

# W EPP 模型中细沟可蚀性参数估计方法误差的理论分析

雷廷武<sup>1,2</sup>, 张晴雯<sup>2</sup>, 姚春梅<sup>1</sup>, 闫丽娟<sup>1</sup>, 刘 汗<sup>1</sup>, 杨 超<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院现代精细农业系统综合研究重点实验室, 北京 100083;

2. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验, 杨凌 712100)

**摘 要:** 细沟土壤侵蚀在坡面土壤侵蚀占有重要地位。土壤可蚀性参数是 W EPP 模型中计算预报/计算细沟土壤侵蚀中极其重要的参数。W EPP 模型现在采用的可蚀性参数是用长的细沟/径流小区试验以细沟侵蚀产沙估计得到的最大可能剥蚀率为基础获得的。该文分析了细沟侵蚀产沙随沟长的变化关系, 分析了可蚀性参数估计误差的来源。从理论上推导出了计算现有 W EPP 可蚀性参数估计误差的计算方法。理论分析表明, 对于限定性细沟, 可蚀性参数的估计误差主要来源于细沟最大可能剥蚀率的估计值。最大可能剥蚀率的理想估计值是水流载沙量与细沟长度的函数关系在细沟长度为 0 时的导数, 而不是全沟长的平均剥蚀率。理论计算表明, 已有方法估计得到的 W EPP 模型可蚀性参数, 其误差可以高达 90% 以上, 最低也在 50% 以上。从而, 估计 W EPP 可蚀性参数的方法和可蚀性参数需要加以重新考虑。提出了减少误差方法的建议。

**关键词:** W EPP; 土壤侵蚀; 模型参数; 误差分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2005)01-0009-04

## 0 引 言

W EPP (Water Erosion Prediction Project) 模型是一个迄今为止最为复杂的、基于物理过程的土壤水蚀预报模型。W EPP 将坡面土壤侵蚀分为细沟土壤侵蚀和细沟间的土壤侵蚀两部分<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀以单位沟宽或单位坡面宽为基础进行计算。描述坡面侵蚀过程的稳态泥沙连续方程如下:

$$\frac{dG}{dx} = D_i + D_r \quad (1)$$

式中  $x$ ——向坡下的距离, m;  $G = q \cdot c$ ——水流的输沙量,  $\text{kg/s} \cdot \text{m}$ ;  $D_i$ ——细沟间(inter-rill)坡面向细沟内的运输的泥沙量,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $D_r$ ——细沟土壤侵蚀量,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。

细沟土壤侵蚀量从概念上表达为

$$D_r = D_c \left( 1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (2)$$

$$D_c = K_r (\tau - \tau_c) \quad (3)$$

式中  $D_c$ ——细沟水流对土壤的最大可能剥离率 (Potential detachment rate, 或称为 Detachment capacity),  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ ;  $T_c$ ——水流输运泥沙的能力,  $\text{kg/s} \cdot \text{m}$ ;  $\tau, \tau_c$ ——分别为水流对土壤的剪切应力与土壤的临界抗剪切应力, Pa;  $K_r$ ——细沟土壤可蚀性参数,  $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$ 。(2) 式表明了细沟水流中泥沙含量与土壤剥蚀的反馈耦合关系。

细沟既是坡面土壤侵蚀的重要产沙源, 占坡面土壤侵蚀 70% ~ 90%<sup>[2]</sup>, 同时又是坡面土壤侵蚀产物的输送通道。因而细沟土壤侵蚀在坡面土壤侵蚀中十分重要, 成为 W EPP 模型侵蚀产沙的核心, 而其中的土壤可蚀性参数则是模型计算/预报的关键参数。

为了在美国不同地区应用 W EPP 预报土壤侵蚀量, 科研工作者花费了大量人力、物力、财力, 在全美国对有代表性的土壤进行实验研究, 以确定其土壤可蚀性参数, 并于 1989 年编印出版了参数手册/数据库<sup>[3]</sup>。Gilley<sup>[4]</sup>等在 1993 年描述了确定土壤可蚀性参数的方法。他们所采用的试验与计算方法如下描述。采用田间径流小区进行人工模拟降雨后产生细沟, 然后在所产生的细沟内做放水冲刷试验。通过收集径流中的泥沙来估计土壤剥蚀率, 用于确定(3)式中的  $D_c$  值, 采用不同的流量以确定不同水流条件下的土壤剥蚀率, 并同时计算出水流的剪切应力, 把由此得到的一系列数据采用(3)式进行回归, 得到土壤可蚀性参数和土壤临界抗剪切应力。田间试验所采用的径流小区宽 0.46 m、长 9 m。

