坡面土壤侵蚀过程包括细沟间侵蚀过程、细沟侵蚀过程和浅沟侵蚀过程^[1]。其中, 细沟侵蚀量在坡面总侵蚀量中占有较大比重^[2]。因此, 关于坡面细沟侵蚀的研究一直是土壤侵蚀研究中的重要领域。多年来, 关于细沟侵蚀的研究已取得了一大批研究成果。但这些研究往往停留在细沟侵蚀产沙过程、产沙机理及影响细沟侵蚀产沙的因素等方面^[3-10], 较少涉及细沟侵蚀出现的较为细微的机理^[11, 12]。尤其是对坡面上细沟侵蚀初期小侵蚀穴(跌坎)的出现, 目前还未形成一致的看法。但有一点是大家所共识的, 即跌水形成是坡面侵蚀方式发生变化的重要分界点, 它标志着细沟开始形成, 同时也表明侵蚀方式已由面状侵蚀转为沟状侵蚀^[13-17]。由于沟蚀初期跌水的形成具有随机性、突发性等特点, 因此关于水流侵蚀作用发生突变的原因, 目前还未见到专门的研究。多数学者只是将其归因于地表微小坑洼的作用。然而在进行室内试验时, 尽管土壤表面经过均匀翻松整平, 最大限度地消除了地形的不均匀, 在径流顺坡下泻时仍可形成一系列跌水, 导致细沟侵蚀的发生。且从我们在野外调查和室内试验结果研究发现, 小侵蚀穴并非在整个坡面上均匀分布, 往往在坡面的上部总有一段坡面由于汇集的径流强度不够而没有细沟发育, 沿坡面向下随着径流汇集的能量进一步增大首先出现小侵蚀穴。因此, 笔者认为坡面侵蚀往往在坡面中下部位首先发生突变必有其本身水动力学特性上的必然原因。鉴于此, 笔者利用定床床面的放水试验结合土槽冲刷试验对坡面土壤侵蚀过程中的细沟侵蚀发生临界水动力条件进行了研究, 以期对坡面侵蚀过程的深入研究提供依据。

1 材料与与方法

1.1 水槽试验

试验在一个表面粗糙度一定的玻璃水槽上进行(400cm × 50cm × 10cm)。供水设备采用订水头控制流量, 试验时选取三级放水流量(0.2 L s⁻¹、0.3 L s⁻¹、0.4 L s⁻¹), 三级试验坡度(16°、20°、27°)组合试验。试验中采用自行研制的仪器测定整个坡面上的径流运动状况。其装置由两对距离固定的电极探

* 中国科学院知识创新重大项目“西部生态环境演变与水土资源可持续利用研究”(KZCX1-10-04)

收稿日期: 2002-03-15; 收到修改稿日期: 2002-09-02

针和一个多通道示波仪组成, 每对电极与三伏电池相连。在试验过程中, 沿水槽长度方向布设间距为 50 cm 的 6 个量测断面, 在每个断面处各放置一个垂直于水槽槽面的探头, 并用导线将示波器、电源和探头连成闭合电路。每个探头附近水深的瞬时变化所引起的闭合电路的电压变化将以连续波形图的形式反映在光电示波器的输出记录纸上。试验完成后测量与每个探头相对应的波形图中同一计时时间内出现的水深变化点的个数及波形图的振幅大小, 就能间接得到坡面流在单位时间内经过沿程各断面的水深变化情况。从而了解坡面流运动的一些基本规律。

