

# W EPP 细沟剥蚀率模型正确性的理论分析与实验验证

张晴雯<sup>1</sup>, 雷廷武<sup>2,1</sup>, 姚春梅<sup>2</sup>, 潘英华<sup>1</sup>, 王 辉<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100;

2. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 基于物理过程基础上的W EPP 土壤水蚀预报模型将坡面侵蚀分为细沟侵蚀和细沟间侵蚀, 建立了独立的细沟间模型和细沟模型。其中细沟侵蚀产沙方程从概念上可以预报细沟侵蚀过程, 但没经实验或理论验证。该文经过理论分析表明,W EPP 模型中的剥蚀率是水流含沙量的线性函数, 并由给定的试验条件计算得到了函数中的参数。将理论分析结果和已有的实验结果进行了比较, 验证了W EPP 中的侵蚀产沙模型。同时将已得到的确定细沟剥蚀率的微分方程代入细沟侵蚀产沙方程并求解, 从理论上得到了含沙量随沟长变化的函数关系。将理论分析结果和由实验所得的结果进行了对比, 进一步验证了W EPP 中的侵蚀产沙模型。该文从细沟剥蚀率和产沙量两方面对W EPP 模型中细沟侵蚀产沙模型进行了验证。

**关键词:** W EPP (W ater Erosion Prediction Project); 细沟侵蚀; 剥蚀率; 模型验证

中图分类号: S157

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2004)01-0035-05

## 0 引言

随着对侵蚀机理研究的不断深入及生产实践的具体要求, 可以表征时空变化的土壤侵蚀预报模型的开发和完善越来越重要。W EPP (W ater Erosion Prediction Project) 水蚀预报模型是一个迄今为止最为复杂的描述与土壤水蚀相关物理过程的计算机模型。侵蚀计算以单位沟宽或单位坡面宽为基础, 它的优点是描述了侵蚀的动态过程, 可以反映侵蚀的时空分布。

基于过程基础上开发的W EPP 侵蚀预报模型, 从概念上把输出坡面的泥沙来源分成细沟侵蚀和细沟间侵蚀, 建立了独立的细沟间模型和细沟模型。模型期望可以预报侵蚀过程随着时间和空间的变化, 但模型中的侵蚀方程并非完全基于物理过程。模型中所需的一些重要参数尚不能经直接的实验测定与检验, 实际应用时常常使用经验值, 这使得W EPP 的物理过程并不完全清楚。模型中采用的侵蚀产沙方程认为径流所携带的泥沙对径流剥蚀率产生影响, 但并没有合理的理论分析或合理的实验设计对此进行验证。W EPP 中用质量平衡和过程连续微分方程来描述细沟侵蚀产沙过程:

$$D_r(x) = K_r(\tau - \tau_c) \left( 1 - \frac{qc(x)}{T_c(x)} \right) \quad (1)$$

式中  $D_r(x)$ ——细沟剥蚀率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $K_r$ ——细沟可蚀性参数,  $\text{s}/\text{m}$ ;  $\tau$ ——水流剪切应力,  $\text{Pa}$ ;  $\tau_c$ ——临界剪切应力,  $\text{Pa}$ ;  $T_c$ ——水流的输沙能力,

$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ ;  $c$ ——泥沙含量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $q$ ——单宽径流流量,  $\text{m}^2/\text{s}$ ;  $x$ ——细沟沟长,  $\text{m}$ 。方程代表了细沟剥蚀率的泥沙反馈形式。首先应该说明的是, 该表达式虽然能够反映细沟侵蚀机制及泥沙输移过程, 但是否正确既无理论依据又无实验验证, 且对于剥蚀率与含沙量之间到底存在什么样的关系仍然存在争议。

