

黄土坡面土壤侵蚀动力过程试验研究^X

李占斌^{1,2}, 鲁克新², 丁文峰¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100; 2. 西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘要: 通过玻璃水槽试验和径流冲刷试验, 初步研究了陡坡坡面水流的流速分布和坡面薄层水流冲刷剥离土壤的过程。研究表明: 陡坡薄层水流流速在坡面上并非是呈直线分布, 而是呈波浪式分布的; 坡面水流的剥蚀率(Dr)与坡面径流通过坡面的能量损耗(\$E)的关系比其与坡面水流的平均切应力(S)的关系密切, 建立了黄土坡面土壤剥蚀率估算模型, 利用这个关系可以直接得到土壤抗蚀性参数和细沟发生的临界能耗条件。

关键词: 侵蚀率; 径流能耗; 临界能量条件

中图分类号: S157.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2002)02-0005-03

Experimental Study on Dynamic Processes of Soil Erosion on Loess Slope

LI Zhan-bin^{1,2}, LU Ke-xin², DING Wen-feng¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048)

Abstract: Based on the hydraulic experiments on the glass flume and erosion experiments on loess slopes; the velocity of shallow flow distribution on slope and the detachment processes by shallow flow has been researched. The results show that the distribution of the velocity of shallow flow along the downslope show as waves, but the straight-line. The relationship between the soil detachment rate (Dr) and the runoff energy consumption (\$E) of shallow flow on slope is better than the relationship between soil detachment rate (Dr) and the average shear stress (S) of shallow flow on slope. A soil erosion rate formula is built. The parameters of soil anti-erodibility and the critical energy consumption condition of rill erosion occurrence can be obtained from the formula.

Key words: soil detachment rate; runoff energy consumption; critical energy consumption condition

水土流失是当今世界普遍关注的重大环境问题, 尤其是在广大的发展中国家, 由于土壤侵蚀导致严重的水土流失已成为农业经济发展的主要障碍。坡面土壤侵蚀的发生发展过程包括细沟间侵蚀过程、细沟侵蚀过程和浅沟侵蚀过程, 三者的发生发展及其在坡面侵蚀产沙中的作用是目前坡面侵蚀机制研究的核心内容, 也是坡面侵蚀预报模型所考虑的关键所在。其中, 细沟侵蚀产沙量占有很大的比例, 因此, 多年来关于坡面细沟侵蚀的研究一直是土壤侵蚀研究的重点。尽管细沟侵蚀是坡面水蚀的重要过程, 但它的机理还未被人们充分认识。目前研究细沟发生、发育时仍借鉴河流水力学理论, 忽视了坡面侵蚀输沙与河流输沙在土壤、坡度以及动力方面的显著差异。70年代后期以来, 研究者在定量分析细沟发生的临界条件与侵蚀力方面做了大量工作, 他们所使用的定量参数有坡度、弗劳得数、径流剪切力与土壤抗剪强度等, 但对坡面径流侵蚀的动力过程, 特别是陡坡地侵蚀动力过程缺乏系统描述。本文通过坡面薄层水流和放水冲刷试验对陡坡坡面土壤侵蚀过程进行了全面研究。

1 材料与试验方法

1.1 水槽试验

试验在一个宽为50 cm、长为400 cm、深为10 cm 并在0~90°可自由调坡的玻璃水槽上进行。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试验放水流量。试验开始后并待坡面流流动达到稳定状态后测定坡面流流速, 流速的测定采用电极法, 试验时间5~10 min。采用0.2, 0.3, 0.4 L/s 三个放水流量, 15, 20, 25°三个坡度。为了保证试验的精度, 每组试验均进行重复。

1.2 坡面水流冲刷侵蚀试验

坡面水流冲刷试验在宽为33 cm, 长100 cm, 深50 cm 的可调坡土槽内进行。先在实验槽下部铺填20 cm 厚

X 收稿日期: 2002-01-08

基金项目: 中国科学院知识创新工程项目“黄土高原区域水土保持环境效应与生态环境建设对策”(KZCX1-10-04)

