

细沟侵蚀动态过程模拟室内试验和模型验证研究

姚春梅¹, 雷廷武^{1,2}, 张晴雯², Mark Nearing³, 邵明安²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院, 水利部 水土保持研究所, 杨凌 712100;

3. Southwest Watershed Research Center, 2000 E Allen Rd Tucson, AZ 85719, U SA)

摘 要: 进行了一系列室内试验, 以验证模拟细沟演变动态过程的数学模型。该模型模拟了细沟水流的动态过程、水力学特性参数的空间变化、细沟中土壤的剥离、运输及沉积过程; 模拟了细沟在侵蚀过程中的形态演变, 其中包括沟宽、沟深、局部坡度在空间上的差异及其随时间的变化; 模拟了细沟侵蚀/泥沙沉积后局部细沟形态的变化对细沟水流反馈效应。试验土壤为砂壤土, 采用的坡度为: 3%, 5%, 7%; 3个流量: 7. 6, 11. 4, 15. 2 L/m in。在同一试验条件不同工况下对模型进行了验证, 同时对细沟中沿程水流速度和细沟末端的侵蚀产沙量进行了模拟值和试验实测值的对比。结果表明, 模型预测值和实测细沟形态演变值具有很好的一致性, 模型中提出的侵蚀、沟床形态变化和流体力学特性参数间的互反馈环效应可以反映细沟侵蚀的动态演变过程和发展趋势。

关键词: 细沟侵蚀; 动态过程; 模拟; 模型验证; 室内试验

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)05-0055-08

0 引言

细沟及其演变过程在土壤水蚀过程中起着很大的作用。细沟中的侵蚀过程不可避免地引起细沟沟床的变化, 即形态的演化。很多现有的模型如 WEPP^[1]、GUEST^[2]、EuroSEM^[3,4]及其他一些模型都是稳态模型, 未考虑细沟演化和许多与之相关的过程。因此现有的模型不能用于定量地描述细沟演变的动态过程。

许多土壤侵蚀试验表明, 由于试验条件很难控制, 试验中测得的参数变异很大。人们一直很难进行数据之间的对比, 更不用说用这些数据来更好地理解细沟的演变。到目前为止, 尚无法用试验来跟踪细沟演变的动态过程。因此, 要想由试验本身来理解侵蚀过程似乎是非常困难的。

用基于物理过程的模型输入合适的参数进行复杂的数值模拟, 可以模拟许多不同条件下不同的工况, 在某种程度上定量地反映细沟演变及其相关的诸多方面。

该项研究的目的是, 用雷廷武等已建立的模型^[5]和数值模拟方法, 将模拟得到的结果与试验结果对比, 检验模型本身及数值计算过程。具体做法是, 首先将一个新开发的输沙能力函数和一个紊流影响下的土壤剥离函数引入到模型中, 进行输沙能力的计算, 并确定剥蚀率, 再将模拟得到的流速、出口水流含沙量结果与试验数据对比来验证模型及相应的计算方法。

还将分析一些参数(如水力扩散系数 D_H , 沉积参数 β)的作用及其确定方法。然后, 研究不同工况以说明沿沟长、随时间变化发生的剥蚀率的变化、输沙能力、泥沙含量的关系、细沟高程和沟宽的变化。试验土壤为砂壤土, 采用的坡度为: 3%, 5%, 7%; 流量: 7. 6, 11. 4, 15. 2 L/m in。

1 方法

1.1 试验方法

用长8 m × 0.6 m的土槽进行试验, 土槽的坡度可调。砂壤土经风干、筛过后装填, 装土厚度20 cm, 用以模拟均质土壤形成的坡地。装土后, 在土壤表面(横断面上)形成很小的坡度, 以保证沿土槽长度上初始水流向横断面的中部汇集。试验采用的坡度为: 3%, 5%, 7%。在沟床的上端($x = 0$, 入口)处引入流量稳定的清水(即入口处泥沙含量为0)。每个坡度采用3种不同的流量: 7. 6, 11. 4, 15. 2 L/m in。

对于每一种流量和坡度, 当水流稳定以后, 测量不同沟段的平均流速、沿沟长的沟宽及出口处的泥沙含量。在土槽的边壁上以30 cm的间距作上标记以辅助速度与宽度测量。流速用染料法测量, 用秒表记录染料由一个标记点流到其下游1.5 m处另一个标记点所需的时间, 由此计算出该两点之间的平均流速。每次试验中, 8 m土槽测量5个流速。每次试验中, 记录各个标记处的宽度, 即27个。每次试验由出口处取2~3个水样, 用于确定泥沙含量。

1.2 边界与初始条件

根据试验设置情况, 模拟过程的边界条件如下

$$\begin{cases} V_{x0} = V_0 \\ H_{x0} = H_0 \\ c_{x0} = 0 \\ \left. \frac{\partial c}{\partial x} \right|_{x=x_0} = \frac{S(0,t)}{V(0,t)H(0,t)} \end{cases} \quad (1)$$

式中 c ——泥沙含量, kg/m^3 ; $S(x,t)$ ——细沟的坡

收稿日期: 2003-12-02 修订日期: 2004-06-10

基金项目: 教育部重大项目“细沟土壤侵蚀动力过程模型模拟及其基本参数的系统研究”; 中国科学院知识创新重要方向项目“水蚀预报模型研究”资助(KZCX3-SW-422)

作者简介: 姚春梅, 副教授, 硕士生导师, 从事土壤侵蚀及水土保持研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院。Email: ychunmei@cau.edu.cn; yaochunmei0@163.com