含沙量对径流剥蚀率产生的影响一直存在这样一个假设, 即径流剥蚀率随含沙量的增加而减小, 且减少至输沙量达到了径流的输沙能力时趋于稳定。但对于此假设具有说服力的理论性分析或实验验证至今却很少。最早关于含沙量对侵蚀过程影响的概念模型是 Ellison<sup>[1]</sup>于1947年提出来的, 他认为径流剥蚀土壤的能力随着径流中含沙量的增加而增加。清水具有最大的搬运能力和最小的剥蚀能力, 所以产生的侵蚀很小。Foster 和 Meyer<sup>[2]</sup>提出了一种与 Ellison 模型不同的径流剥蚀率和泥沙输移能力耦合概念模型, 认为剥蚀率与输沙能力和输沙量的差值成比例, 径流在低含沙量的时候, 剥蚀能力最大, 当含沙量等于输沙能力时, 剥蚀率最小。Nearing 等人<sup>[3]</sup>从能量分析的角度对 Foster 和 Meyer 的概念模型做了阐述, 认为径流能量用来剥蚀土壤和输移泥沙, 由于剥蚀, 细沟股流中的含沙量增加, 随着径流中含沙量的增加, 用于搬运泥沙消耗的能量就会增大, 反过来用于剥蚀土壤的能量就会减小, 结果细沟剥蚀率就必然减小。并将此模型进一步发展为他们开发的以物理成因为基础的W EPP 土壤水蚀预报模型的核心部分, 其侵蚀产沙表达式见式(1)。Julien 等人<sup>[4]</sup>认为坡面细沟侵蚀主要受制于水流的输沙能力而不受供沙条件限制。黄基华等<sup>[5]</sup>对剥蚀率和含沙量的关系的研究认为细沟剥蚀率与实际的输沙量是相对独立的, Gimenez 等人<sup>[6]</sup>也得到了类似的结论。郑粉莉等<sup>[7]</sup>用双槽系统进行的实验结果认为在土壤自由排水条件下剥蚀率是减小的, 在土壤入渗流存在时, 泥沙输移量大大增加, 往往引起侵蚀量成倍增加。Merten 等人<sup>[8]</sup>认为, 在一般情况下, 剥蚀率随着含沙量的增加而递减, 但是递减方式却不能用现有的剥蚀——输运耦合理论来解

收稿日期: 2003-07-07 修订日期: 2003-12-05

基金项目: 中科院“引进国外杰出人才”项目(982602); 中科院知识创新重要研究方向项目“水蚀预报模型研究”(KZCX3-SW-422(01)); 国家自然科学基金项目(40171062)

作者简介: 张晴雯, 博士, 主要从事土壤侵蚀过程及模拟研究。陕西杨凌 中国科学院水利部水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 712100

通讯作者: 雷廷武, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀及模拟研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083

释。

关于含沙量对于侵蚀过程影响的研究, 至今为止多是从物理概念方面进行分析, 缺乏合理的实验设计和严密的数学推导来进行验证。雷廷武等<sup>[9, 10]</sup>用黄土高原黄绵土设计并进行了一系列室内细沟侵蚀模拟实验, 发现径流所携带的泥沙对径流剥蚀率有很明显的影响, 且剥蚀率随含沙量呈线性减小。本文试图从理论上对 WEPP 细沟侵蚀产沙方程进行分析, 并将其分析结果与实验直接计算结果比较, 来验证侵蚀产沙方程的正误。

### 1 实验设计及分析

由剥蚀率的物理定义, 剥蚀率等于单位时间单位面积净增加的含沙量, 可以设计实验来得到不同水动力学条件下的剥蚀率。雷廷武等人<sup>[9]</sup>采用了 5°; 10°; 15°; 20° 和 25° 5 个坡度, 2, 4 和 8 L/m in 3 种细沟入口流量, 以及 0.5, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 m 和 8 m 9 个坡长进行了室内细沟侵蚀模拟实验, 得到了不同流量和坡度下的净剥蚀率与水流含沙量的关系

$$D_r = a + b c \quad (2)$$

以及细沟净剥蚀率与沟长的关系<sup>[9]</sup>

$$D_r = A_0 e^{-B_0 x} \quad (3)$$

式中  $D_r$ ——细沟净剥蚀率,  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ ;  $c$ ——水流的含沙量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $x$ ——沟长,  $\text{m}$ ;  $a, b, A_0, B_0$ ——回归系数。用式(2)和式(3)回归得到的  $a$  与  $b$  值以及  $A_0$  与  $B_0$  值如表 1 所示。由表 1 可以看出, 系数  $b$  均为负值, 表明细沟剥蚀率随含沙量的增加呈线性减小, 且清水比挟沙水有更大的净剥蚀率, 剥蚀率随沟长呈指数递减, 即开始减小很快, 随后减小幅度逐渐变缓。在沟顶清水引入的地方净剥蚀率最大, 随着沟长和径流中含沙量的增加, 净剥蚀率开始减小。