1.2 坡面径流冲刷侵蚀试验

试验在长 500 cm、宽 100 cm、深 50 cm 的可调坡钢制冲刷槽内进行。在装填试验土之前, 先在试验槽内部铺填 20 cm 厚的天然沙, 以保持试验土的透水状况接近天然坡面。然后, 把野外采得的土样过 1 cm 孔径的筛后填入试验槽, 填土过程中边填边用力压实, 填土完成后使试验槽内的土壤干容重控制在 $1.25 \sim 1.3 \text{ g cm}^{-3}$ 。供水设备采用定水头控制流量, 从试验槽上端按设计要求通过阀门控制流量。试验开始后, 在坡面出口处收集径流泥沙样以计算坡面径流输沙率过程, 并记录产流时间、细沟开始形成时间。产流初期每 1 min 取 1 次径流泥沙样, 3 min 后每 2 min 取 1 次径流泥沙样。坡面径流流速测定采用染料示踪法。整个试验过程持续 15 min。试验流量按黄土高原暴雨发生频率在野外标准径流小区上产生的单宽流量换算到试验土槽上的流量得到, 分别为 2.5 L min^{-1} 、 3.5 L min^{-1} 、 4.5 L min^{-1} 、 5.5 L min^{-1} 、 6.5 L min^{-1} , 坡度采用 6°、9°、12° 三级变化。采用组合试验的方法进行试验, 每个放水流量值连续重复试验两次。每次试验后, 用量筒测定各个样品的径流量, 用烘干法测定各个样品中的泥沙量。试验土壤为陕西杨陵当地土, 其粒径组成如表 1 所示。

表 1 试验土壤的粒径组成
Table 1 The percentage of different soil particle sizes(%)

土 壤	粒 径					
	Soil particle sizes					
	1~ 0.25 mm	0.25~ 0.05 mm	0.05~ 0.01 mm	0.01~ 0.005 mm	0.005~ 0.001 mm	< 0.001 mm
土	0.12	2.70	41.13	6.88	12.89	36.28

2 结果分析

2.1 滚波流与滚波叠加现象

通过对定床床面的试验数据分析可知, 坡面流在流动过程中, 沿程会发生一系列局部水深雍高的点, 且这些局部水深雍高的点在坡面上的分布, 以及单位时间内坡面上各坡段内的水深雍高点的个数呈有规律的变化趋势。这与高速水力学中描述的滚波流相似, 由此可知, 坡面流并非是以均匀流形式运动, 而是以滚波流形式运动的; 且从试验所得结果可知, 在坡面下部局部水深雍高处的波形图振幅要明显高于坡面上部局部水深雍高处的波形图振幅, 也就表明该处的水深要大于坡面上部的局部水深, 从而可以判断这主要是由于坡面流发生了波的叠加, 导致该种现象的发生。

从表 2 中可以看出, 在试验的坡度和放水流量范围内, 坡面滚波数的变化有以下规律: 在相同的坡面部位上, 放水流量越大、坡度越大, 单位时间内通过的滚波个数就越多。这可能与坡度越大、放水流量越大, 径流流速就越大等因素有关。而在相同的放水流量下, 随坡长的增加滚波个数呈逐渐减少趋势。这主要是由于发生了滚波的叠加现象所造成的。

表 2 不同放水流量不同坡度下单位时间内坡面滚波数沿程变化表

Table 2 The variation of roll wave number along the slope under the different flow discharges

坡度 Slope gradient (°)	放水流量 Flow discharge ($L s^{-1}$)	坡长 Slope length					
		1.5 m	2.0 m	2.5 m	3.0 m	3.5 m	4.0 m
16.5	0.2	4.47	4.45	3.64	3.75	3.25	2.75
	0.3	4.15	3.75	4.00	3.64	3.31	—
	0.4	5.94	5.45	5.45	4.91	3.96	3.47
20.5	0.2	4.61	3.86	3.64	3.62	3.29	2.96
	0.4	6.44	5.94	5.45	4.70	4.46	3.47
27.0	0.2	—	3.88	3.68	3.64	3.41	3.18
	0.3	—	5.45	4.95	4.46	3.96	3.47
	0.4	7.24	6.58	5.26	4.93	4.61	4.28

2.2 滚波叠加的影响因素

从上述试验结果可以看出,在相同坡度、相同流量情况下,坡面上任一段面处的滚波个数沿坡面向下不断减少,且其减少的速率(即图中曲线的斜率)对于不同坡度、不同流量的情况存在着差别。