作者简介: 李占斌, 男, 生于1962年, 研究员。主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。

的天然沙,以保持试验土的透水状况接近天然状况。然后,把野外采集的黄土土样过1 cm 孔径的筛后分层填入试验槽,填土过程中边填边用力压实,试验槽内的土壤干容重控制在 1.3 g/cm^3 。为了保证每次试验的初始条件基本一致,试验开始前在试验土槽表面均匀撒水,撒水量控制在土槽表层土壤达到接近饱和但不发生流的状态。采用定水头控制试验流量,从实验槽上端按设计要求通过阀门控制流量。试验开始后,仔细观察径流冲刷过程并记录径流流出出口的发生时间、细沟发生时刻。土槽出口径流含沙量采用取样分析法观测,产流初期1 min 取一次径流泥沙样,3 min 后每2 min 取一次径流泥沙样,待放水试验结束后,用置换法分析样品的泥沙量作为该时段径流的平均含沙量。同时,用染色法测定坡面径流的流速、量测坡面径流的水流宽度。整个试验过程持续15 min 左右。试验流量分别采用2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.5 L/min,分别在 6° , 9° , 12° 坡面上进行试验。试验用土为杨陵地区的黄土,其粒径组成如表1所示。

2 试验结果与分析

2.1 坡面流流速的分布

不同放水流量、不同坡度水槽试验研究表明,坡面上流速并非是按照从坡顶到坡底呈正比例增加或减小的规律分布,而是呈现波动变化(图1, 2)。

从图1, 2可以看出,在相同的坡度情况下坡面流流速总体上呈现出随放水流量增大而增大的趋势,而在相同的放水流量情况下坡面流流速也呈现出随坡度增大而增大的趋势。陡坡薄层水流运动呈滚坡流,滚坡流在沿程运动中存在滚波叠加现象,且这种叠加作用与水流单宽流量和坡度有关。降雨雨滴打击对薄层水流流动的影响与薄层水流水深和坡度及雨点动能有关(见图3)。

表1 试验土壤的粒径组成

粒径(mm)	1~0.25	0.25~0.05	0.01~0.005	0.05~0.01	0.005~0.001	< 0.001
百分比(%)	0.12	2.70	6.88	41.13	12.89	36.28%

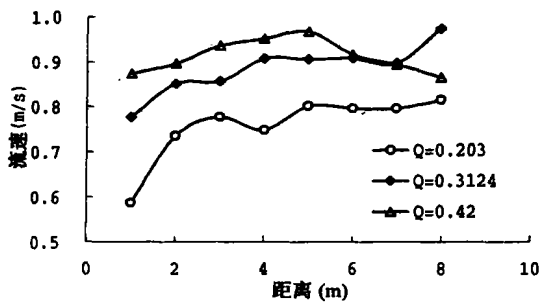


图1 不同放水流量条件下坡面流流速分布(16.5°)

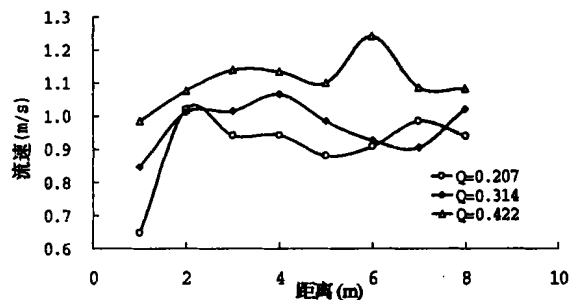


图2 不同放水流量条件下坡面流流速分布(27°)