将(3)式与(2)式比较表明, 只有在清水的情况下 ( $c = 0$ ) 时, 才有可能得到最大可能剥蚀率。同时, 由于水流的剥蚀率随沟长的增加而减少(见(2)式), 因此要获得最大可能剥蚀率, 必须沟长度要很短。显然, Gilley 等人的试验条件与此相差甚远, 长沟试验得到的最大可能剥蚀率与实际值相差很大。Huang<sup>[5]</sup>等人认识到为了获得最大可能剥蚀率, 应该采用短的细沟。Zhang<sup>[12]</sup>等人采用短样本所作试验得到的剥蚀率也比 Gilley 的结果大得多, 由此也说明采用长沟获取最大可能剥蚀率是不合适的。

本研究的目的是: 分析细沟土壤侵蚀产沙输沙动态过程; 从理论上分析 W EPP 模型中细沟土壤侵蚀模型可蚀性参数的误差, 提出减少误差的途径。为确定土壤侵蚀模型的重要参数提供一些理论依据。

收稿日期: 2004-02-25 修订日期: 2004-10-27

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 (KZCX3-SW-422); 科技部 973 项目 (2002CB111502) 资助

作者简介: 雷廷武(1958-), 男, 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。Email: ddragon@public3.bta.net.cn

通讯作者: 姚春梅(1969-), 女, 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

## 2 细沟土壤侵蚀输沙过程与 W EPP 土壤可蚀性参数估计误差来源

Huang 等人<sup>[5]</sup>做出了放水冲刷稳定水流(即细沟宽度、坡度沿沟长方向恒定)条件下细沟产沙输沙的解析表达式。在放水冲刷的情况下, (1) 式中的  $D_i = 0$ , (1)、(2) 式结合有

$$\frac{dG}{dx} = D_c \left( 1 - \frac{G}{T_c} \right) \quad (4)$$

边界条件为

$$G \Big|_{x=0} = 0 \quad (4a)$$

(4) 式的解析为

$$G = qc = T_c (1 - e^{-Bx}) \quad (5)$$

Lei 等人<sup>[7]</sup>1998 年用数值模拟的方法得到了稳定水流、均匀坡度、沟宽不变条件下的类似结果。Lei 等人 2002 年<sup>[8]</sup>通过有限的细沟集中水流冲刷试验, 首次证实了细沟侵蚀产沙输沙的关系为

$$c = A (1 - e^{-Bx}) \quad (6)$$

并证实下列关系成立

$$Aq = T_c \quad (7)$$

将 (5) 式与 (6)、(7) 式进行比较, 可知结果是一致的。参考文献<sup>[8]</sup>中所给出的坡度为 20° 条件下, 水流含沙量与沟长的关系(见 (6) 式) 如下图(1) 所示。

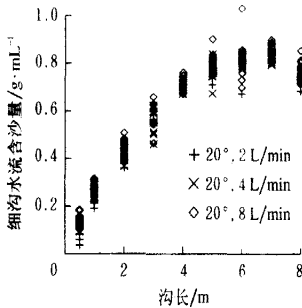


图 1 细沟水流含沙量与沟长的函数关系

Fig 1 Functional relationship between sediment concentration and rill length

(5) 式(或等价的(6) 式) 中的  $B$  是与水流流速、沟坡坡度、土壤类型相关的变量。将 (5) 式中的水流载沙量 ( $qc$ ) 转化为正则化变量 ( $qc/T_c$ ) 后, 如图 2 所示, 图中表明, 各种条件下 ( $B$  的取值不同), 水流的载沙量最终总是趋近于  $qc/T_c = 1$ , 即  $qc = T_c$ , 即水流中的载沙量最终趋近于水流的输沙能力。但是受细沟坡度、水流流速、土壤类型影响,  $B$  值的取值不同, 水流载沙量趋近于水流输沙能力的快慢程度是不一样的。 $B$  值越大,  $qc$  趋近于  $T_c$  的速度越快。由于土壤的可蚀性参数  $K$  与  $B$  值成正比(参见于(11)、(13) 式), 因此实际上是  $K$  值越大, 水流载沙量趋近水流输沙能力的速度越快。这当然是合理的, 因为  $K$  值越大, 表明土壤被侵蚀/剥离越容易, 随着水流作用在单位长度细沟内产生的侵蚀和进入水流的泥沙量越多, 水流中的含沙量/载沙量增加越快, 其趋于水流输沙能力的速度也越快。当细沟长度达到一定