表 1 由实验数据得到的回归系数值

Table 1 Regressed results of detachment rate with sediment concentration and rill lengths from the measured data

坡度	流量 $L/\text{m in}$	$a$	$b$	$R^2$	$A_0$	$B_0$	$R^2$
5°	4	0.04	-0.04	0.11	0.03	0.06	0.13
	8	0.06	-0.08	0.10	0.08	0.03	0.06
10°	4	0.09	-0.09	0.70	0.08	0.10	0.75
	8	0.19	-0.19	0.70	0.20	0.13	0.74
15°	2	0.06	-0.05	0.69	0.07	0.22	0.61
	4	0.10	-0.06	0.66	0.11	0.13	0.62
	8	0.31	-0.28	0.96	0.30	0.18	0.96
20°	2	0.10	-0.10	0.88	0.11	0.32	0.90
	4	0.24	-0.25	0.86	0.29	0.48	0.95
	8	0.50	-0.51	0.99	0.49	0.33	0.96
25°	2	0.17	-0.20	0.91	0.16	0.48	0.90
	4	0.33	-0.38	0.97	0.36	0.51	0.93
	8	0.49	-0.53	0.86	0.67	0.46	0.88

由室内细沟侵蚀模拟实验结果知: 一定水动力条件下产沙量随着沟长的增加而增加, 但增加的幅度越来越小, 且渐近一个稳定值。水流泥沙含量与细沟沟长的关系可用下式拟合<sup>[9, 10]</sup>

$$c = A (1 - e^{-\beta x}) \quad (4)$$

式中  $c$ ——水流的含沙量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $x$ ——沟长,  $\text{m}$ ; 拟合系数  $A$  与  $\beta$  如表 2 所示。表 2 实验结果表明, 不同水动力条件下的侵蚀产沙量随沟长的增加呈指数增加, 在稳定的水流作用下, 细沟上端水流入口处, 泥沙含量为零, 水流具有最大的剥蚀能力, 径流迅速剥蚀土壤颗粒, 使得径流中的含沙量随着细沟的增长迅速增加, 而水流的(净)剥蚀能力随细沟内含沙量的增加逐渐下降。随着细沟不断增长, 水流的(净)剥蚀能力将趋近于零, 而水流中的泥沙含量将趋近于一个饱和稳定值, 此时细沟侵蚀出现动态平衡。

表 2 由实验数据计算得到的  $A$  与  $\beta$

Table 2 Regressed results of sediment concentration with rill length from the measured data

坡度	5°			10°		15°			20°			25°		
	流量 $L/\text{m in}$	4	8	4	8	2	4	8	2	4	8	2	4	8
$A$		0.5	0.5	0.61	0.61	0.78	0.76	0.76	0.85	0.80	0.85	0.82	0.85	0.87
$\beta$		0.2	0.26	0.34	0.34	0.4	0.37	0.45	0.52	0.51	0.51	0.5	0.51	0.55

### 2 理论分析及验证

#### 2.1 解析验证

由细沟净剥蚀率物理定义, 土壤净剥蚀率(细沟中)为单位宽度水流所含泥沙沿距离的变化率, 即土壤净剥蚀率(细沟中)为水流含沙量对距离的变化率与单宽流量之积, 得到计算细沟净剥蚀率的解析表达式<sup>[11]</sup>

$$D_r = \frac{dc(x)}{dx} q \quad (5)$$

式(5)与式(2)结合有

$$D_r = \frac{dc(x)}{dx} q = a - b c \quad (6)$$

边界条件

$$c(x) \Big|_{x=0} = 0$$

积分式(6)并整理得

$$c = \frac{a}{b} - e^{\frac{b}{q}x} c_0 = \frac{a}{b} \left( 1 - \frac{b C_0}{a} e^{\frac{b}{q}x} \right) \quad (7)$$