通讯作者: 雷廷武, 博士, 教授, 博士生导师, 从事土壤侵蚀及水土保持研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083; 陕西杨凌 中国科学院, 水利部 水土保持研究所, 712100。Email: ddragon@public3.bta.net.cn

度, m/m ; V_0, H_0 ——入口处的流速与水流深度, m/s , m , 受入口流量 q 制约, 限制条件如下

$$q = V_0 H_0 w_0$$

式中 w_0 ——入口处细沟宽度, cm 。

初始条件为:

$$\begin{cases} V_{xi}(x, t = 0) = V_i \\ H_i(x, t = 0) = H_i \\ c_i(t = 0) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

V_i 与 H_i 可以设定为大于零的任意值, 只有考虑到文献[5]中的(3)式时 H_i 不能为零。

2 物性参数

2.1 概率函数的剥离率系数 - K

试验数据用于检验模型的有效性。对于如雷廷武等[5]中(13)式给出的土壤剥离项, 用于估计参数 K 的数据如剥离率 D_r , 坡度 S_x , 水深 h 及 Chezy 值 C , 采用 Nearing[6]给出的结果, 并列入表 1。在表中根据 Nearing 建议, 取

$$\tau_b = 150\tau \quad (3)$$

剥离概率用下列(4)式进行数值计算

$$P = \int_{\tau_0}^{\infty} f(T) dT + \left[1 - \int_{\tau_0}^{\tau_b} f(\tau_b) d\tau \right] \quad (4)$$

式中 $f()$ 为正态分布函数, 表达式如下

$$f(t) = \exp\left\{-\frac{(x - T)^2}{2\sigma_T^2}\right\} \quad (4a)$$

$$f(\tau_b) = \exp\left\{-\frac{(x - \tau_b)^2}{2\sigma_T^2}\right\} \quad (4b)$$

式中 σ_T, σ_{τ} ——分别为拉伸强度和紊流剪切应力的方差。该两项方差由下式进行计算

$$\begin{cases} \sigma_T = T CV_T \\ \sigma_{\tau} = \tau_b CV_{\tau} \end{cases} \quad (5)$$

对于所使用的土壤, $T = 1100 \text{ Pa}$ (Nearing 等 1991c), 而拉伸强度的方差系数 CV_T , 根据 Nearing 的建议[7], 选取为 0.4。

剥离率 D_r , 坡度 S_x , 水深 h 及 Chezy 值 C 、剪切应力

τ_b 等的试验数据列入如表 1。对于不同的 CV_{τ} 值, 可得不同剪切应力的不同概率, 结果列入表 2。一个无常数项的线性函数关系给出如下

$$D_r = Kx \quad (6)$$

式中

$$x = PCh^{1/2}S_x^{3/2} \quad (7)$$

采用(6)式对试验数据进行回归, 得到不同 CV_{τ} 时所需的 K 值[5], 由(6)式得到的预测值 D_r^* 见表 1, K 值及相应的 R^2 值见表 2。同时该表表明, 对于不同的 CV_{τ} 值, 测量的 D_r 与预测值相关性非常好。图 1 结果表明, 该土壤剥离率概率函数是合适的, 此种土壤当选用 $CV_{\tau} = 0.20 \sim 0.60$ 时, 其相关性与 CV_{τ} 无关, 但 K 与 CV_{τ} 具有下列定量关系

$$K = a + b \cdot CV_{\tau} \quad (8)$$

式中 $a = 134.33, b = -0.7725, R^2 = 0.9934$ 。也就是, 只要用(5)式来计算概率的方差, 用(8)式来计算 K 值, 即使采用相差较大的 CV_{τ} 值式也能得到相同的剥离率预测值。如果 CV_{τ} 变化, 因为 $f(T)$ 维持不变, 所以 P 将相应地改变。在理想情况下, 如果 D_{r1} 及 D_{r2} 分别为采用 $CV_{\tau 1}(P_1)$ 及 $CV_{\tau 2}(P_2)$ 得到的预测值, 则有

$$\begin{aligned} D_{r1} &= K_1 C_1 S_{x1}^{3/2} h_1^{1/2} P_1 = D_{r2} \\ &= K_2 C_2 S_{x2}^{3/2} h_2^{1/2} P_2 \end{aligned}$$

即

$$K_1 P_1 = K_2 P_2 \quad (9)$$

由(8)、(9)式可知, K 值随 P 或 CV_{τ} 值的增加而降低。

表 1 用于估计参数 K 的数据

Table 1 Data for detachment rate function estimation						
$D_r / \text{kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$	S_x	h / m	C	τ_b	D_r^*	
0.00769	0.010	0.010	69.0	147.3	0.01989	
0.04529	0.015	0.010	64.5	221.0	0.039409	
0.09229	0.020	0.010	65.1	294.6	0.100002	
0.04058	0.010	0.015	71.0	221.0	0.035436	
0.08742	0.010	0.020	70.7	294.6	0.076861	
0.22300	0.010	0.030	70.0	441.9	0.224792	