值时, 尽管水流的载沙量最终都会趋于水流的输沙能力, 但其趋于该值的过程或速度却是不一样的, 即细沟土壤侵蚀的动态过程受  $K$  值的影响是有很程度的不同。以往由于受到观测手段的限制和对细沟土壤侵蚀机理理解的局限性, 采用细沟出口处或径流小区出口处的水流含沙量来评价模型预报的好坏, 其实是很不够的, 因为完全忽略了中间可能发生的完全不同的动态响应。由于这一问题的存在, 使得模型预报的结果也许在细沟或径流小区出口处的径流产沙量与实际相差不大, 但对于土壤侵蚀沿细沟所发生的过程的预报则可能会很差。

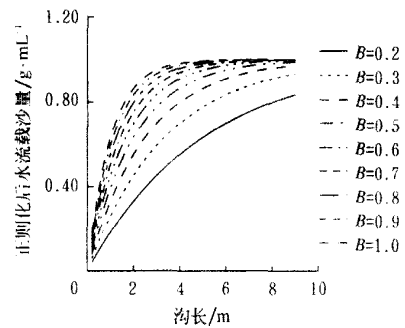


图 2 (正则化) 水流载沙量与沟长的函数关系

Fig 2 Functional relationship between normalized sediment load ( $qc/T_c$ ) and rill length

由于水流中含沙量(或载沙量)随沟长的这种变化关系, 当  $B$  值变化或沟长取值变化时, 将使得由下式计算(估计) 的最大可能剥蚀率产生很大的误差:

$$D_c = \frac{\Delta g}{\Delta x} \quad (8)$$

于是以此为基础的可蚀性参数的估计值也将有很大的误差。

另外, 根据 Lei 等人<sup>[7,9]</sup>1999 年实验室试验的观测结果, 在径流小区宽度 0.5 m、长 8 m (与 Gilley 等人的 0.5 m 宽、9 m 极为相近), 由于侵蚀与沉积的交替发生, 细沟宽度不断变化, 水流的输沙能力、剥蚀率、水流的剪切力也随着不断变化, 使得由径流小区出口处测得的水流含沙量也变化不定, 且大大低于恒定水流下应有的量值, 而且水流的剪切应力是无法估计的。根据这样的结果, 采用 (8) 式计算得到的最大可能剥蚀率, 用于估计可蚀性参数将会产生更大的误差。

3 式中是仅根据限定细沟的侵蚀产沙输沙的(确定性) 关系分析 W EPP 可蚀性参数的估计误差。根据上述讨论可以推断实际误差是大于由 3 式估计的误差的。

### 3 W EPP 可蚀性误差的估算

由以上分析可知, 理想的最大水流剥蚀率应该用很短的细沟在清水冲刷下得到的, 而短细沟长度的最理想值是零。雷廷武等人<sup>[10]</sup>2002 年的研究结果提供了这种估计方法的可能性。该文中得到了细沟土壤剥蚀率与细沟载沙量的关系, 为:

$$D_r = \frac{dc}{dx} q = \frac{dG}{dx} \quad (9)$$

而最大可能剥蚀率是在沟长为零时取得, 即:

$$D_{max} = \lim_{x \rightarrow 0} \left( \frac{dc}{dx} q \right) \quad (10)$$

由(10)式表明, 细沟土壤侵蚀的最大可能剥蚀率为水流载沙量—沟长的函数关系曲线在  $x = 0$  处的导数, 或者说是该函数关系曲线在沟长为 0 时的斜率。将(5) (或(6)、(7)式) 式代入(10) 得到

$$D_{max} = D_c = T B \quad (11)$$

而由 Gilley 等人<sup>[4]</sup>假设也是限定性细沟的条件下, 得到的最大可能剥蚀率结果为:

$$D_{max} = D_c = T_c \frac{1 - e^{-BX}}{X} \quad (12)$$

式中  $X$  —— 细沟的总长度, m。

(12) 式代表的几何意义为: 细沟土壤侵蚀的最大可能剥蚀率为水流载沙量—沟长的函数关系曲线由原点到细沟(径流小区) 出口处水流载沙量值的连线的斜率。显然, 该量值大大小于曲线在起点处的斜率值。