2.2.1 放水流量大小对滚波叠加的影响 根据试验实测资料,将相同坡度、不同放水流量下单位时间内经过坡面沿程各点的滚波数点绘在图 1 中。

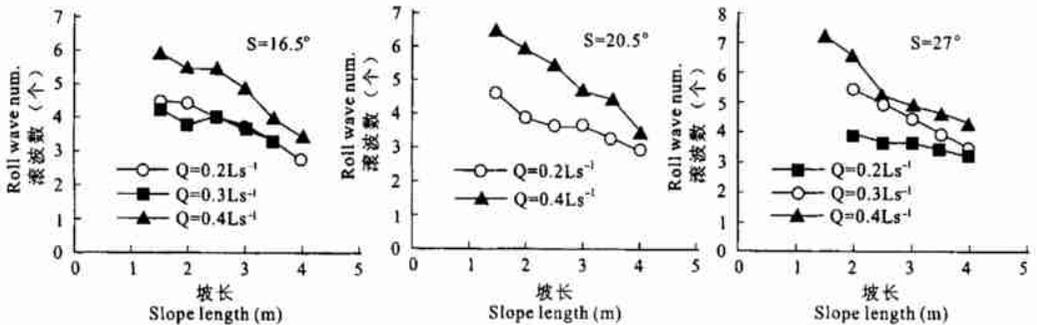


图 1 不同坡度条件下坡面沿程滚波个数变化图

Fig. 1 The variation of roll wave on slope under the different slope gradients

由图 1 可以看出,在相同坡度情况下,对于不同的放水流量,随着坡长的增大,坡面滚波流的滚波数均表现为沿程减小的趋势,但它们减小的速率(即图中斜线斜率)却有所不同,表现为放水流量越大,曲线斜率就越大,也就是说,放水流量越大,坡面滚波流在流经单位坡长时滚波减少的个数越多。

2.2.2 坡度对滚波流叠加的影响 根据试验实测资料,将相同放水流量、不同坡度下单位时间内经过坡面沿程各点的滚波数点绘在图 2~3 中。

从图 2、图 3 可以看出,滚波流在不同坡度的坡面上流经各坡段时滚波数减少的个数随放水流量的大小而有所不同。在较小流量情况下,与不同坡度相对应的三条斜线的斜率大致相同,而在流量较大情况下则随坡度的增大曲线斜率也随着增大。即在大流量、大坡度情况下,滚波流的叠加现象也越明显。这与大流量、大坡度情况下,坡面上越容易发生细沟侵蚀的结果相一致。

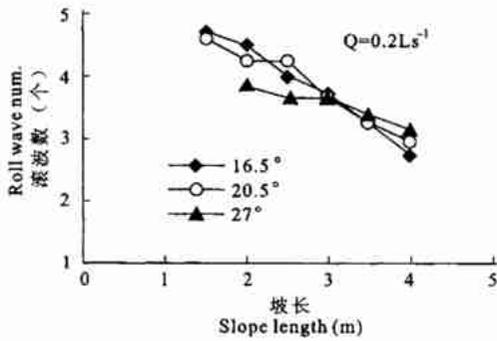
图2 坡面沿程滚波个数(0.2 L s^{-1})

Fig. 2 The number of roll wave along the slope

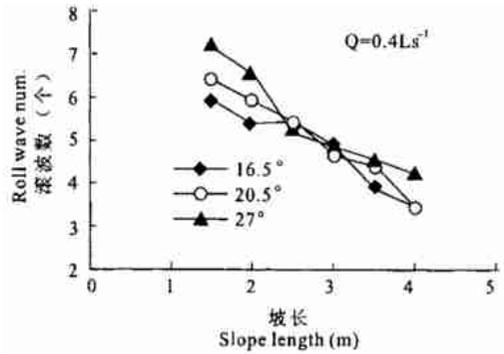
图3 坡面沿程滚波个数(0.4 L s^{-1})

Fig. 3 The number of roll wave along the slope

2.3 细沟侵蚀初期跌坎形成原因

由上述试验结果可知,坡面径流在沿坡向下流动过程中会出现滚波叠加现象。在坡面滚波发生叠加的地方,坡面径流水深便会再次局部激增,由坡面径流切应力计算公式(1)可知,坡面径流的局部切应力和冲刷侵蚀能力也随之大大增强。滚波发生叠加的地方也因此成为坡面径流流路上径流侵蚀力最大的地方。坡面水流也势必首先在这些径流侵蚀力激增点上急剧剥离和分散表层土壤,导致标志细沟侵蚀开始发生的跌坎的出现。因此,坡面径流滚波发生叠加可能是坡面细沟侵蚀初期跌坎形成的最主要原因。同时,由于坡面滚波流沿程逐步发生叠加,当坡面的某个部位因滚波叠加后侵蚀切应力达到足以起动该处的泥沙时,侵蚀便开始发生。如果径流流过的距离过短,则滚波叠加后其侵蚀切应力不足以使该处产生侵蚀,该处便不会发生侵蚀现象。这便是我们无论是在野外还是室内均能见到细沟往往从坡面的中下部位开始形成的主要原因。由此可见,用滚波叠加来解释坡面细沟侵蚀形成原因具有一定的合理的科学依据。

