

黄土坡面细沟侵蚀能力的 水动力学试验研究*

张科利

(北京师范大学资源与环境科学系, 北京 100875)

唐克丽

(中科院水土保持研究所, 杨陵 712100)

摘要 建立以水动力学为基础的侵蚀预报模型, 必须解决影响土壤侵蚀发生过程及其强度的各水力要素的合理计算问题。本文通过室内径流冲刷试验, 研究了黄土坡面细沟侵蚀发生的水动力学机理及其输沙特征, 探讨了细沟侵蚀预报模型中, 细沟侵蚀能力计算时所涉及的土壤及有关径流的水力参数: 土壤侵蚀性系数, 细沟侵蚀发生的临界切应力, 细沟径流的平均流速, Manning 糙率系数, 以及反映细沟断面形态特征的系数的估算问题。

关键词 黄土坡面, 细沟侵蚀, 水动力学, 侵蚀预报

中图分类号 S157.1

土壤侵蚀是世界范围的环境问题之一, 特别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。为了改善人类赖以生存的生态环境、促进经济发展, 防治土壤侵蚀、控制水土流失已是当务之急。为此, 必须对水土流失量作出合理预报。近十几年来, 随着对侵蚀机理研究的不断深入及计算机技术的不断发展, 土壤侵蚀预报研究也由一般的因子相关分析向以土壤侵蚀发生过程为基础的过程模型发展, 即以泥沙运动学及河床演变理论为依据, 分析侵蚀发生过程中各因子间的力学关系, 用较为严密的控制方程计算土壤侵蚀量, 出现了一些具有一定物理意义的土壤侵蚀预报模型^[1~4]。然而, 这些模型基本上都是在分析缓坡条件下侵蚀发生过程中的水力学特性的基础上建立的^[5,6], 对具有高含沙特点的陡坡上的坡面流, 特别是细沟流的水动力学特征涉及甚少, 而且还未见有关黄土陡坡上细沟流的水动力学特性的研究报道。本研究通过室内径流冲刷实验, 对形成于黄土陡坡上的细沟流的水力学特征及其侵蚀能力计算问题进行了研究, 目的在于为黄土坡面的侵蚀预报提供理论基础。

1 坡面侵蚀的基本理论

尽管由于地面坡度陡以及径流深较小等原因, 坡面流在流态特征、侵蚀搬运过程等方面有其本身的特点, 但其侵蚀、搬运、沉积过程的基本机理与河流没有本质的区别^[7], 坡面

* 国家教委留学回国人员基金和博士后基金资助课题

收稿日期: 1998-07-01; 收到修改稿日期: 1999-03-01

流必然也满足质量和动量守恒方程,只是其形式或其中的系数更为复杂而已。根据质量守恒定律,细沟中的泥沙连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(AS) + \frac{\partial}{\partial x}(QS) = D_r + D_s \quad (1)$$

其中, A 是细沟中径流过水断面面积 (m^2), S 是径流含沙量 (kg/m^3), Q 为细沟中的径流量 (m^3/s), D_r 为单位时间、单位长度细沟的冲刷分散率 (kg/ms), D_s 为单位时间内, 因雨滴溅蚀及薄层漫流冲刷作用, 进入单位长细沟中的泥沙 (kg/ms)。另据 Foster 等的研究结果^[8], 细沟流的含沙量与径流输沙能力之间也满足平衡输沙概念, 即有关系式:

$$\frac{D_r}{D_{rc}} + \frac{G}{T_c} = 1 \quad (2)$$

其中, G 为细沟输沙率 (kg/s), 其值为 $G = QS$, D_{rc} 为侵蚀能力 (kg/ms), T_c 为细沟径流输沙能力 (kg/s)。由式 (2) 可得到细沟中径流的冲刷分散率的表达式:

$$D_r = \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) D_{rc} = \left(1 - \frac{QS}{T_c}\right) D_{rc} \quad (3)$$

