

文章编号: 1002-6819(2001)06-0005-04

确定陡坡细沟侵蚀含沙量的解析方法

雷廷武^{1,2}, 张晴雯¹, 赵军¹, 刘纪根¹

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所; 2. 中国农业大学)

摘要: 该文介绍一种解析方法, 由细沟剥蚀率与含沙量关系以及剥蚀率与水流含沙量及沟长的微分物理表达式, 推求出了含沙量与沟长关系数学表达式。提出了一种侵蚀细沟含沙量化计算的新方法。并将用该方法计算得到的两种流量下细沟水流含沙量结果与由试验值进行了比较, 结果表明: 两者相关密切, 得到的 R^2 值均很高, 最低为 0.81, 验证了此解析式的有效性。验证了细沟土壤侵蚀的剥蚀率与水流含沙量的关系式的正确性。

关键词: 细沟侵蚀; 解析法; 含沙量; 陡坡

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A

细沟侵蚀降低了土地肥力和生产可耕性^[1~5]。土壤中的有机质和全氮(主要为有机氮)与侵蚀物质中的细颗粒结合, 带走了生物所需要的营养物质。被冲走的细沙最终将进入沟道系统, 导致沟塘库渠淤积, 农业排灌能力下降。研究细沟侵蚀的作用机理已成为坡耕地侵蚀动态监测和水土保持措施实施部署的主要技术关键。估算细沟侵蚀含沙量是确定坡耕地采取水土保持措施的依据之一, 通过确定引起细沟水蚀的关键因子, 指定相应的水保治理措施, 并利用其量化关系为坡面侵蚀模拟和建立预报模型服务。

传统的含沙量测量和估算方法是通过试验采集泥沙样, 量测采样体积, 然后在试验室烘干称重再算出其浓度。这种方法仅能得到某个时间或断面的离散数据, 无法获得侵蚀的动态分布。本文通过数学推导得到了较为合理的求解方法, 可以通过确定几个相关参数, 然后由解析式求出任意一点的含沙量。

1 确定细沟侵蚀含沙量的解析方法

含沙量(kg/m^3)是指单位体积浑水内挟带的泥沙的质量^[6,7]。由细沟侵蚀模拟试验得到了土壤剥蚀率与水流含沙量的关系^[8], 对于黄土高原的粉壤土(黄绵土), 剥蚀率随含沙量的增加(近似地)呈线性减小。

$$D_r = a - by \quad (1)$$

式中 D_r ——土壤剥蚀率, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$; $a, b(a > 0, b > 0)$ ——回归系数; y ——水流的含沙量, kg/m^3 。由细沟剥蚀率的物理定理, 给出如下微分表达式

$$D_r = \frac{dy}{dx} q \quad (2)$$

由式(1)及(2)有

$$\frac{dy}{dx} q = a - by \quad (3)$$

式中 $q = Q/w$ ——单宽流量, m^2/s ; w ——沟宽, m ; x ——细沟长度, m , 边界条件

$$y|_{x=0} = 0 \quad (4)$$

由式(3)积分, 并运用边界条件(4)得到以沟长为自变量的含沙量的解析式

$$y = \frac{a}{b} \left(1 - e^{-\frac{bx}{q}} \right) \quad (5)$$

2 解析式的验证

2.1 解析式估算含沙量及其与沟长的关系

由细沟发生的水动力学条件, 根据能量转化原理, 选择坡度和流量为主要动力影响因子, 设计了室内细沟冲刷模拟试验。试验设计了 5 个坡度和 3 个流量, 以及 9 个不同的细沟坡长, 得到了不同水动力条件下不同细沟沟长时的含沙量, 分析了细沟剥蚀率与含沙量的关系, 具体实验方法及操作过程见参考文献[8], 此处不再赘述。由参考文献[8]关于细沟土壤侵蚀剥蚀率与水流含沙量的关系的分析, 给出了不同水动力条件下的 a, b 值, 将其代入式(5)含沙

收稿日期: 2001-02-06 修订日期: 2001-07-02

基金项目: 中国科学院“百人计划”项目资助(982602); 教育部资助项目(重大 01-10)