综合试验结果和野外实地观察可知:细沟在坡面上按不同发展阶段而逐步形成。在其形成初期,细沟在坡面上是一系列大致呈等间距的小坑穴组成的,而后这些小坑穴发生溯源侵蚀逐渐相互连通形成细沟。既然坡面上径流的流动是以滚波的形式向前推进,那么在坡面较为平整的情况下,其波谷与坡面交接点的分布也自然呈现出一定的规律性(图3),在这些交接点上由于波峰的势能完全转化为动能,对坡面侵蚀能力明显加剧,当这些侵蚀力超过了坡面上该处土壤的抗蚀力时,就会在该点率先形成小侵蚀穴,即细沟开始形成发育。

2.2 坡面土壤颗粒起动过程分析

坡面上径流侵蚀产沙是由于坡面上的径流在顺坡流动过程中,径流冲刷作用和坡面抗蚀作用以及地面物质补充能力之间相互作用的结果。径流冲刷能力决定于径流本身所具有的能量及夹沙能力,主要影响因素有径流量、地表状况和坡度等。坡面土壤颗粒由静止到起动再最终通过径流的输移作用而输出坡面要经历如下两个阶段:第一阶段是通过径流产生的沿坡面的剪切力使土粒之间的粘结力破坏,使土粒由母体上分离开来。第二阶段是克服土粒与土粒或土粒与地表之间的摩擦力使土粒起动。因此,坡面上土粒的起动首先取决于径流冲刷能够分散的土粒大小和数量,即为起动提供的松散物情况,而这决定于土粒之间的粘结力与水流产生的剪切力的对比关系。只有当水流作用于土粒的剪切力大于土粒的粘结强度时,土粒之间的粘结力才可能遭到破坏进入

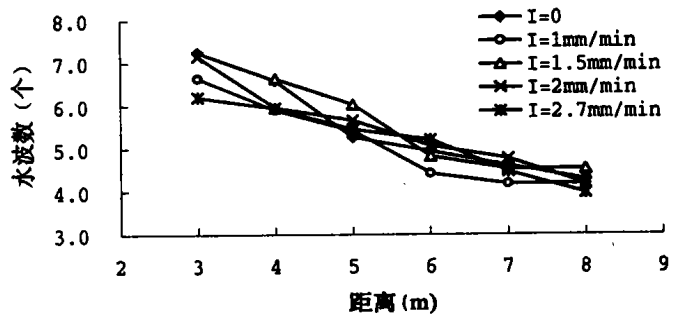


图3 放水流量为0.422L/s时单位时间坡面水波数沿程变化

起动准备,若用代表坡面径流的平均剪切力,代表土粒间粘结力,则有:

$S - S \geq 0$, 土粒分散; $S_r - S \leq 0$, 土粒不分散

但在实际工作中一方面由于土粒之间的粘结力和径流作用于土粒的剪切力计算较为困难,因此,往往用径流对众多土粒的共同作用效果来衡量,这势必掩盖了其物理过程;另一方面,由于坡面上的径流以滚动冲击波的方式向前运动,在水流方向上的冲击波交汇点不仅水深出现局部增加,而且也会导致径流流速的增大 ($V_1 > V_2$) 以及水流紊动性的增强(图4),最终在水流纵向上出现径流侵蚀切应力的激增点,而我们用公式 $S = ChJ$ 计算坡面径流的剪切力时,水深 h 和水力坡降 J 以及径流切应力 S 采取的都是整个坡面上的平均值,所以当计算出的平均水流切应力比土壤阻力小时,理论上不会发生坡面土壤颗粒剥离的现象。但由于水流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。因此,径流剪切力也并非一个能确切反映坡面细沟侵蚀发生临界值的良好指标。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。