将 (3) 式代入 (1) 式可使细沟中的泥沙连续方程变为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(AS) + \frac{\partial}{\partial x}(QS) = \left(1 - \frac{QS}{T_c}\right) D_{rc} + D_s \quad (4)$$

当不考虑细沟中的径流过水断面面积随时间的变化时, (4) 式可改写为:

$$\frac{\partial G}{\partial x} = \left(1 - \frac{G}{T_c}\right) D_{rc} + D_s \quad (5)$$

要解算式 (5), 合理地求算其中各参数的大小是解决问题的关键。本文通过研究黄土坡面上形成的细沟流的水动力学特征, 在对式 (5) 中细沟流的侵蚀能力 D_{rc} 计算时的相关参数评价方面进行了尝试。

2 试验方法

据前人的研究, 坡面细沟侵蚀主要受制于细沟中水流特性及土壤性质, 受雨滴打击的影响很小^[9]。一场暴雨过程中, 自然坡面上发育的细沟, 其深宽因分布的部位、土质条件等的不同, 其规模在尺度上变化很大, 但其宽度一般为几厘米到几十厘米不等, 深度大多也不超过 20cm (黄土坡面上犁底层的深度)。因此, 坡面细沟流的水力学特征及其之间的相互关系可以通过水流冲刷试验来研究。

本试验在宽为 50cm, 长 500cm, 深 70cm 的可调坡钢制冲刷槽内进行。在装填实验土之前, 先在实验槽中铺填 30cm 厚的天然沙, 以保持实验土的透水状况接近天然坡面。把现场采取的土样过筛, 通过 2cm 孔径的部分填入试验槽, 填土时边填边用力压实, 然后再将表层 20cm 左右翻松以模拟耕作层, 填土完成后试验槽土壤表层的干容重为 $1.17\text{g}/\text{cm}^3$ 。供水设备采用定水头控制流量, 从试验槽上端按设计要求加注不同的流量。为了保证每次试验土壤含水量一致, 试验开始前先均匀地在试验土表面撒水, 撒水量控制在能使土壤表面充分饱和, 但又未发生径流的程度。试验开始后, 仔细观察径流冲刷过程, 细沟形成以后, 用染色法测定细沟中径流的平均流速, 用清华大学研制的淤积地形测定仪测量水深的变化。在测定流速和水深的同时, 每 3min 取一次径流泥沙样。整个实验持续 30min。试验流量变化于 $40\sim 500\text{ml}/\text{s}$ 之

间,每个流量值连续重复试验二次。坡度采用 6° 、 10° 、 12° 和 15° 共四级变化。每次试验后,用称重法测定各个样品的径流量,用重量置换法计算泥沙量。试验用土为采自北京官厅水库附近的黄土母质,其粒径组成如表 1 所示。

表 1 试验土壤的粒径组成

Table 1 Particle size distribution and median diameter of tested soil

粒 径	百分比%	中数粒径	粒 径	百分比%	中数粒径
Particle size(mm)	Percentage	Median diameter(mm)	Particle size(mm)	Percentage	Median diameter(mm)
0.25~0.05	3.3		0.005~0.001	12.8	0.0185
0.05~0.01	63.2	0.0185	<0.001	6.4	
0.01~0.005	14.3				

3 结果分析

3.1 基本公式推导

径流汇集成股流发生细沟侵蚀后,径流剥离搬运土粒的方式已与薄层漫流有着本质的不同。降雨打击对径流侵蚀作用的影响已经很弱,细沟侵蚀强度主要决定于细沟流的水力特征,如径流量、平均径流速度大小。据前人研究^[10],细沟流的侵蚀能力与径流剪切应力的大小密切相关:

$$D_w = k_r(\tau - \tau_0) \quad (6)$$

其中, k_r 为与土壤性质有关的系数 (s/m), τ 是细沟中径流的平均切应力 (Pa), τ_0 细沟侵蚀开始发生的临界切应力 (Pa)。又根据河流动力学原理,水流切应力大小决定于水力半径和水流能坡:

$$\tau = \gamma RJ \quad (7)$$

式中 γ 为水的比重 (kg/m^3), R 细沟流的水力半径 (m), J 是水流能坡, $J = \tan \alpha$, α 是底床的坡度,由于在细沟形成发展过程中,细沟底床在不断加深, α 实际上在不断变化。水流能坡 J 可取地面坡度与细沟最终底床的坡度的平均值, $J = \tan \theta - \Delta h / (2L)$, θ 是地表坡度, Δh 是细沟侵蚀深, L 为细沟长度。在细沟较浅且较长时,可以用坡面坡度来替代水流能坡。

Moore 和 Burch 通过研究不同条件下细沟的断面形态后认为^[11],细沟流的水力半径可以用 (8) 式来估算:

$$R = CA^{1/2} \quad (8)$$

式中 A 为细沟流的过水断面面积 (m^2), C 是与细沟断面形态有关的系数。到此可以看出,在细沟流侵蚀切应力计算中,必须首先解决断面形态系数 C 和过水断面面积 A 的估算问题。因为 $Q = AV$, $A = Q/V$, V 为平均径流速度。根据 Manning 公式:

$$V = \frac{1}{n} J^{1/2} R^{2/3} \quad (9)$$

式中 J 和 R 意义同上, n 为 Manning 糙率系数。将 (8) 代入 (9) 式得:

$$V = \frac{1}{n} J^{1/2} (CA)^{2/3} \quad (10)$$

把 $Q = AV$, $V = Q/A$ 代入(10)得,

$$V = \frac{C^{2/3}}{n} J^{1/2} (Q/V)^{1/3} \quad (11)$$

经整理式(11)可改写为:

$$V = \frac{J^{0.375}}{n^{0.75}} Q^{0.25} C^{0.5} = \frac{C^{0.5}}{n^{0.75}} Q^{0.25} J^{0.375} \quad (12)$$

至此,由以上推导可见,计算坡面细沟中径流侵蚀能力 D_{rc} 时,需要估算的土壤及径流水力学参数有:土壤侵蚀性系数 k_r , 该土壤上径流汇集发生细沟侵蚀的临界切应力 τ_0 , 细沟流的平均流速 V , Manning 糙率系数 n , 以及反映细沟断面形态特征的系数 C 。其中,土壤侵蚀性系数 k_r 和发生细沟侵蚀的临界切应力 τ_0 是与土壤性质密切有关两个指标。

3.2 基本参数的确定

以上推导已经得到了细沟侵蚀能力的计算公式及其计算过程,只要能确定其中的相关参数,便可以根据细沟流的水力特征值来计算坡面细沟侵蚀能力。对于黄土的侵蚀性系数 k_r 和发生细沟侵蚀的临界切应力 τ_0 , 如果黄土坡面上形成的细沟中的径流侵蚀能力也满足关系式(6), 其值便可确定。为此,根据试验结果,我们点绘了细沟径流分散土壤的能力与径流切应力之间的关系,如图1所示。图1的变化趋势表明,黄土陡坡面上形成的细沟中的径流侵蚀能力,也与径流切应力之间存在着良好的关系,经相关分析得到方程:

$$D_{rc} = 8.18 \times 10^{-4} (\tau - 7) \quad (13)$$

相关系数达 0.8899 (统计样本数为 46)。与式(6)比较,可以确定试验黄土的细沟径流侵蚀性系数 k_r 为 8.18×10^{-4} (s/m), 发生细沟侵蚀的临界切应力 τ_0 为 7 (Pa)。平均流速的大小是反映细沟流水力特征的重要指标。知道平均流速,不仅可以通过计算径流过水断面面积来求算细沟流的水力半径,还可以用来计算水流挟沙能力等水流特征。因此,求算细沟侵蚀过程中的径流平均流速十分必要。根据试验中测定的不同坡度下、各种设计流量