表 2 CV_{τ} 对 P 和 K 值的影响
Table 2 Influence of CV_{τ} on P and K

CV_{τ}	0.20	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60
P	0.02608	0.03231	0.03564	0.03911	0.04272	0.04645	0.05543
	0.04544	0.05868	0.06567	0.07292	0.08039	0.08777	0.10392
	0.07358	0.09625	0.10809	0.12019	0.13248	0.14488	0.16984
	0.04544	0.05868	0.06567	0.07292	0.08039	0.08777	0.10392
	0.07358	0.09625	0.10809	0.12019	0.13248	0.14488	0.16984
	0.15930	0.20612	0.22913	0.25129	0.27355	0.29473	0.33450
K	686.966	529.956	475.718	440.544	396.096	366.336	320.011
r^2	0.9844	0.9853	0.9862	0.99782	0.9884	0.9894	0.9911

2.2 一阶沉积参数 β

当细沟水流的含沙量大于水流的输沙能力时, 文献[5]中(9)式中的源项用关于输沙能力正则化后的过量泥沙含量计算, 并当作负的剥离处理。超过水流输沙能

力的过量泥沙沉积所需的时间由沉积参数 β 来确定。理论上参数 β 的意义由下式表述

$$\frac{\partial \tau^*}{\partial t} = -\beta c^* \quad (10)$$



式中 c^* —— (过量) 泥沙含量, kg/m^3 , 表征沉积对泥沙含量的影响; βc^* —— 负的泥沙源项, $> 0, \text{kg}/\text{s}/\text{m}^3$, 即水流中待沉积的泥沙; β —— 一阶沉积参数, $1/\text{s}$
(10) 式的解如下

$$c^* = c_0 e^{-\beta t}$$

(11)

该解反映了参数 β 对过量泥沙沉积时间的影响, 其中的 c_0 为初始过量泥沙含量。均匀坡度、时不变非均匀沟宽情况下, 不同 β 值对沉积过程影响的数值试验结果如图 1 所示。由图 1, 可以确定 β 取值应为 $1 \sim 6$, 同时也说明, β 取值在 $1 \sim 6$ 之间取任何值影响都不大。因此, 在此项研究中采用 $\beta = 3$ 进行模拟。如何确定不同情况下的最佳 β 值, 有必要进行进一步的研究。

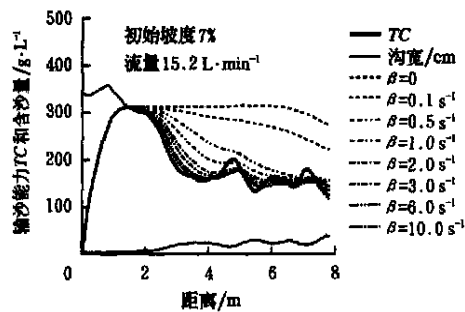


图 1 不同 β 值对含沙量的影响

Fig 1 Effect of different β values on sediment concentration

2 3 泥沙的水动力扩散系数 D_H

泥沙的水动力扩散系数是泥沙连续方程中的另一个重要参数。通过取定不同的 D_H 值进行模拟, 来确定并判断其在侵蚀过程中的重要性并确定其取值。恒定坡度、变沟宽工况的结果如图 2 所示。结果表明 D_H 取值 $0.01 \sim 0.10$ 似乎效果比较好。同时也说明, 受输沙能力影响, 泥沙含量曲线波动较大。当向上升的泥沙含量曲线增加到与向下降的输沙能力曲线相交时, 泥沙含量如所期望的那样开始降低。当下降中的泥沙含量曲线与增加中的输沙能力曲线相交时, 泥沙含量又相应增加, 并具有合理的波动。虽然最佳的 D_H 值仍需要进一步研究, 但在此研究中反映 D_H 为 $0.01 \sim 0.10$ 时效果较好。该项研究中所取的 D_H 为 0.50 。

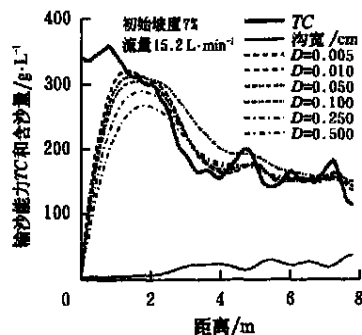


图 2 泥沙水动力扩散系数 (D_H) 对泥沙含量的影响

Fig 2 Effect of D_H on sediment concentration

3 结果与讨论

用文献[5]提出的数学模型及相应的有限元数值计算公式编制了 C++ 模拟程序, 并进行了下列一系列难度逐步增加的模拟计算:

- 1) 细沟宽度和坡度均不随时间变化, 且在空间上均匀分布;
- 2) 细沟宽度不随时间、空间变化, 坡度随时间(土壤侵蚀)变化, 而且在空间上是非均匀的;
- 3) 细沟宽度不随时间变化但在空间上是非均匀的, 坡度随时间变化及在空间上是非均匀的;
- 4) 细沟宽度和坡度均随时间及空间变化。

3 1 细沟宽度和沟床坡度不随时间、空间变化

在此工况中, 不存在土壤剥离、沟床形态变化和水利特性参数间的互反馈。这一工况是迄今为止土壤侵蚀模拟中一直采用的情况 (Nearing 等^[1,8]; Morgan 等^[3,4]; Misra^[2]; Rose^[9,10])。当把流量恒定的水流引入细沟一段时间后, 模拟的水深与流速均为常量并均匀分布。因此输沙能力也是均匀不变的, 如图 3。泥沙含量向坡下逐渐增加, 最终趋于输沙能力, 同时剥蚀率沿沟长随水流中泥沙含量的增加逐渐减少(图 4)。这就说明, 沿沟长剥蚀率不是均匀分布的, 原因是由于如雷廷武等^[5]所讨论的水流含沙量及土壤剥离的互反馈影响, 该关系为: 输沙能力一定时剥蚀率与泥沙含量成反比。于是, 一段时间后, 细沟沟床上游被侵蚀的土壤比下游多,