$C_0$  和  $C$  为微分常数项。由边界条件及式(7)得

$$c = \frac{a}{b} \left( 1 - e^{\frac{b}{q}x} \right) \quad (8)$$

同时由式(5)及式(3)结合有

$$D_r = \frac{dc(x)}{dx} q = A_0 e^{-B_0 x} \quad (9)$$

式(9)即为由沟长与净剥蚀率关系求细沟产沙量的微分表达式。其求解的边界条件与式(6a)相同。

积分式(9)得

$$c = - \frac{A_0}{B_{0q}} e^{-B_{0q}x} + C$$

将上述边界条件代入上式得

$$C = \frac{A_0}{B_{0q}}$$

即有

$$c = \frac{A_0}{B_{0q}} (1 - e^{-B_{0q}x}) \quad (10)$$

由式(10)及式(8)给出的  $c$  为描述同一现象的参数,它们应该相等,因此有

$$\frac{a}{b} \left( 1 - e^{-\frac{b}{q}x} \right) = \frac{A_0}{B_{0q}} (1 - e^{-B_{0q}x}) \quad (11)$$

由式(11)得到  $\begin{cases} a = A_0 \\ b = B_{0q} \end{cases}$

由解析推导结果,以及文献[9]得到的净剥蚀率产沙量和沟长的关系,对已得到的相关系数作了分析,计算了系数  $a$  和  $A_0$  以及  $b$  和  $B_{0q}$  的值,并分析了他们间的相关性,结果见图 1 和图 2 所示。

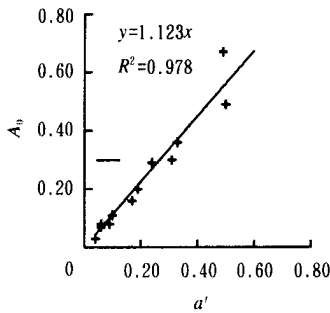


图 1 系数  $a$  和系数  $A_0$  的相关性

Fig 1 The regressed relationship between  $a$  and  $A_0$

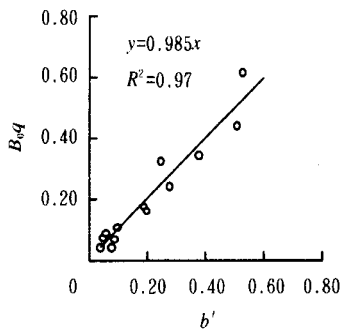


图 2 系数  $b$  和系数  $B_{0q}$  的相关性

Fig 2 The regressed relationship between  $b$  and  $B_{0q}$

由计算结果可以看出,不同坡度及流量下的系数  $a$  和  $A_0$  之间以及  $b$  和  $B_{0q}$  之间呈现出了良好的相关性。系数  $a$  和  $A_0$  的相关曲线为  $A_0 = 1.123a$ ,  $R^2 =$

0.978, 残差平方和为 0.024。系数  $b$  和  $B_{0q}$  的相关曲线为  $B_{0q} = 0.985b$ ,  $R^2 = 0.97$ , 残差平方和为 0.025。计算结果得到的系数  $a$  和  $A_0$  之间以及  $b$  和  $B_{0q}$  之间良好的相关性表明,由细沟净剥蚀率的解析式推导间接地证明了净剥蚀率与含沙量的关系即式(2)和净剥蚀率和沟长间的关系式(3)是一致的,也就是说,对黄土高原的轻质粉壤土,含沙量对净剥蚀率的确有影响,且净剥蚀率随含沙量的增加呈线性递减。