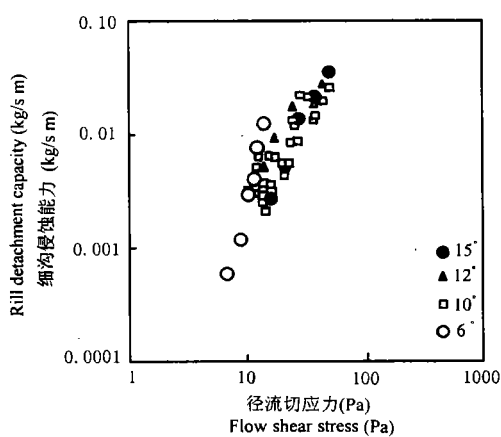


图1 径流切应力与细沟侵蚀能力的关系

Fig.1 The relationship between rill detachment capacity and shear stress of flow

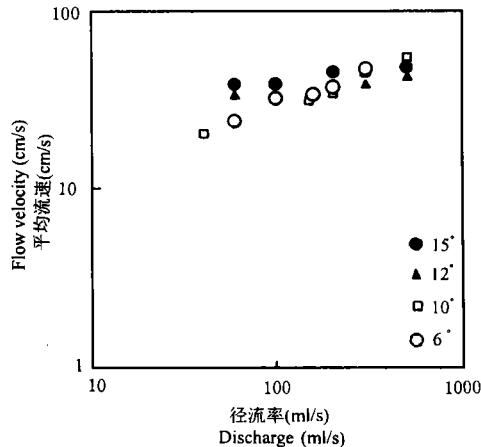


图2 流量和平均流速之间的关系

Fig.2 The relationship between flow volume and velocity

时平均流速值的结果分析, 细沟流的平均流速与径流量和坡度之间有良好的关系(图 2):

$$V = 5.544Q^{0.2636}J^{0.2511} \quad (14)$$

式(14)与理论推导的流速公式(12)中的指数接近, 式中系数便是 $\frac{C^{0.5}}{n^{0.75}}$ 项。根据式(14), 只

要知道细沟流的径流量和坡度, 就能计算出平均流速值。

糙率系数是反映坡面对水流阻滞作用的参数。不仅与粒径等土壤性质有关, 而且在很大程度上受细沟的形态特征决定。形态特征的影响作用在不同的水流条件下变化很大。为了探讨细沟流侵蚀过程中, 黄土坡面的 Manning 糙率系数, 试验中测定了不同坡度下、各种设计流量时的平均流速值。用 Manning 公式计算各种水流条件下的糙率系数, 点绘其与径流量的关系, 如图 3 所示。由图中散点的变化趋势可以看出, 在试验的坡度和流量范围内, 黄土坡面细沟中的 Manning 糙率系数变化于 0.035~0.071 之间, 平均值为 0.0536。而且, 其大小与细沟中的径流量的多少及坡度的陡缓密切相关。细沟中的糙率系数因坡度的陡缓不同, 随流量的变化具有不同的增减趋势。就试验条件下的结果而言, 在坡面坡度分别为 6° 和 10° 的缓坡上, 细沟中的糙率系数随流量的增加而变小; 在坡面坡度分别为 12° 和 15° 的较陡坡面上, 糙率系数随流量的增加而增大。这一变化趋势可能是由于流量增加而引起的相对糙率 D/h 变化与冲刷形态的变化消涨对比在不同坡度上不尽相同所致。流量的增加意味着水深增大, 将使相对糙率变小。然而, 流量的增大也意味着冲刷强度增大, 又将使细沟形态复杂化。在坡度相对较缓时, 流量由小变大时引起的糙率减小的程度相对于形态变化引起的增大程度的要大。因此, 糙率系数随流量的增大而变小。坡度较大时, 尽管随径流量的增大相对糙率也会变小, 但是, 流量增大引起细沟侵蚀加剧, 细沟断面形态复杂, 在床面形成许多陡坎。同时, 由于流速增大后, 表面形成的菱形波对流的干扰程度也会增加, 使水流本身的扰动增强。所有这些又都使糙率增加。因此, 糙率系数随流量的增大而变大。由于糙率系数这一变化趋势, 在进行坡面水力计算时, 糙率大小的选定既要考虑流量的影响, 又应顾及坡度的影响作用。