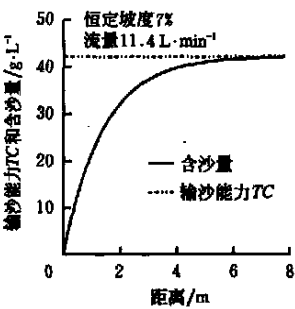


图 3 无反馈时输沙能力随沟长的关系

Fig 3 Transport capacity and sediment load for time invariant and spatially uniform rill widths and bed slopes without feedback

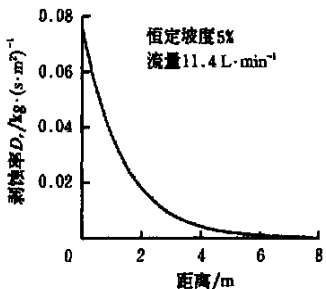


图 4 无反馈、沟宽/沟坡均匀不变时剥蚀率随沟长的变化

Fig 4 Detachment rate for time invariant and spatially uniform rill widths and bed slopes without feedback

如图 5。这显然不符合土壤侵蚀的实际情况。这就揭示了现有细沟侵蚀模型中不考虑沟床在侵蚀过程中随进程而演变的本质,这正是现有模型的缺陷与局限。

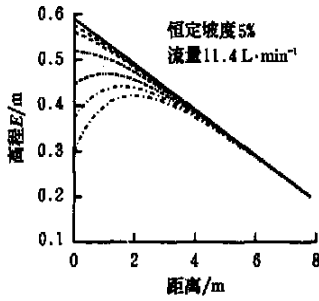


图 5 无反馈、沟宽/沟坡均匀不变时沟底高程随沟长及时间的变化

Fig 5 Changes in rill bed elevation for time invariant and spatially uniform rill widths and bed slopes without feedback

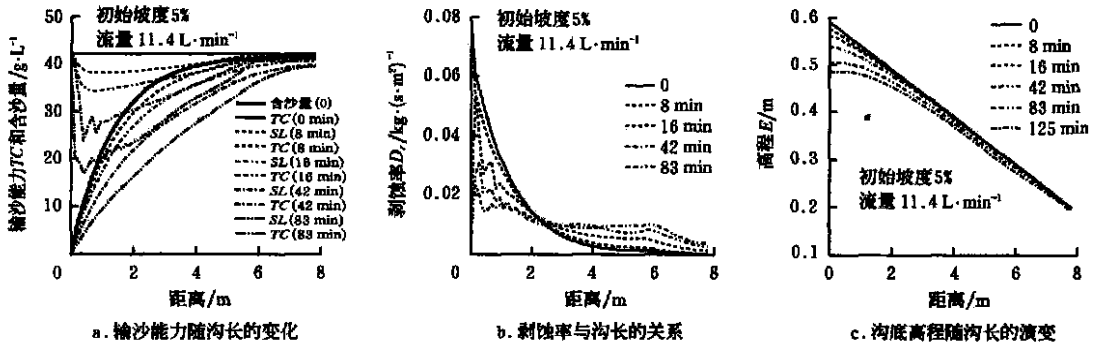


图 6 均匀不变沟宽、时变非均匀坡度时输沙能力、剥蚀率、沟底高程随沟长及时间的变化

Fig 6 Transport capacity and sediment load and rill bed elevation for time invariant and spatially uniform widths, time variable and spatially non-uniform slopes

3.3 时不变但空间非均匀宽度, 时变与空间非均匀坡度

在此工况中, 沟宽在时间上保持为常量, 但空间上非均匀。采用试验测得的沟宽沿沟长的变化。这一工况用于说明细沟水流特性和细沟形态相对细沟侵蚀动态过程影响的复杂性以及细沟土壤侵蚀空间变异的实际物理过程。由于沿沟长水流水力特性的变化, 引起了侵蚀沿沟长的非均匀分布和随时间的变化, 导致的沟床高程变化, 细沟形态不断演变。可由剥离与沉积的结果来计算坡度的变化。

由 3 个坡度所得的结果分别见图 7(11.4 L/m in 流量及 3% 坡度)、图 8(11.4 L/m in 流量及 5% 坡度)、图 9(11.4 L/m in 流量及 7% 坡度)。输沙能力作为沟宽的函数初始时变化极大, 随后随着沟宽及局部坡度变化而变化(图 7a、8a、9a)。细沟窄的部分输沙能力较大, 反之则相反。由 5% 坡度的结果可知, 输沙能力在 1.5~2.0 m 的沟长范围内由大约 210 kg/m³ 降低到 70 kg/m³

3.2 细沟宽度不随时间变化, 空间均匀, 坡度随时间变化, 空间非均匀

该工况考虑了剥离沉积—沟床坡度—细沟水力特征—剥蚀率的相互连锁影响。然而, 该工况并没有考虑水流宽度随时间和空间的变化。开始时, 输沙能力、剥蚀率、沟床坡度与前一工况相同(图 6a, 6b, 6c)。输沙能力沿沟长为常量(图 6a), 剥蚀率的最大值在引入清水的最上游端, 随着坡长变化到沟尾时很小的值(图 6b), 并且沟坡随时间为非常量、随空间为非均匀的(图 6c)。随着侵蚀的发展, 沟床在近上游端坡度逐渐变得平坦, 并且这种坡度平坦范围随时间向下游延伸扩展。这就引起了水流水力特性的相应变化, 并同时使输沙能力(图 6a)及土壤剥蚀率沿沟长发生了变化(图 6b)。尽管在细沟侵蚀发生的初始阶段土壤的剥蚀率沿沟长有很大的差异, 但 83 m in 后(此工况中)剥蚀率沿沟长变得较为均一。