### 2.2 理论分析及实验验证

对于一定的坡度和给定的恒定水流条件,水流剪切应力、单位宽度径流流量均可以被看作为常数,即

$$\begin{cases} \tau = \text{常数} \\ q = \text{常数} \end{cases} \quad (12)$$

当给定土壤(质地与结构)、地形地貌(坡度)及其他条件(如植物根系、水分状况等)后,土壤可蚀性参数、临界剪切应力也可以被看作为常数

$$\begin{cases} K_r = \text{常数} \\ \tau_c = \text{常数} \end{cases} \quad (13)$$

将式(12)、式(13)与W EPP 侵蚀产沙方程即式(1)结合,得到化简的,描述细沟土壤侵蚀的产沙方程为

$$D_r(x) = a + bc \quad (14)$$

式中  $a, b$ ——系数;  $c$ ——水流含沙量,  $\text{kg}/\text{m}^3$ 。细沟剥蚀率  $D_r$  随水流含沙量  $c$  的增加呈线性变化。式(14)中,

$$a = K_r(\tau - \tau_c) \quad (15)$$

$$b = - K_r(\tau - \tau_c) \frac{q}{T_c} = - a \frac{q}{T_c} \quad (16)$$

径流的水流动力机制是细沟剥蚀土粒的驱动力,水流剪切力常用来刻画径流剥蚀土粒的能力。方程用的水流剪切力直接由力平衡关系计算,理论公式为<sup>[10]</sup>

$$\tau = g \rho sh \quad (17)$$

式中  $\rho$ ——水流密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $g$ ——重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $h$ ——径流深,  $\text{m}$ ;  $s$ ——床面坡度。

水流的输沙能力由文献[8]给出

$$T_c = A q \quad (18)$$

式中  $A$ ——含沙水流达到其输沙能力时所能携带的最大含沙量。将式(18)代入式(16)得到

$$b = - K_r(\tau - \tau_c) \frac{1}{A} = - \frac{a}{A} \quad (19)$$

$K_r$  和  $\tau_c$  由文献[12]给出,  $A$  由文献[10]给出,从而可以得到式(14)中的  $a, b$  值,计算结果列入表 3。由表 3 可以看出,系数  $b$  为负值,也就是说细沟剥蚀率随含沙量的增加呈线性减小。

表 3 理论分析得到的不同坡度、流量下计算的  $a, b$  值

Table 3  $a, b$  values from the theoretical analysis

坡度	5°		10°		15°			20°			25°				
	流量 $L/\text{m in}$		4	8	4	8	2	4	8	2	4	8	2	4	8
$a$	0.07	0.04	0.07	0.04	0.21	0.11	0.21	0.08	0.25	0.36	0.27	0.32	0.31		
$b$	-0.14	-0.08	-0.12	-0.10	-0.27	-0.15	-0.27	-0.10	-0.31	-0.43	-0.33	-0.38	-0.36		

因为式(14)与式(2)是由理论分析和实验得到的同一物理现象的两种不同表达,因此,由上述分析可知,如果W EPP的侵蚀产沙模型正确的话,那么由式(14)经理论计算得到的剥蚀率应该是水流含沙量的线性函数,且函数的系数(a、b)应等于由实验数据用式(2)回归得到的a、b值。为此,由式(14)得到的a、b值和由实验数据估计得到式(2)中的a、b值的对比结果见图3和图4,图中实线斜率为1,数据点越靠近此直线两者相关性越好。图中可以看出数据点比较集中且均在斜线附近,系数a的拟合曲线(图中虚线)为 $y = 0.778x$ ;系数b的拟合曲线为 $y = 0.912x$ 。对系数a,回归分析得到的残差平方和为0.069,  $R^2$ 为0.88,对系数b,回归分析得到的残差平方和为0.118,  $R^2$ 为0.86,说明由理论分析计算得到的值与直接由实验数据估算得出的值有很好的——对应关系。

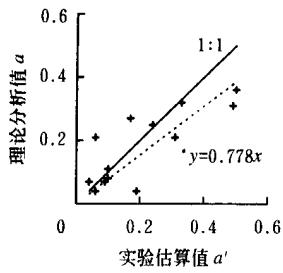


图3 理论分析a和实验估算a值的比较  
Fig 3 Comparison of a (theoretical value) with a (measured data)

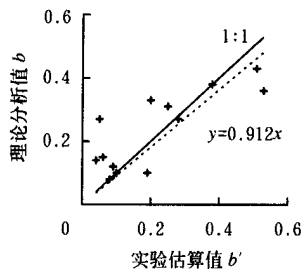


图4 理论分析b和实验估算b值的比较  
Fig 4 Comparison of b (theoretical value) with b (measured data)