细沟断面形态特征是径流冲刷塑造的结果, 其形状大小反过来又影响制约径流侵蚀作用的强度。由于断面形态的不同, 即使在流量不变的情况下, 侵蚀过程中径流深及边壁阻力的大小也会有很大的差异。细沟断面形态不只受水流强度决定, 与土质特性及地面坡降也有很大的关系。由于影响因素的复杂性, 在实验条件完全相同的不同次冲刷中也会形成不同的形态, 即使在同一次实验中, 不同部位也可形成不同的断面形态, 即细沟断面形态沿坡面在纵向上存在着很大的变化。鉴于这一事实, 研究细沟断面形态必须先找出一个能客观反映形态变化特征的数量指标。根据实验中实际量测的数据, 如果将细沟断面形态加以概化, 有近似倒三角形、近似倒梯形、近似矩形和近似抛物线形等形态。在宽深相同的情况下, 形态不同时断面面积有很大的差别。当形态接近矩形时, 断面面积最大。而当形态接近倒三角形时, 断面面积最小。当形态接近倒梯形时, 断面面积居中。

因此, 可以用断面面积 (A) 与具有相同深宽的矩形面积 (S) 之比 $\eta(A/S)$ 来表征细沟断面形态。 η 值愈大, 说明细沟断面形态愈接近于矩形。 η 值愈小, 说明细沟断中的量测资料, 细沟断面形态指标 η 值变化与 0.5~0.9 之间。若按照 η 值大小, 当 η 值分别介于 0.5~0.6, 0.6~0.7, 0.7~0.8, 0.8~0.9 和 $\eta > 0.9$ 时, 将细沟断面分为五类, 其 η 值的变化服从正

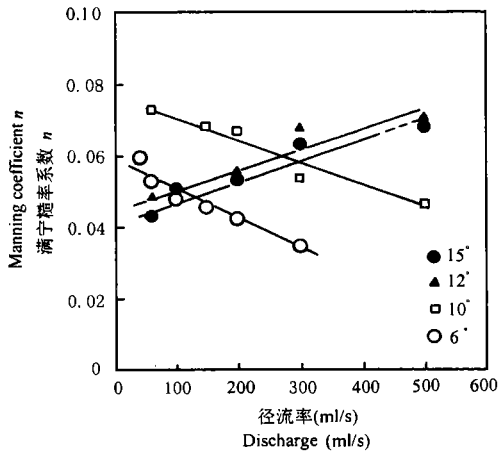


图3 不同坡度及流量下的满宁糙率系数变化

Fig.3 Manning roughness coefficient at different flow volume and tested slope gradients

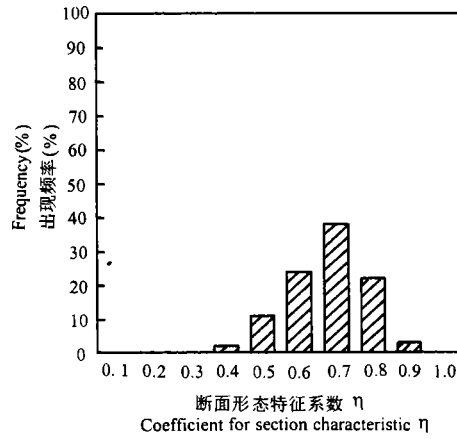


图4 细沟断面形态指标的频率分布

Fig.4 Frequency distribution of coefficient showing rill section characteristic

态分布(图4)。即形态接近于梯形和抛物线的断面出现频率最高,近似三角形和矩形的断面不多。这样就可以参考 Moore 和 Burch 提出的公式(15)来计算细沟断面的形态系数 $C^{[1]}$:

$$C = 1.223\varepsilon^{1.5} / (1.5\varepsilon^2 + 4) \quad (15)$$

式中 ε 为细沟流过水断面的宽深比。另外,还可以通过确定的糙率系数大小,用 $C = 30.74n^{1.5}$ 来估算细沟断面形态系数。以上各细沟流水力学参数确定以后,就可以根据细沟流的流量及坡面坡度,用相应的公式计算细沟径流的侵蚀力。