(约为原来的 1/3)(图 8a)。对于 3% 坡度的情况, 变化更急剧(图 7a), 但变化幅度则少于 7% 的坡度。

泥沙含量总是与输沙能力紧密相关, 但有所滞后。泥沙含量曲线相对于输沙能力曲线有所衰减, 泥沙含量变化不像输沙能力的变化那么快。原因是, 剥离与沉积值是输沙能力与泥沙含量之间差异的一阶函数, 沉积是要经过一段时间才能完成, 还有一个因素是泥沙的扩散。尽管在 5% 坡度时, 输沙能力在 1.5~2.0 m 的沟长范围内降低到原来的 1/3, 但是泥沙含量在大致相当的距离内仅由 160 kg/m³ 降低到 120 kg/m³。

与输沙能力和泥沙含量波动相联系的是, 细沟侵蚀也在剥离与沉积之间交替转化(图 7a、8a、9a)。在土槽试验中已经明显地观察到了这一现象。细沟窄的部分显然经历着冲刷, 而较宽的部位则有沉积发生, 两种现象沿沟长交替发生。如 3.1 和 3.2 中所讨论的工况中, 沟宽为空间均匀的, 所以不存在这种现象, 沿沟长也就不会有净沉积(如图 4 及图 6b)。

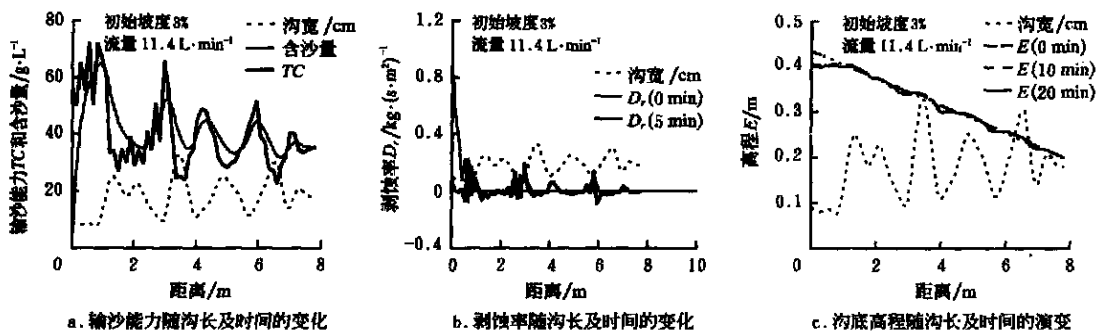


图 7 时不变非均匀沟宽、时变非均匀坡度的输沙能力、剥蚀率、沟底高程随沟长及时间的变化

Fig 7 Transport capacity and sediment load and rill bed elevation for time invariant and spatially non-uniform widths, time variable and spatially non-uniform slopes

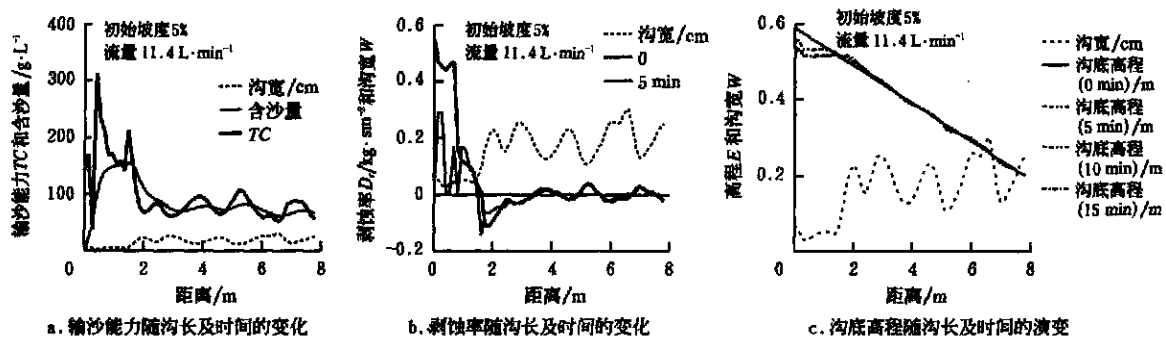


图 8 时不变非均匀沟宽、时变非均匀坡度的输沙能力、剥蚀率、沟底高程随沟长及时间的变化

Fig 8 Transport capacity and sediment load and rill bed elevation for time invariant and spatially uniform widths, time variable and spatially non-uniform slopes