2.4 细沟侵蚀发生临界条件

2.4.1 坡面径流冲刷侵蚀动力分析 通过对试验数据分析可知,径流在沿坡面向下运动过程中会发生波的叠加现象,根据水力学理论,这些滚波叠加处的径流切应力也必然会突然增大,而出现侵蚀切应力的激增点,从而最终导致坡面下部首先出现侵蚀。当我们用下式计算坡面薄层水流的径流剪切力时

$$\tau = \gamma h J \quad (1)$$

式中, τ 是径流剪切力; γ 为水的容重; h 是水深; J 为水力坡降,近似等于地表坡降。水深 h 和水力坡降 J 都是用整个坡面上的平均值来代替,所以当计算出的平均水流切应力比土壤颗粒粘结力小时,理论上不会发生坡面土壤颗粒剥离的现象。但由于径流在流动中发生了波的叠加现象,出现了坡面局部水深增大的现象。纵向上出现了径流侵蚀切应力的激增点,实际上即使平均水流切应力小于土壤阻力时,在这些局部地方也会发生土壤的剥离。有研究表明, 15° 坡面上在有滚波发生条件下最大侵蚀切应力与按均匀流计算得到的切应力相比,一般可增加 $10\% \sim 30\%$ ⁽¹⁾。因此,若按常规的经典水力学理论去研究坡面流势必产生较大的偏差。但在目前还不能对坡面水流的冲刷作用力进行合理的解析求解的情况下,只能采用统计学原理在分析大量试验数据的基础上,找出与径流动力关系最为密切的因子,或者若干因子,并用这些因子暂作为径流冲刷动力的表示式,对其径流冲刷动力进行分析。

众所周知,土壤侵蚀过程实际上是地表土层在自然外力作用下发生土体空间位置变化的过程,物质与能量变化作为其根本原因贯穿作用于整个过程。这个过程作用的结果导致土壤发生分散、输移、沉积,因此,建立水蚀过程中的能量体系,用能量在作用过程中的量值变化反映坡面土壤侵蚀——输移过程是研究解决问题的途径之一。而径流对土粒施加剪切力,促使其分离的过程恰恰也是一个做功消耗

(1) 陈力. 坡面水流和细沟侵蚀的动力学研究. 中国科学院力学研究所博士研究生学位论文, 2001

能量的过程, 能量的大小决定了土粒的分离, 并且能量计算较为方便、容易。因此, 用径流能量来代替剪切力判断不同种类的土壤细沟侵蚀发生临界不失为一种有益的探索。

2.4.2 坡面径流能耗理论推导 坡面水流在由坡顶向坡下流动过程中, 由于势能向动能转化, 径流流速应愈来愈大; 同时, 由于水流在流动过程中要克服冲刷、携带输移土壤颗粒以及流体内部紊动、混掺消耗内能等而做功, 其具有的能量将会在流动过程中损失掉一部分。现利用能量守恒定律来分析水流自坡面顶端到坡面上任一断面间的能量损耗。

设单宽径流在坡面顶端所具有的势能为

$$E_{\text{势}} = \rho g L \sin \theta \quad (2)$$

动能为

$$E_{\text{动}} = \frac{1}{2} \rho q V_1^2 \quad (3)$$

在理想情况下, 单宽水流到达坡面任意断面时的总能量应为

$$E_{\text{总}} = \rho g L \sin \theta + \frac{1}{2} \rho q V_1^2 \quad (4)$$

但由于能量损耗, 坡面上任意断面处水流的实际总能量与理想情况下有很大差别, 可根据实测得到的任意断面处的水流的平均流速、径流量来计算该断面的实际总能量即:

$$E_{X\text{总}} = \frac{1}{2} q' \rho V_x^2 + q' \rho g (L - X) \sin \theta \quad (5)$$

