

黄土坡面细沟侵蚀发生的临界条件

文峰¹, 李占斌^{1,2}, 鲁克新²

(1. 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; 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, 研究了坡面径流的流速分布和坡面细沟侵蚀发生的临界条件。研究表明: 径流在坡面上并非是以均匀流形式运动, 而是以滚波的形式运动的, 同时本文运用能量守恒原理分析了坡面土壤侵蚀率(Dr)与径流能耗(ΔE)之间的关系, 建立了给定土壤条件下坡面土壤侵蚀率估算模型: $Dr = 0.0026(\ln \Delta E - 2)$ 。结果表明坡面土壤侵蚀的发生具有一定的临界能量条件, 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: 运动波; 侵蚀率; 径流能耗; 临界能量条件

中图分类号: S157

文件标识码: A

土壤侵蚀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限制当地经济发展的主要障碍。长期以来, 土壤侵蚀问题一直受到我国乃至世界土壤侵蚀学者的广泛关注。如何对水土流失作出合理预报已成为困扰土壤侵蚀学界的一大难题。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^[3~4, 6, 7]。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要领域。尽管细沟侵蚀是一个很重要的坡面水蚀过程, 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。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的工作, 他们所使用的定量参数有坡度、弗汝得数、径流剪切力与土壤抗剪强度等, 尽管根据特定的试验土壤或降雨条件可以确定细沟产生的临界值。但一直缺乏一个能够广泛应用于不同侵蚀环境的参数^[3, 6, 8, 9]。本文利用放水冲刷试验对坡面土壤侵蚀过程中的细沟侵蚀发生临界条件进行了研究, 以期为我国具有物理成因的坡面侵蚀预报模型提供理论依据。

1 试验方法及程序

1.1 玻璃水槽试验

试验在一个宽为 50 cm、长为 400 cm、深为 10 cm 的可调坡铝合金框架玻璃水槽上进行。其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。整个试验过程持续 5~10 min。流量采用 0.2 l/s、0.3 l/s、0.4 l/s 三级变化, 坡度采用 16.5°、27°两个坡度。为了保证试验的精度, 每次试验均进行两次重复。

1.2 坡面径流冲刷侵蚀试验

本试验在宽为 33 cm, 长 100 cm, 深 50 cm 的可调坡钢制冲刷槽内进行。先在实验槽下部铺填 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 1.3 g/cm³。为了保证每次试验的初始条件基本一致, 试验开始前先用撒水器均匀在试验土表面撒水, 撒水量控制在土壤表面达到充分饱和但又没有发生产流的程度。供水设备采用定水头控制流量, 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

收稿日期: 2001-08-17;

基金项目: 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金资助(10501-63)。

作者简介: 丁文峰, (1975-), 男, 在读硕士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。

观察径流冲刷过程并记录产流发生时间、细沟开始形成时间, 产流初期每一分钟取一次径流泥沙样, 3 分钟后每两分钟取一次径流泥沙样, 取样的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。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 2.4(l/min)、3.5(l/min)、4.5(l/min)、5.5(l/min)、6.5(l/min), 坡度采用 6°、9°、12° 三级变化。每次试验后, 用量筒测定各个样品的体积, 用置换法测定各个样品的泥沙量。试验用土为杨凌附近的姜土的黄土母质, 其粒径组成如表 1 所示。

表 1 试验土壤的粒径(mm)组成

Table 1 The component of the experimental soil particles in mm

| 1~0.25 | 0.25~0.05 | 0.01~0.005 | 0.05~0.01 | 0.005~0.001 | <0.001 |
|--------|-----------|------------|-----------|-------------|--------|
| 0.12% | 2.70% | 6.88% | 41.13% | 12.89% | 36.28% |

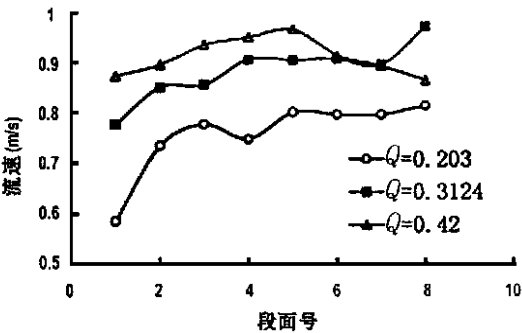


图 1 不同放水流量条件下坡面流流速分布(16.5°)

Fig. 1 The runoff velocity distribution in different condition of runoff scouring with a slope of 16.5 degrees

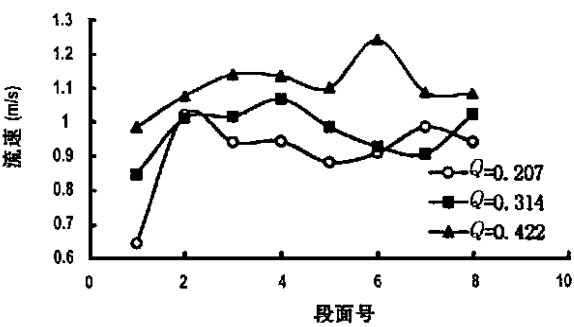


图 2 不同放水流量条件下坡面流流速分布(27°)

Fig. 2 The run off velocity distribution in different condition of run off scouring with a slope of 27 degrees