2.3 侵蚀产沙模型理论分析

由式(5)细沟土壤剥蚀率解析式 $D_r(x) = \frac{dc(x)}{dx}q$ ,与理论分析得到的产沙方程简化式(14)结合有

$$\frac{dc(x)}{dx}q = a + bc \tag{20}$$

求解式(20)的边界条件为

$$c(x)|_{x=0} = 0$$

对式(20)积分,采用上述确定的边界条件得

$$c(x) = \frac{a}{b} \left( 1 - e^{-\frac{bx}{q}} \right)$$

令 $A = -\frac{a}{b}, \beta = -\frac{b}{q}$ ,则 $c(x) = A(1 - e^{-\beta x})$  (21)

方程式(21)即为含沙量随细沟沟长变化的函数关系。式中 $\beta$ 为衰减系数,方程的物理含义为产沙量c随着

沟长x的增加逐渐增加,但增加的幅度越来越小,且渐近一个极限值A。如果上述理论分析结果正确的话,那么由实验得到的含沙量和沟长的关系应该符合上述函数关系,且实验得到的函数系数与A、 $\beta$ 值相等或至少相关性很好。由a、b、q计算得到的A与 $\beta$ 列入表4。

与验证二相同,因为式(21)与式(4)也是同一物理现象的两种不同表达。如果W EPP的侵蚀产沙模型正确的话,那么由式(21)经理论计算得到的含沙量和沟长的关系应该和由实验结果得到的式(4)是一致的,且函数的系数A、 $\beta$ 应等于由实验数据用式(4)回归得到的A、 $\beta$ 值。系数相关性分析见图5图6,图中实线斜率为1,数据点越靠近此直线,说明两者相关性越好。从图中可以看出数据点比较集中且均在斜实线附近,说明由理论分析得到的值与直接由实验数据估算得出的值有很好的——对应关系。系数A的相关性拟合曲线为 $y = 0.97x$ ,对于系数 $\beta$ 的相关性拟合曲线为 $y = 0.88x$ 。对于系数A,回归分析得到的残差平方和为0.042,  $R^2$ 为0.99。对于系数 $\beta$ ,回归分析得到的残差平方和为0.764,  $R^2$ 为0.71。说明上述理论推导值与由实验数据直接得到的相应的值相关性很好,即上述理论分析结果是正确的,即含沙量和沟长的关系符合函数式(4)。

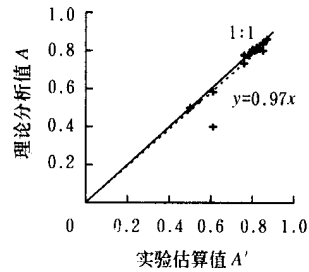


图5 理论分析值A和实验估算值A的比较  
Fig 5 Comparison of theoretical value A with measured data A

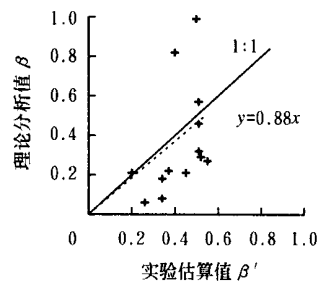


图6 理论分析值beta和实验估算值beta的比较  
Fig 6 Comparison of theoretical value beta with measured data beta

表4 由理论分析即式(21)计算得到的A与beta

Table 4 A and beta values from the theoretical analysis

坡度	5°		10°		15°			20°			25°		
流量L/m in	4	8	4	8	2	4	8	2	4	8	2	4	8
A	0.5	0.5	0.58	0.4	0.78	0.73	0.78	0.8	0.81	0.84	0.82	0.84	0.86
beta	0.21	0.06	0.18	0.08	0.82	0.22	0.21	0.29	0.46	0.32	0.99	0.57	0.27