作者简介: 雷廷武, 教授, 博士生导师, 中国农业大学水利与土木工程学院, 中国科学院水利部水土保持研究所, 712160

量与沟长的关系式,得到了不同坡度和流量条件下的含沙量与沟长的关系。将由解析式(5)得到的含沙量与由试验数据直接测量得到的相应条件下的含沙

量随坡长变化的趋势点绘于图 1a 至图 1e(图中字符 A (analytic)表示由解析式得到的载沙量, E (experiment) 为由实验数据直接估算得到的值)。

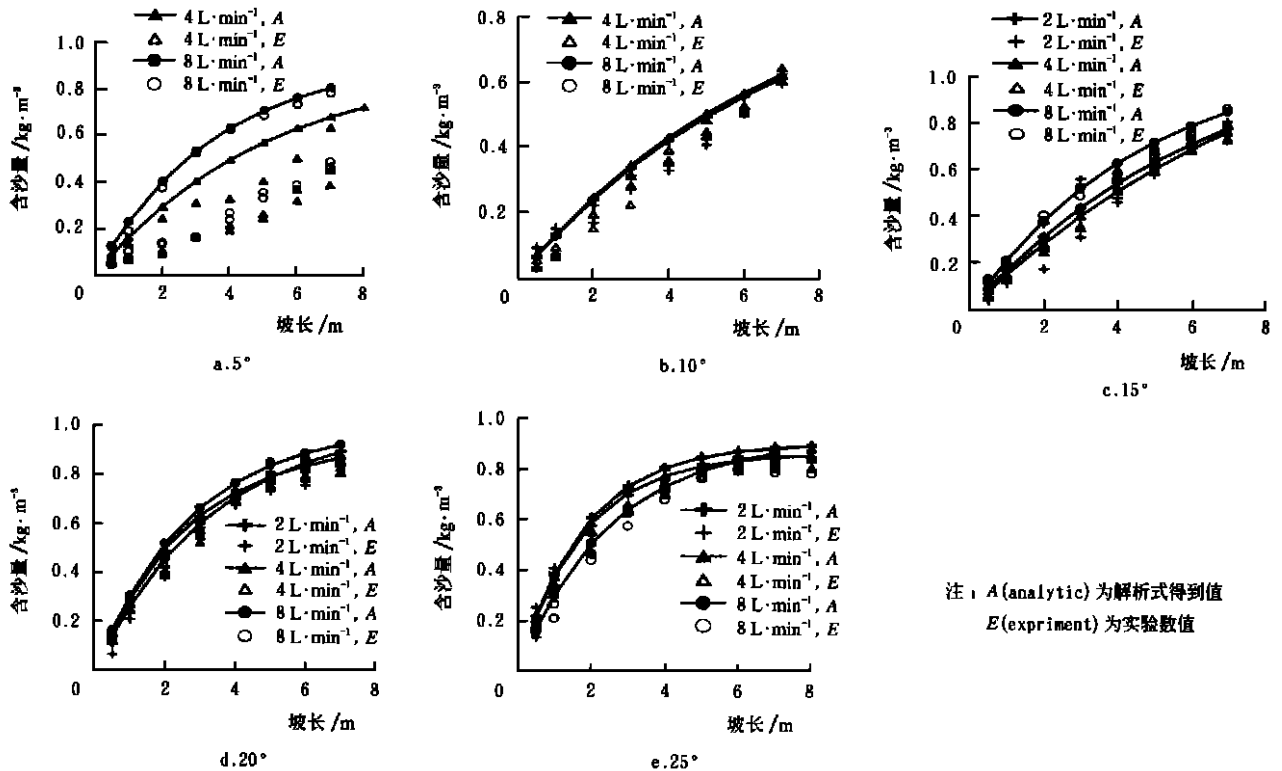


图 1 解析法确定的输沙量与试验数据估算的输沙量在不同坡度下随沟长的变化

Fig. 1 The relationship between sediment concentration from analytical method and those directly estimated from measured data with the rill length