4 结 语

运用水力学理论及试验结果,分析了黄土坡面细沟中径流的侵蚀能力的变化规律及其影响因素。根据试验结果分析,提出了估算影响侵蚀年力的各参数的方法。待以上各参数确定以后,就可以根据细沟流的流量及坡面坡度,用水动力学基础明确的公式,计算细沟流的侵蚀能力。然而,由于用水动力学原理来研究形成于黄土陡坡面上的细沟侵蚀能力,在我国目前还仅仅是开始,文中提出的水力参数计算公式也只是在试验流量和坡度范围条件下的结果,今后还需要通过更多的流量及坡度变化,对各种级配的土壤进行试验研究,修正有关系数,提高其通用性,最终建立适用于黄土高原且具有明确物理基础的侵蚀预报模型。

致 谢 本文得到王士强教授审阅及其他同事的帮助,仅此致谢。

参 考 文 献

1. Beaseley D B, Huggins L F, Monke E J. ANSWERS: A model for water planning. Trans. of ASAE, 1980, 23: 938~944

2. Mogan R P C, Morgan D D V, Finney H J. A predictive model for the assessment of soil erosion risk. *J. Agr. Eng. Res.*, 1984, 30: 245~253
3. Nearing M A, Forster G R, Lane L J, Finkner S C. A Process-based soil erosion model for USDA-water erosion prediction project technology. *Trans. of ASAE*, 1989, 32(5): 1587~1593
4. Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model. *Trans. of ASAE*, 1993, 36(1): 65~72
5. Abrahams A D, Gang L, Parsons A J. Rill hydraulics on a semiarid hillslope, southern Arizona. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1996, 21: 35~47
6. Gilley J E, Kottwitz E R, Simanton J R. Hydraulic characteristics of rills. *Trans. of ASAE*, 1990, 33: 1900~1906
7. Moss A J. Thin-flow transportation of solids in arid and non-arid areas: A comparison. *IAHS-AISH Publ.*, 1979, 128: 435~445
8. Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationship. *Trans. of ASAE*, 1984, 27(3): 790~796
9. Shen H W. In *Sedimentation: Symposium to Honor Professor H. A. Einstein*, Fort Collins, CO: Colorado State Univ., 1975, 12.1~12.19
10. Huang Chi-hua, Bradford J M, Laflen J M. Evaluation of detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1996, 60: 734~739
11. Moore I D, Burch G J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Resources Research*, 1986, 22(8): 1350~1360

A STUDY ON HYDRAULIC CHARACTERISTICS OF FLOW FOR PREDICTION OF RILL DETACHMENT CAPACITY ON LOESS SLOPE

Zhang Ke-li

(Department of Resource and Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Tang Ke-li

(Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling 712100)

Summary

In recent years, some process-based soil erosion prediction models are proposed in order to promote soil loss prediction on slope. In such prediction models, estimation of hydrodynamic parameters in soil erosion processes is the key to predict soil loss on slope exactly. Based on the runoff experiments in laboratory, the mechanism of rill erosion and sediment transport in rill are studied and the method to estimate the hydraulics of flow in rill, such as critical shear stress for rill initiation, mean velocity of flow in the rill, Manning roughness coefficient, soil erodibility for rill erosion, as well as rill section characteristic are discussed in this paper.

Key words Loess slope, Rill erosion, Hydrodynamics, Erosion prediction