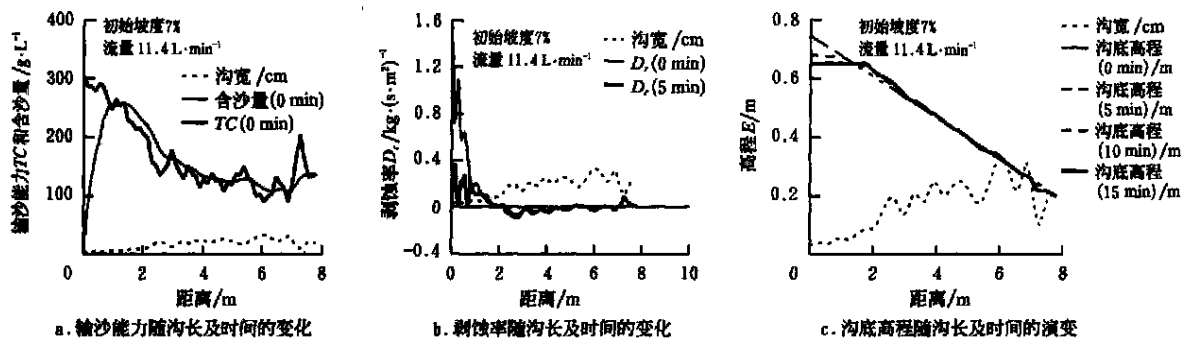


图 9 时不变非均匀沟宽、时变非均匀坡度的输沙能力、剥蚀率、沟底高程随沟长及时间的变化

Fig 9 Transport capacity and sediment load and rill bed elevation for time invariant and spatially non-uniform widths, time variable and spatially non-uniform slopes

3.4 时变及空间非均匀沟宽、沟床坡度

该工况考虑更为复杂的情况，沉积区段内泥沙沉积到沟床上致使细沟得以扩宽。泥沙的沉积会增加沟宽，进而降低流速、水流深度和输沙能力，接着沉积进一步加剧。换句话说，一旦沉积区段出现，就会产生一种“自传播”的现象，但最终受最小水深的限制。在此，尝试了模拟沟宽在泥沙沉积影响下的演变。结果示于图 10a、b、c (分别为 11.4 L/m in, 3%、5%、7% 的坡度)。初始沟

宽为在 3.3 所述工况中试验测得的值，然后随着泥沙沉积开始演变。在泥沙沉积段计算所得沟宽是增大的，从模拟计算上分析了沉积后细沟加宽这一观点。

该模型中细沟加宽的原则限定于沉积区域的加宽现象^[5]，但得到的结果是令人鼓舞的。尚需做进一步深入的研究，以便更好地阐明细沟加宽的约束条件，特别是“细沟再生”的过程，从而描述沉积区域下游细沟的发展。

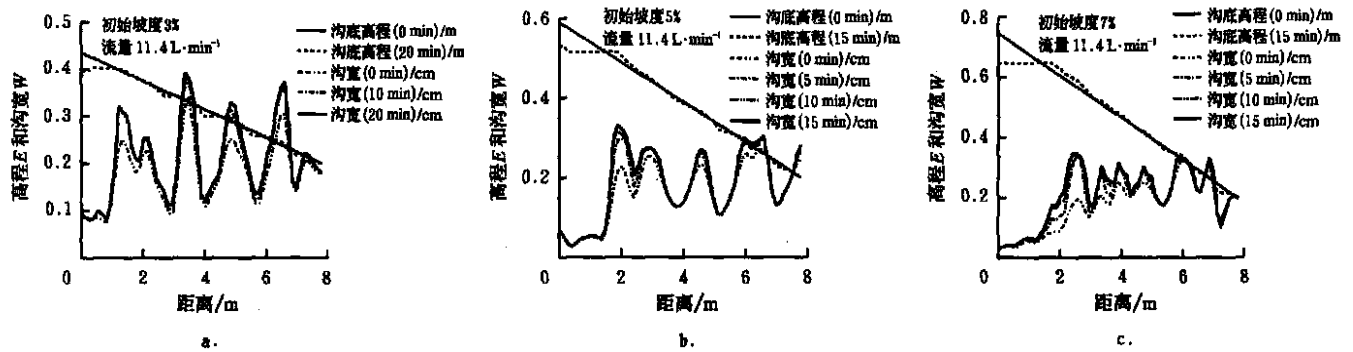


图 10 时变非均匀沟宽不同初始坡度时沟宽和沟底高程随沟长及时间的演变

Fig 10 Evolution in rill width and rill bed elevation for time variant and spatially non-uniform rill widths and bed slopes

3.5 模拟结果与试验结果的比较

只对时不变、非均匀沟宽、均匀坡度情况下的试验观测与模拟结果进行了对比。这样做的原因是, 目前技术上仅能记录“瞬时”的试验结果。选择细沟产生后短时间内的数据进行比较, 是因为此时的试验条件比较清晰和可以控制。

速度为 5 个长度相等的沟段内测得的平均值。泥沙含量为每个处理 2~ 3 个样本的平均值。

速度的模拟值和实测值对比结果如图 11 所示。回归分析得出, 实测速度等于模拟速度的 1.0155 倍。也就是说, 平均而言, 测量得到的速度较模拟得到的速度高 1.15%, 相关系数 (R^2) 为 0.6185。

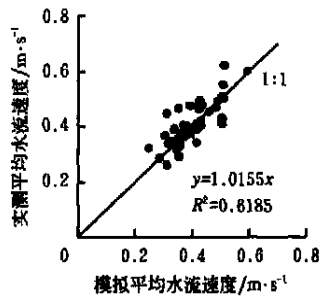


图 11 模拟与实测平均水流速度的比较

Fig 11 Comparison between averaged velocities of simulations and experiments

表 3 标定与未标定时模拟泥沙含量与实测值的比较

Table 3 Comparison between simulated and measured sediment concentration under calibrated and uncalibrated conditions