由图 1a 至图 1e 可以看出,除 5°以外,由解析式得到的含沙量和由试验数据直接得到的含沙量均显示了良好的吻合性。而且由不同坡度和流量时的含沙量随坡长变化的趋势可以看出,随着坡长的增加含沙量迅速增加,但增加的幅度(曲线斜率)逐渐变缓。含沙量随坡长的这种变化趋势(迅速增加,到一定值后又逐渐变缓)随坡度的增加表现的更加明显。由不同坡度和流量的分析计算结果和图中数据点的分布趋势来看,由式(5)得到的含沙量与由试验数据直接估算得到的含沙量有很好的吻合性,直观的反映了此解析式的合理性。并且同时说明了细沟土壤侵蚀的剥蚀率与水流含沙量的关系式(1)的正确性。

2.2 解析式计算值与试验值的相关分析

为了定量判断计算结果的好坏,将解析式(5)得到的不同坡度及流量下含沙量与试验数据直接计算值进行了回归分析,见图 2a 至图 2e 所示。

图中直线斜率为 45°,即为 1:1 的函数直线,数据点距离 1:1 直线越近,说明解析法计算值与由实验数据直接估算值一致性越好。从图 2a 至 2e 中可以看出不同坡度和流量下的数据点都较集中,且均在 1:1 斜线附近,这表明解析法结果与试验数据计算值吻合很好。对两种方法得到的结果进行相关性分析,除 5°以外,其它坡度条件下的相关系数值均很高,不同水动力学条件下的 R^2 如表 1 所示。不同坡度下的拟合情况可以看出,由解析式得到的含沙量与由试验数据直接估算值,随坡度的增加两个值更接近。从各图的数据点分布可以看出,除 5°时由解析式得到的含沙量比试验数据直接估算值要大一些外,在坡度 10°,15°,20°,25°时由解析式得到的含沙量比试验数据直接估算值的偏差要小一些。总的来看,由解析式得到的含沙量与试验数据直接计算值基本一致,且表现出了良好的一致性。

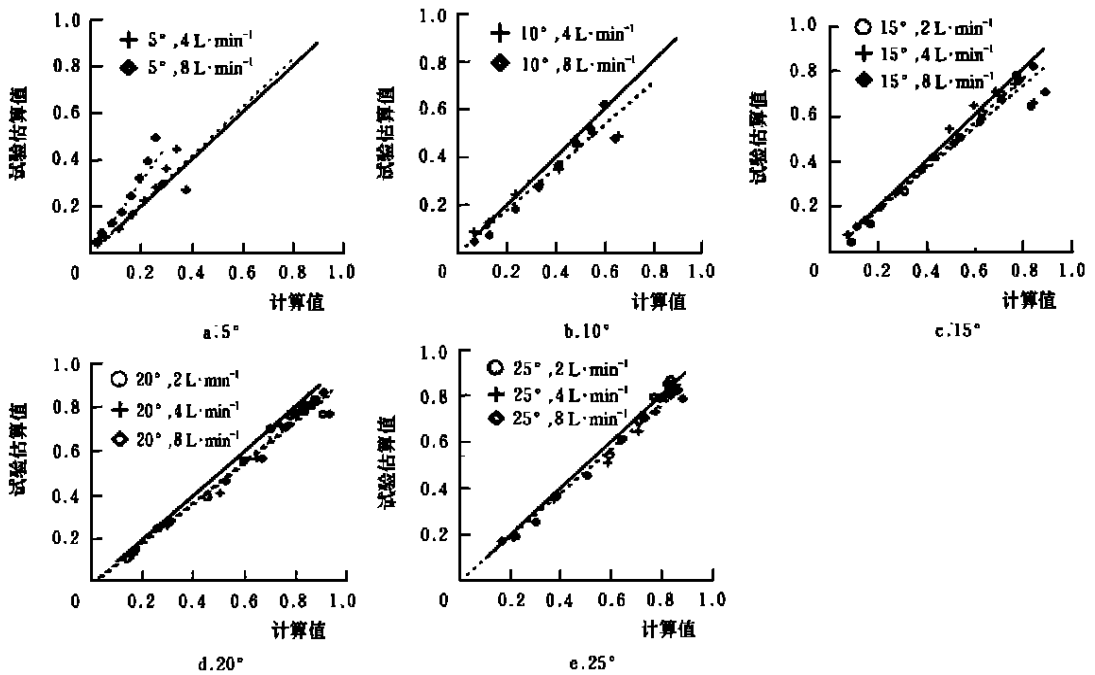


图 2 解析法计算的输沙量与试验数据估算值相关性分析

Fig. 2 Comparison of analytically computed sediment concentration with those directly from measured data