因此, 坡面上径流从坡顶到坡面上任意断面处的能量损耗为:

$$E_{\text{耗}} = E_{\text{总}} - E_{X\text{总}} \quad (6)$$

对上式进行时间和长度上的累加得

$$\Delta E_{\text{耗}} = \sum_T \sum_L (E_{\text{总}} - E_{X\text{总}}) \quad (7)$$

把式(4)、(5)代入上式得

$$\Delta E_{\text{耗}} = \sum_T \sum_L (\rho g L \sin \theta + \frac{1}{2} \rho g q V_1^2 - \frac{1}{2} q' \rho V_x^2 - q' \rho g (L - X) \sin \theta) \quad (8)$$

以上各式中: L 为试验土槽的坡长; V_x 为到坡顶的距离为 X 的坡面任意一点的含沙水流平均流速; q' 为坡面 X 断面处的径流的流量; ρ 为水的密度; T 为试验所持续的时间; $\Delta E_{\text{耗}}$ 为在坡面径流出口处在整个试验过程中消耗的能量。根据试验实测资料, 利用式(8), 我们就可以计算得到整个径流冲刷试验过程中的径流能量消耗总量。

2.4.3 坡面细沟侵蚀发生的临界能量消耗 根据试验实测资料及其计算结果, 点绘了径流冲刷侵蚀条件下细沟侵蚀发生发展过程中径流侵蚀产沙率与径流能量损耗的关系, 如图4所示。

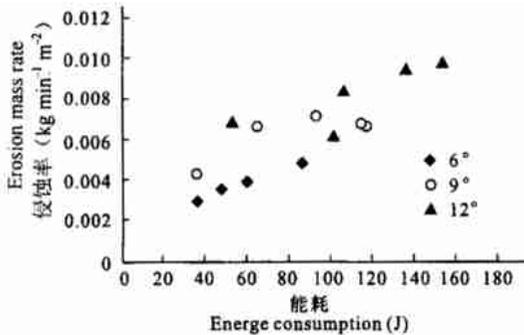


图4 坡面径流能耗与径流侵蚀产沙率的关系图

e relationship between the runoff energy consumption and soil detachment rate

从图中不同坡度下点绘的数据的变化趋势可以看出, 在试验坡度范围内, 径流能耗越大, 径流侵蚀产沙率越大; 在径流能耗一定的情况下, 径流侵蚀产沙率随着坡度的增大而增大。经分析可知, 坡面细

沟侵蚀过程中径流侵蚀产沙率与径流能量消耗之间存在着良好的对数关系, 这种关系可以用下式表达:

$$D_r = K (\ln \Delta E - C_0) \quad (9)$$

式中: D_r 为细沟侵蚀产沙率; K 为土壤抗冲性系数; ΔE 为径流在坡面上的能耗; C_0 为与坡面细沟侵蚀发生的临界能耗有关的参数。分析式(9) 我们不难发现, 它不仅反映了径流侵蚀产沙率与径流能量消耗的定量关系, 而且还具有明确的物理意义。细沟侵蚀的发生存在有一定的临界径流能量消耗, 即

$$\Delta E_c \geq e^{C_0} \quad (10)$$

坡面细沟侵蚀发生的临界条件为 e^{C_0} 。利用式(9) 对不同坡度下的试验数据进行分析, 得到在试验条件下细沟侵蚀发生临界平均径流能量消耗为 7.38 J。也就是说, 在试验坡度范围内, 如果坡面平均径流能量消耗超过 7.38 J, 细沟就会产生。

3 结 论

1. 通过一系列组合试验研究表明, 坡面径流在向下流动过程中是以滚波形式运动的。放水流量和坡度大小对坡面滚波流的形成及叠加有较大影响, 尤其在大流量、大坡度情况下更为明显。并用滚波叠加理论解释了坡面细沟侵蚀发生的原因。这与室内和野外所观察到的细沟往往在坡面的中下部位产生的现象相符合。

2. 运用能量守恒原理分析了径流能耗和径流侵蚀产沙率之间的关系, 建立了给定土壤条件下的侵蚀率模型, 并通过分析得出试验条件下土壤侵蚀发生的临界能耗为 7.38 J。