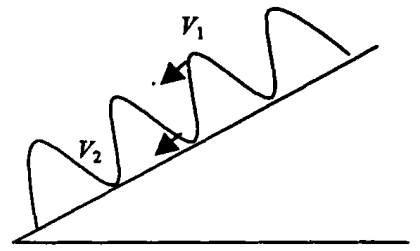


图4 坡面径流的运动波示意图

2.3 坡面径流侵蚀的能量分析

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具有的势能为 $E_{势} = QqgL\sin H$ 动能为 $E_{动} = 1/2QqV_i^2$,在理想情况下,水流到达坡面任意断面时的总能量为 $QqgL\sin H + 1/2QqV_i^2$;但由于能量耗损,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,根据实测任意断面处水流的流速与该断面处的径流量来计算该断面的实际总能量,即:

$$E_x = 1/2q'QV_x^2 + q'Q(L - X)\sin H$$

式中: L 为坡面的长度; X 为坡面上任意一点距坡顶的距离; V_x 为该断面处的流速; q' 为该断面处的流量。

因此,坡面上径流从坡顶到坡面上任意断面处的能量耗损为: $E_{耗} = E_{势} + E_{动} - E_x$, 对此式进行时间和长度上的积分得:

$$\int E_{耗} = \int \int (E_{势} + E_{动} - E_x) dL dt$$

式中: t 为试验所持续的时间; L 为试验土槽的坡长; $\int E_{耗}$ 为在坡面径流出口处在整个试验过程中消耗的能量。由于坡面土壤实验前基本达到饱和状态,因此在试验过程中入渗的水量可以忽略不计。

2.4 坡面土壤细沟侵蚀发生的临界条件

根据试验所得结果,我们点绘了坡面细沟径流侵蚀产沙率和径流能耗之间的关系(图5)。从图5可以看出,在不同的坡度下坡面径流侵蚀产沙率和坡面径流能耗之间均存在良好的直线关系,可用下式表达:

$$D_r = k(\int E - E_0)$$

式中: k 为与土壤种类有关的侵蚀性系数; $\int E$ 为径流在坡面上的能耗; E_0 为坡面土壤细沟侵蚀发生的临界能量。从图中各坡度下的径流能耗和径流侵蚀产沙率的关系走势中还可见,在不同的坡度下,坡面土壤侵蚀发生的临界能量值大致相同,并随着坡度的增大而减小。究其原因,主要是因为随着坡度的增大,坡面上土壤颗粒的稳定性降低,导致需要较少的能量便可以起动。在试验研究的范围内,该值平均为 8.383。

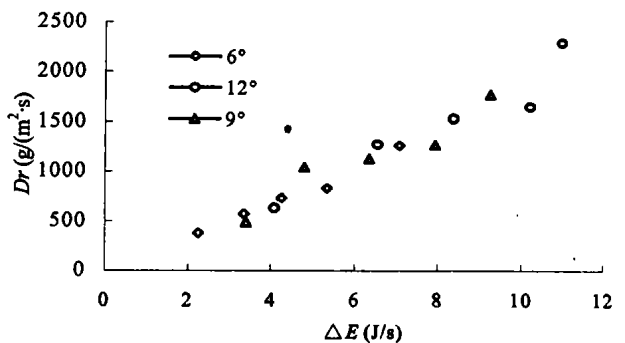


图5 坡面径流能耗与径流侵蚀产沙率的关系

2.3 遥感和地理信息系统与水文学的整合研究

大约从1992年开始,遥感和地理信息系统和水文模型的整合研究才在技术上变得切实可行(Baumgarner等,1997)。对于遥感和地理信息系统和水文模型的整合研究来讲,确实是刚刚起步,还有很大的不足(Shih,1996)。好在1998年,ESRI和ERDAS同时授权,将其作为ArcView地理信息系统的图像分析工具,使得ArcView与遥感和地理信息系统的一些基本功能直接连接。

地理信息系统与遥感技术相互补充,使得他们与水文学的结合,特别是使得水文模型更具有物理基础和更加有效。地理信息系统对分布型水文模型提供了新的开发环境,这些模型将研究流域中任何一点都作为考虑对象并加以预测(Mitas和Maidment,1998)。Zhang(1997)开发出了地理信息系统支持下的随机空间时间降雨模型与分布型水文模拟的整合研究框架。最近,Hellweger和Maidment(1999)在ARC/INFO和ArcView中开发了一个自动工具来定义和连接水文单元,然后将他们与HEC-HMC连接用于集合型水文模型。