表 1 解析法确定的输沙量与试验数据估算值相关性分析结果

Table 1 Regressed results of analytically computed sediment concentration with those directly from measured data

坡度	流量/L · min ⁻¹	R ²	1 : 1 斜线
5°	4	0.81	y = 1.0407x
	8	0.81	y = 1.5302x
10°	4	0.93	y = 0.8835x
	8	0.93	y = 0.8928x
15°	2	0.95	y = 0.9097x
	4	0.93	y = 0.9452x
	8	0.97	y = 0.9046x
20°	2	0.98	y = 0.9266x
	4	0.99	y = 0.9185x
	8	0.97	y = 0.9046x
25°	2	0.99	y = 0.996x
	4	0.99	y = 0.9526x
	8	0.99	y = 0.9382x

3 结 语

由于坡面细沟侵蚀影响因素多而复杂,且由于时间和空间的变异性,带来了对其动态过程研究的困难。要想对坡面侵蚀进行动态监测模拟预报,必须对水蚀过程的关键参数进行量化。本文在一定的初始和边界条件下,通过推导得出了侵蚀细沟中水流

含沙量与沟长关系的解析计算公式。经验证,此解析式可得到较精确的计算结果。由于此计算公式的物理概念明确,计算步骤也比较简单,计算工作量相对较少,有利于分析各有关因素对含沙量的影响,可用于坡面侵蚀动态模拟和预报。另外,在陡坡下解析计算值与试验值良好的一致性,使其应用范围可望在更陡坡面(> 25°)的其它水蚀过程的侵蚀预报中拓展。并且,该方法及其计算结果说明了细沟土壤侵蚀的剥蚀率与水流含沙量的关系式(1)的正确性。

[参 考 文 献]

[1] 张科利,唐克丽.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.
 [2] Huang Chihua, Braford J M, Lafen J M. Evaluation of detachment transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation[J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 734~739.
 [3] Nearing M A, Norton L D, Bulgakov D A. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865~876.
 [4] Zheng Fenli, Huang Chihua, Darrell Norton L. Vertical hydraulic gradient and run-on water and sediment effects on erosion processes and sediment regimens [J]. Soil Sci Soc Am J, 2000, 64: 4~11.
 [5] Lei Tingwu, Mark A. Nearing, Kamyar Haghghi, et al. Rill erosion and morphological evolution: a simu-

lation model[J]. *Water Resources Research*, 1998, 34 (11): 3157~3168.

- [6] Kinnell P I A. The effect of slope length on sediment concentration associated with side-slope erosion [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64: 1004~1008.

[7] 沙玉清. 泥沙运动学引论[M]. 北京: 中国工业出版社, 1965. 186~188.

- [8] 雷廷武, 张晴雯, 赵 军. 细沟中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.

Analytic Method for Computing Sediment Concentration in Eroding Rills on Steep Slope

Lei Tingwu^{1,2}, Zhang Qingwen¹, Zhao Jun¹, Liu Jigen¹

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

2. Faculty of Irrigation and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A analytic method was advanced for determining the relationship of sediment concentration change with rill length, from the relationship of the detachment rate of eroding rill with sediment concentration and the derivative function of detachment rate. The computed results from this analytic method was compared with those obtained directly from experiment, for the purpose of validating the method. And statistic analysis of the results under different slope and flow rate conditions showed very high correlative coefficients, with the lowest square correlative coefficient of 0.81. The results imply the validation of the analytical method advanced and that of the detachment rate function as related to sediment concentration in the flowing water, advanced in the related research.

Key words: rill erosion; analytical method; sediment yield; steep slope