3. 由于坡面侵蚀过程十分复杂, 且受多种因素的影响和制约, 因此侵蚀产沙的内在规律性不易被人们所揭示。本文利用坡面径流滚波运动理论来解释跌坎形成原因, 也仅仅是从实践上进行了初步的摸索与探讨, 还有待于今后进一步开展相关的理论与试验研究工作。

参考文献

1. 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
2. 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~ 61
3. 王贵平, 张治国. 黄土坡面上细沟发生及其侵蚀. 晋西土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究. 北京: 科学出版社, 1992. 234~ 239
4. 王贵平, 曾伯庆, 蔡强国, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀及其预报研究. 中国水土保持, 1992. 11: 22~ 24
5. Abrahams A D, Parson A J. Hydraulics of interrill overland flow on stone-covered desertsurfaces. Catena, 1994, 23(2): 111~ 140
6. Abrahams A D, Gang Li, Parson A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope Southern Arizona. Earth Surface Processes and Landforms, 1996, 21(1): 35~ 47
7. Selby M J. Hillslope Materials & Processes. Oxford University Press, 1993
8. Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I Velocity relationships. Trans. of ASAE, 1984, 27(6): 790~ 796
9. Govers G. Relationship between discharge, velocity, and flow area for rills eroding loose, non-layered materials. Earth Surface Processes and Landforms, 1992, 17(4): 518~ 528
10. 雷阿林, 唐克丽. 细沟侵蚀发生的临界动力条件. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 39~ 43
11. Horton R E. Erosion development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Bull. Geol. Soc. Am., 1945, 56(3): 275~ 370
12. Kirkby M J, Morgan R P C 著. 王礼先等译. 土壤侵蚀. 北京: 水利电力出版社, 1987
13. 胡世雄. 坡面流与坡面侵蚀动力过程研究的最新进展. 地理研究, 1998, 17(3): 326~ 334
14. 蔡强国. 坡面细沟发生临界条件研究. 泥沙研究, 1998, 8: 52~ 59
15. 蔡强国, 王贵平, 陈永宗. 黄土高原小流域侵蚀产沙过程与模拟. 北京: 科学出版社, 1998. 92~ 106
16. Horton R E. Erosion development of streams and their drainage basins: Hydrophysical approach to quantitative morphology. Bull. Geol. Soc. Am., 1945, 56(3): 275~ 370
17. Yang Nam Yoon, Hany G Wizel. Mechanics of sheet flow under simulated rainfall. Transaction of American Society of Civil Engineers, 1971, 97(9): 1367~ 1386

THE ELEMENTARY STUDY OF THE REASON OF RILL EROSION ON SLOPE

Ding Wen-feng¹ Li Zhan-bin² Lu Ke-xin³ Ding Deng-shan¹

(1 *Urban and Resources Science Department, Nanjing University, Nanjing 210093, China*)

(2 *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and
Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

(3 *Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China*)

Summary

Soil erosion has been a worldwide environmental problem. Soil erosion results in not only degeneration of soil productivity, but also floods and pollution of water resources. Soil erosion and its controls have been studied extensively. Many researches revealed that the rill erosion accounts for a large amount of total erosion on slope. But, few researches have studied the mechanism of the rill erosion occurred on slope. In this study, by using runoff scouring on the definite roughness glass flume under the different slope gradients (16.5° , 20.5° , 27°) and the different flow discharges (0.2 L s^{-1} , 0.3 L s^{-1} , 0.4 L s^{-1}), the rill erosion mechanism were studied. The results show that the runoff on the slope moves in the form of roll waves under the given experiment condition. The number of roll waves and the superposing of roll wave are heavily influenced by the discharge of flow and the slope gradients. The larger of flow discharge and the greater of slope gradients, the more decrease of the number roll waves. At the same time, the scouring experiments were conducted on the soil bed flume under the different flow discharge (2.5 L min^{-1} , 3.5 L min^{-1} , 4.5 L min^{-1} , 4.5 L min^{-1} , 5.5 L min^{-1} , 6.5 L min^{-1}) and the different slope gradients (6° , 9° , 12°). The relationship between the soil detachment and the runoff energy consumption was studied by using the law of conservation energy in this article. The soil erosion rate model was built, and a new rill erosion critical index was put forward. Based on the analyzing the data of experiment, the author got that the rill erosion occurred when the energy consumption exceed 7.38 J .

Key words Mechanism, Rill erosion, Slope