流速 /m · s ⁻¹	坡度 /%	未标定值 c /m · s ⁻¹	标定值 c /m · s ⁻¹	实测值 c /m · s ⁻¹
7.6	3	8.43	19.77	18.20
11.4	3	12.34	31.45	28.70
15.2	3	12.71	32.59	27.60
7.6	5	21.74	59.63	54.78
11.4	5	27.27	68.62	60.45
15.2	5	29.62	76.85	81.00
7.6	7	29.57	79.18	102.25
11.4	7	55.50	139.21	147.52
15.2	7	48.34	130.74	139.30

如表 3 所示, 坡度越陡, 出口处的泥沙含量越高, 在 3% 坡度时 ($\alpha=0.01$) 明显低于 5% 坡度的值, 同样 5% 坡度时显著地低于 7% 坡度的值。相同坡度下, 各工况出口处 (计算与测量所得) 的泥沙含量随流量的增加而增加。下列工况下泥沙含量没有显著差异: 1) 3% 坡度时, 11.4 与 15.2 L/m in 流量之间; 2) 5% 坡度时, 3 种流量之间; 3) 7% 坡度时, 11.4 与 15.2 L/m in 流量之间。这些结果无论对试验还是模拟都一样。这表明, 坡度因素比流量因素对泥沙输送的影响更大, 入口处流量对出口处泥沙含量没有决定性的影响。相反, 细沟的下游段宽度变化的随机性决定着细沟内水流的水力特性参数 (如水深、流速或单宽流量值) 变化和泥沙的剥离与输送过程的交替, 对出口处的泥沙含量有着决定性的影响。

对于泥沙含量, 模拟数据与实测数据的相关性很好 (图 12), 相关系数为 0.9539。然而, 模拟得到的数据明显地低于实测值。图 12 显示的输沙能力值是直接用水流功率函数求得的^[5], 模拟所得泥沙含量与输沙能力量值接近。产生这样问题的可能原因讨论如下。首先, 在细沟较长的情况下, 出口处的泥沙含量主要受到水流输沙能力的限制, 但是由试验数据得到的对数函数形式的输沙能力变差很大, 导致含沙量计算值与实测值间较大的差异。二是, 所采用的输沙能力函数是以较短土槽 (3 m) 试验数据计算得到的, 较长的细沟在其下游段 (或中间) 分散更宽, 细沟的形态很不确定。在实际的细沟中分布有一些更细小、更深的跌坎, 在这些局部细小的跌坎处, 水深较整个宽度的平均值大一些, 流速高于平均值, 从而具有较高的输沙能力, 所以水流能挟带比平均的水力变量函数所计算的值更多一些的泥沙。以上分析的两个因素是造成实测的泥沙量值较模拟值高的主要原因。因此, 对于不同的土壤类型和沟长, 输沙能力可能需要作相应的调整。

由于上述提到的原因, 对输沙能力作了标定。采用标定后的输沙能力函数所得的模拟结果与实测结果的关系及回归直线也示于图 12。该图显示两组数据吻合非常好。计算的泥沙含量为测量值的 0.93845 倍, 相关系数为 0.9600。

这些结果证明, 尽管这些试验的沟长不同于输沙能

力函数推求时使用的沟长, 但这些函数使用效果良好, 说明该函数在一定程度上揭示了细沟剥离和输送的一些本质特性。

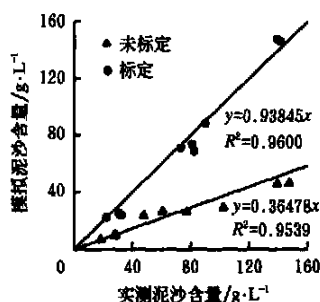


图 12 标定与未标定时模拟泥沙含量与实测值的比较

Fig. 12 Comparison between simulated and measured sediment concentrations under calibrated and uncalibrated conditions

4 泥沙含量波动及其意义

受沟宽的影响, 泥沙含量除随时间变化外, 还会沿沟长波动。由(时不变/非均匀宽度细沟模拟所得的输沙能力—水流含沙量)图可见, 即使在离细沟出口 1~2 m 范围内, 泥沙含量的波动依然很容易达到 30%。这就说明, 细沟出口处的泥沙含量值不可避免地会有很大变差, 很大程度上取决于出口部分细沟形态的随机性。这也意味着, 要比较试验数据是很困难的。出口部分细沟的宽度在除坡度与流量这两个因素之外起着很重要的作用。

5 结论

用雷廷武等^[5]给出的数学模型和 C++ 编写的程序, 进行了不同情况下细沟侵蚀的数值模拟, 包括: a) 细沟宽度和坡度均不随时间变化, 且在空间上均匀分布; b) 细沟宽度不随时间、空间变化, 坡度随时间(土壤侵蚀)变化, 而且在空间上是非均匀的; c) 细沟宽度不随时间变化但在空间上是非均匀的, 坡度随时间变化及在空间上是非均匀的; d) 细沟宽度和坡度均随时间及空间变化。为了进行这些模拟, 估计了所需的参数, 如土壤剥离率概率函数的系数, 一阶沉积参数 β 和泥沙的水力扩散系数 D_H 等。

1) 在细沟宽度和坡度均不随时间变化, 且在空间上均匀分布条件下, 输沙能力不随时间变化且随沟长是均匀的。泥沙含量随沟长增加, 但增加速率逐渐下降。在细沟的上游端, 土壤剥离率最高, 高程变化也最大。结果导致, 在实际中均匀坡度是无法保持下去的。当考虑到高程和坡度的演变时, 输沙能力随时间降低, 上游段减低幅度较下游段更甚。泥沙含量由于受输沙能力的限制, 也相应地降低。剥离率的迁移表现为上游段的量值下降, 而下游段的量值增加。细沟上游段的累积剥离量较高, 使得细沟沟坡变缓。上游段高程的变化速率下降, 下游段变化速率增加。