总体来看,遥感和地理信息系统与水文学整合研究框架如图2所示。

3 结果与讨论

(1) 遥感和地理信息系统在水文学的应用中有着很长的历史根源,分别在水文学中得到了广泛的应用,取得了大量研究成果。但是,三者的整合研究还刚刚起步,有待于进一步深入研究。

(2) 遥感技术给水文模型提供了大量与时间、空间信息相关的不同水文数据或变量,使水文模型的信息源更具有广域性、及时性和准确性;地理信息系统的不断发展使得其在水文模型的应用研究中更加有效,同时,由于地理信息系统在数据组织、操作以及可视化不同尺度多渠道空间数据的巨大作用,使其可用来检索或显示多维数据,进而支持工程设计和资源管理。

(3) 现代遥感和地理信息系统与传统水文学的整合研究,必将给水文学注入新的活力,同时将对流域或区域乃至全球水资源管理发挥巨大作用,也使全球水资源高效管理成为可能。

上接第7页

另外,从图5中我们还可以看出,随着坡面径流流量的增大径流能耗相应增大,径流侵蚀产沙率也随着增大。在流量相同而坡度不同的情况下,坡面径流侵蚀产沙率随着坡度的增大而明显增加;在坡度相同而流量不同的情况下,坡面径流侵蚀产沙率随着流量的增大也明显增加。由此可见,径流冲刷量的大小并不是唯一决定径流冲刷量多少的因素,它不仅径流能耗、土粒间的粘结力以及土粒的受力状态均有关系,而且与其作用方式、单位时间消耗的能量、流量、坡度等因素也有关系。

3 结论

(1) 从研究结果可以看出,径流在坡面上沿程的流速分布并非呈直线关系增大或减小,而是表现出一定的波动性,坡面薄层水流呈滚波流形式运动,且滚波沿程叠加,其叠加作用与坡面水深、流量、坡度等有关。

(2) 坡面径流侵蚀产沙率与坡面径流能耗之间存在良好的直线关系: $Dr = 18.26(\$E - 8.38)$ 。可以用此式进行坡面侵蚀率的估算,并直接推求土壤抗蚀性参数和细沟发生临界动力参数。本试验黄土的抗蚀性参数为 $18.26 \text{ g}/(\text{J}\cdot\text{dm}^2)$,细沟侵蚀发生的临界能量为 8.38J 。

参考文献:

- [1] Cochrane T A, Flanagan D C. Detachment in a simulated rill[J]. Transactions of the ASAE, 1996, 40(1): 111- 119.
- [2] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(1): 65- 72.
- [3] 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.
- [4] 郑粉莉.黄土区坡耕地细沟间侵蚀和细沟侵蚀的研究[J].土壤学报,1998,35(1): 95- 103.
- [5] 赵晓光,吴发启.单雨滴击溅规律及其对溅蚀土粒的分选作用[J].水土保持学报,2001,15(1): 43- 45.
- [6] 张科利.黄土坡面发育的细沟水动力学特征的研究[J].泥沙研究,1999(1): 56- 61.
- [7] 雷阿林,唐克丽.黄土坡面细沟侵蚀的动力条件[J].水土保持学报,1998,4(3): 39- 43.
- [8] 王贵平.细沟侵蚀研究综述[J].中国水土保持,1998(8): 23- 25.
- [9] 胡世雄,靳长兴.坡面流与坡面侵蚀研究进展[J].水土保持学报,1998,4(6): 1- 9.
- [10] 张光辉,等.坡面流水动力学特性研究[J].水土保持学报,2001,15(1): 58- 61.
- [11] 肖培青,等.细沟侵蚀过程与细沟水流水力学参数的关系研究[J].水土保持学报,2001,15(1): 54- 57.
- [12] 丁文峰,等.黄土坡面径流冲刷侵蚀试验研究[J].水土保持学报,2001,15(2): 99- 101.