### 3 结论与讨论

W EPP 土壤水蚀预报模型在概念上是以物理过程为基础的,目前由于缺乏合理的理论分析或严密的数学推导对此进行验证,限制了模型的应用和推广。本文从理论上分析了W EPP 模型中的细沟剥蚀率侵蚀产沙方程,得到了剥蚀率与含沙量函数关系及其关系式中的参数,将获得的参数与由实验数据直接得到的相应的值进行了比较。同时利用确定细沟剥蚀率的微分方程进行积分,得到了含沙量随沟长变化的函数关系,将此方程中的参数与由实验数据拟合方程得到的相应的参数进行了比较。从比较结果可以看出由理论分析得到的值与直接由实验数据估算得出的值有很好的——对应关系,即理论分析结果和实验拟合结果可以相互验证。分析结果表明径流含沙量对细沟剥蚀率的确有很显著的影响,而且符合线性函数关系,与W EPP 模型中的细沟剥蚀率侵蚀产沙关系基本一致,W EPP 模型中的细沟剥蚀率侵蚀产沙方程可以用来描述黄土区坡面细沟侵蚀产沙耦合过程。本文的理论分析及数学推导为W EPP 模型的验证提供了工具,对土壤侵蚀研究及其预测预报向完整物理模型转化和全方位验证有重要的推动作用。

#### [参 考 文 献]

- [1] Ellison W D, Ellison O T. Soil erosion studies part V E Soil detachment by surface flow [J]. Agriculture Engineering, 1947, 28: 402- 406
- [2] Foster G R, Meyer L D. Transport of soil particles by shallow flow [J]. Transaction of the A S A E, 1972, 15(1): 99- 102
- [3] 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]. Transaction of the A S A E, 1989, 32(5): 1587- 1593
- [4] Julien P Y, Simons D B. Sediment transport capacity of overland flow [J]. Transaction of the A S A E, 1985, 28(3): 755- 762
- [5] Huang C H, Brandford J M, Laflen J M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the W EPP rill erosion equation [J]. SSSA J, 1996, 60: 734- 739
- [6] Gimenez R, Govers G. Flow detachment by concentrated flow on smooth and irregular beds [J]. SSSA J, 2002, 66: 1475- 1483
- [7] Zheng F L, Huang C H, Norton L D. Vertical hydraulic gradient and runoff water and sediment effects on erosion processes and sediment regimes [J]. SSSA J, 2000, 64: 4- 11
- [8] Merten G H, Nearing M A, Borges A L O. Effect of sediment load on soil detachment and deposition in rills [J]. SSSA J, 2001, 65: 861- 868
- [9] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al Soil detachment rates for sediment loaded flow in rills [J]. Transaction of the A S A E, 2002, 45(6): 1897- 1903
- [10] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion [J]. Transaction of the A S A E, 2001, 44(6): 1537- 1542
- [11] 雷廷武,张晴雯,赵军,等.确定侵蚀细沟集中水流剥蚀速率的解析方法[J].土壤学报,2002,39(6):788-793
- [12] Lei Tingwu, Zhang Qingwen, Pan Yinghua, et al An Analytic Method of Determining Soil Erodibility Parameter and Critical Shear Stress [R]. 2002 A S A E Annual International Meeting, Chicago, Illinois, July 28- August 1, 2002

## Theoretical analysis and experimental verification of the detachment rate equation of rill erosion in W EPP

Zhang Qingwen<sup>1</sup>, Lei Tingwu<sup>2,1</sup>, Yao Chunmei<sup>2</sup>, Pan Yinghua<sup>1</sup>, Wang Hui<sup>1</sup>

(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 College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract** W EPP (Water Erosion Prediction Project), a physical-process-based soil erosion prediction model partitions the hillslope soil erosion into rill erosion and inter-rill erosion, with independent prediction models. The sediment source equation for soil detachment in W EPP is conceptually rational, but yet to be verified experimentally or theoretically. Theoretical analysis determines that the detachment rate equation in W EPP is indeed a linear function of the sediment concentration in runoff. The parameters for the detachment function under given experimental conditions were estimated and were compared with those parameters, directly determined from the experimental data, to validate the W EPP detachment equation. Integration of the differential equation for detachment rate was also used to derive the sediment concentration function of rill length. The estimated parameters of the sediment yield function were compared with those in the sediment-rill length function as determined from experimental data, to further validate the detachment rate model in W EPP. The detachment rate equation in W EPP was validated with both the detachment rate and the sediment yield.

**Key words:** W EPP (Water Erosion Prediction Project); rill erosion; soil detachment rate; theoretical analysis and experimental verification