2) 当沟宽变化时, 沟宽较窄的部分具有更大的输

沙能力, 在较宽的部分具有较小的输沙能力。泥沙含量总是紧紧跟踪输沙能力的变化趋势, 可能高于输沙能力也可能低于输沙能力。当水流中的输沙能力降低时, 沉积过程发生。同样沟宽时, 处在细沟上游的一点将比处在下游的一点具有更高的剥离率。随着细沟的演化, 将会有更为复杂的剥离发生。细沟窄的部分因剥离而高程降低, 细沟宽处可能由于泥沙的沉积而增高。

3) 由于沉积过程的作用, 会发生沟宽的演变, 继而引起进一步的沉积, 导致细沟较宽的部分变得更宽。如何更好地模拟细沟的变宽和变窄, 需进一步研究。

4) 由不同细沟段平均得到的流速表明, 模拟结果与实测结果吻合较好。模拟所得的泥沙含量与实测结果相关性很好, 当标定后可以进一步预报。

模拟与实测结果都说明, 沟床坡度对出口处的泥沙含量具有很大的影响, 而较高的流量并不一定产生更高的出口含沙量, 主要受水流输沙能力的制约。

从总体上评价, 该模型模拟效果良好, 对细沟侵蚀动态过程有一定程度的理解和描述。

[参 考 文 献]

- [1] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, et al A process-based soil erosion model for U S D A water erosion prediction project technology[J]. Trans of the A S A E, 1989, 32: 1587- 1593
- [2] Misra R K, Rose C W. Application and sensitivity analysis of process based erosion model Guest[J]. European J of Soil Science, 1996, 47: 593- 604
- [3] Morgan R P C, Quinton J N, Rickson R J. EUROSEM Documentation Manual[A]. Silsoe College, Silsoe, Bedford, U K, 1992
- [4] Morgan R P C. The european soil erosion model: an update on its structure and research base[A]. In R. J. Rickson (Ed.), Conserving Soil Resources, European Perspectives, CAB International, Oxon, U K, 286 - 299, 1995
- [5] 雷廷武, 姚春梅, 张晴雯, 等. 细沟侵蚀动态过程模拟数学模型和有限元计算方法[J]. 农业工程学报, 2004, 4
- [6] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes[J]. Soil Sci Soc Am J, 1991, 55: 339- 344
- [7] Nearing M A. A probabilistic model of soil detachment by shallow turbulent flow [J]. Trans of the A S A E, 1991, 34: 81- 85
- [8] Nearing M A, Lane L J, Albers E E, et al Prediction technology for soil erosion by water: status and research needs[J]. Soil Sci Soc Am J, 1990, 54: 1702- 1711
- [9] Rose C W, Williams J R, Sander G C, et al A mathematical model of soil erosion and deposition processes: I theory for a plane land element[J]. Soil Sci Soc Am J, 1983, 47: 991- 995
- [10] Rose C W, Williams J R, Sander G C, et al A mathematical model of soil erosion and deposition processes: II Application to data from an arid-zone catchment[J]. Soil Sci Soc Am J, 1983, 47: 996- 1000

- [11] Laflen J M, Elliot W J, Simanton R, et al WEPP soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils [J] Soil and Water Conservation, 1991, 46(1): 39- 44
- [12] Lei T, Nearing M A, Haghighi K, et al Finite Element Modeling of Soil Erosion in A Rill Management of Landscapes Distributed by Channel Incision, The Center for Computational Hydroscience and Engineering, The University of Mississippi [R], May 1997.
- [13] Nearing M A, Parker S C, Bradford J M, et al Tensile strength of thirty-three saturated repacked soils [J] Soil Sci Soc Am J, 1991, 55: 1546- 1551.

Simulation study on the dynamic rill erosion processes: model validation with laboratory experiments

Yao Chunmei¹, Lei Tingwu^{1,2}, Zhang Qingwen², Mark Nearing³, Shao Ming'an²

(1. College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources,

Yangling 712100, China; 3. Southwest Watershed Research Center, 2000 E Allen Rd. Tucson, AZ 85719, USA)

Abstract: A series of laboratory experiments were conducted to verify the simulation model for the dynamic process of rill erosion and evolution. The experiments focused on the validation of the dynamic processes of rill flow, the spatial variation of hydraulic parameters, the soil detachment, transport and deposition; the verification of temporal and spatial evolution of rill morphology, including rill width, flow depth, as well as the local slope gradients; and the validation of feedback effect of local rill morphology change as affected by erosion and deposition on rill flow. The soil material used was a sandy loam. Three slopes: 3%, 5% and 7% and 3 flow rates: 7.6, 11.4 and 15.2 L/m in were used in the experiments. Numerical simulations were made on the same conditions as the experiments for different cases for the model verification. Simulated flow velocity values along the rills, sediment concentrations at the rill end were compared with those from the experiments. The results showed that the model prediction was consistent with the measured patterns of morphological changes as the rill evolved, which suggests that the model itself and the feedback loops in the model between erosion, bed morphological changes, and hydraulics were adequate to describe the trend and characteristics of rill erosion dynamics.

Key words: rill erosion; dynamic process; simulation; model validation; laboratory experiments