该试验的研究结果可以用来很好的解释坡面上细沟的形成机制。根据试验中的观察和野外实地考察可知, 细沟在坡面上的形成并非一蹶而就的, 它的形成是遵循一定的规律按不同的发展阶段而形成的。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。既然坡面上的径流的流动是以滚动波的形式向前推进的, 那么在坡面较为平整的情况下, 其滚动波波峰必然在坡面上形成侵蚀切应力的激增点(图 3), 在这些激增点处径流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

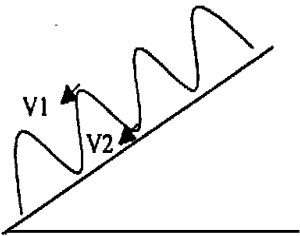


图 3 坡面径流的运动波示意图

Fig3. Skete if the kinematic waves of runoff along the sloping surface

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

坡面上土壤侵蚀产沙是由于坡面上的径流在顺坡流动的过程中, 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对比协调的结果。径流冲刷能力决定于径流本身所具有的能量及含沙量, 其主要影响因素有径流量、地表状况和地表倾斜度等。坡面上结合紧密的土壤颗粒由静止到起动并最终通过径流的输移作用而输出坡面主要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, 使土粒由有序变为松散。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起动准备, 若用 τ_f 代表径流剪切力, τ 代表土粒间的粘结力, 那么有

$$\tau_f - \tau \geq 0, \text{土粒分散}$$

$$\tau_f - \tau \leq 0, \text{土粒不分散}$$

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。如图 3 所示, 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 计算坡面径流的剪切力时, 水深 和水力坡降 以及径流切应力 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。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。

2.3 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所具有的势能为

$$E_{\text{势}} = \rho q g L \sin \theta \quad (1)$$

动能为

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

在理想情况下, 水流到达坡面任意断面时的总能量应为

$$E_{\text{总}} = \rho q g L \sin \theta + \frac{1}{2} \rho q V_1^2 \quad (3)$$

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, 可根据实测得到的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:

$$E_x = \frac{1}{2} q' \rho V_x^2 + q' \rho g (L - X) \sin \theta \quad (4)$$

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

$$E_{\text{耗}} = E_{\text{势}} + E_{\text{动}} - E_x \quad (5)$$

对上式进行时间和长度上的积分得

$$\Delta E_{\text{耗}} = \int_0^T \int_0^L (E_{\text{势}} + E_{\text{动}} - E_x) dL dt \quad (6)$$

式中 E 为试验所持续的时间, L 为试验土槽的坡长, $\Delta E_{\text{耗}}$ 为在坡面径流出口处在整个试验过程中消耗的能量。由于坡面土壤实验前基本使其达到饱和状态, 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(如图 4 所示)。

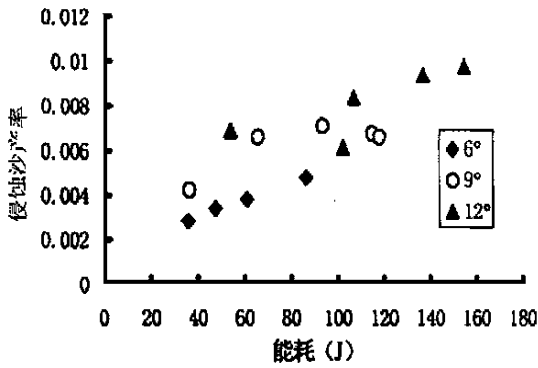


图4 坡面径流能耗与径流侵蚀产沙率的关系图

Fig. 4 The relationship between the runoff energy consumption and soil detachment rate

从图中我们可以看出,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着良好的对数关系。该关系可以用下式表达

$$Dr = k (\ln \Delta E - E_0)$$

式中 K 为与土壤种类有关的侵蚀性系数; ΔE 为径流在坡面上的能耗; E_0 为与坡面土壤细沟侵蚀发生的临界能量有关的参数。并且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。它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 7.38。

另外,从图中我们还可以看出,随着坡面径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,它不仅与径流能耗、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. 通过玻璃水槽试验的研究结果可以看出,径流在坡面上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。

2. 通过土壤冲刷试验表明:试验黄土的细沟侵蚀发生的临界能量为 7.38(J)。

3. 坡面径流侵蚀产沙率与坡面径流能耗之间存在良好的对数关系: $Dr = 0.0026(\ln \Delta E - 2)$ 。可以此进行坡面侵蚀率的估算。

参考文献:

- [1] T. A. Cochrane., D. C. Flanagan. 1996. detachment in a simulated rill. Transactions of the ASAE 40(1): 111~119.
- [2] W. j. Elliot and J. M. Laflen. 1993. A process ~based rill erosion model. Transactions of the ASAE 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,坡面水蚀过程的力能体系及研究思路[J]. 水土保持研究, 2000 7(1): 23~26.
- [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]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 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,坡度、降雨和土壤条件对坡面流及坡面动力侵蚀过程的影响研究[D]. 博士论文, 1998.
- [10] 赵晓光,黄土塬区坡面水蚀作用过程[D]. 博士论文,水土保持研究所, 1999.

The Study of Critical Condition of Rill Erosion on Loess Sloping Surface

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

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

Abstract: Based on the experiment of glass flume and the experiment of runoff scouring, the runoff velocity distribution on slope and the critical condition of rill erosion were researched. The results show that the runoff velocity was not the straight-line distribution along the downslope, but the kinematic waves distribution. At the same time, 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. The rill erosion occurred when the energy consumption exceed 7.38(J).

Key words: kinematic waves; soil erosion rate; the runoff energy consumption; critical acondition of rill erosion