由(3)式得到

$$K_r = \frac{D_c}{\tau - \tau_c} \quad (13)$$

$$\delta = \frac{\Delta K_r}{K_r} \times 100\% = \frac{K_r - K_r}{K_r} \times 100\% \quad (14)$$

式中  $\delta$  —— 估计可蚀性参数  $K_r$  的相对误差。

将(11)、(12)、(13)式代入(14)得

$$\delta = \frac{\frac{1}{\tau - \tau_c} \left( T B - T_c \frac{1 - e^{-BX}}{X} \right)}{\frac{1}{\tau - \tau_c} T B} = 1 - \frac{1 - e^{-BX}}{BX} \quad (15)$$

由(15)式所确定的误差是关于估计可蚀性参数的细沟长度及  $B$  值的函数。当用于估计最大可能剥蚀率的细沟长度趋于零时, (15) 式所确定的误差也趋于零。(15) 式所表达的函数关系如图 3 所示。

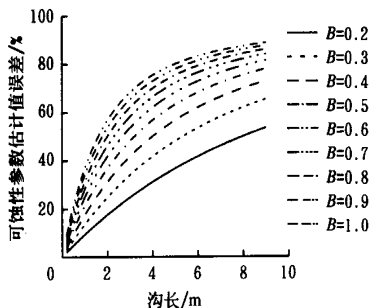


图 3 不同  $B$  值时 W EPP 可蚀性参数估计值误差随沟长的变化  
Fig. 3 Relative error of erodibility estimation parameters as a function between rill length and  $B$  values

由图 3 可见, 可蚀性参数估计值的相对误差随获取载沙量细沟长度的增加而增加, 并且当沟长一定时, 误差的大小随  $B$  值而增大。这就表明, 估计误差与沟长、水流、沟坡、土壤等因素密切相关。当选用细沟长度 9 m 处的水流载沙量按(12)式估计最大可能剥蚀率来估计土壤的可蚀性参数时可能的误差可达到: 当  $B = 0.1$

时, 误差约为 50%; 当  $B = 1.0$  时, 误差可达 90%, 即所估计的土壤可蚀率大约为实际值的 10%, 即当  $B = 1.0$  时, 按(10)式所估计的最大可能剥蚀率去计算得到的土壤可蚀率可以达到 Gilley 等人的估计方法所得数值的 10 倍左右。实际上, Lei 等人<sup>[11]</sup>2002 年所得到的黄土(粉壤土, 粘粒 15.1%) 的可蚀性参数值(0.32 s/m) 约为 Gilley<sup>[4]</sup>等人所得到的最大可蚀性参数的 10 倍。这表明, 估计最大剥蚀率的方法对于估计土壤可蚀性参数具有极其重要的影响。用 Zhang 等人<sup>[12]</sup>2002 小土样(直径 10 cm) 得到的试验数据估计得到的壤土(粘粒含量 24.3%) 的可蚀性参数值为 0.204 s/m。众所周知, 土壤粘粒含量越高, 抵抗侵蚀的能力越强, 可蚀性参数越低。从而可见, Lei 等人<sup>[11]</sup>的结果与 Zhang 等人<sup>[12]</sup>的结果具有可比性, 说明估计结果在很大程度上是可信的, 其估计的方法是可行的。

上述对于 Gilley 等人估计 W EPP 细沟土壤可蚀性参数的误差分析过程是合理的。从而说明, W EPP 模型的细沟可蚀性参数数据库的有效性和可用性有必要重新加以考虑。

以上分析可知, 为了减少可蚀性参数的估计误差, 必须至少做到以下两点: 1) 采用限定性细沟和稳定的水流, 以使水流的剪切应力和水流的输沙能力沿沟长变化不大, 从而可以较好地估计水流剪切应力及输沙能力沿沟长的分布; 2) 用清水对长度无限短的细沟冲刷所产生的土壤剥蚀率作为最大土壤剥蚀率的估计值, 用于计算可蚀性参数。

#### 4 结论与讨论

W EPP 模型估计细沟土壤可蚀性参数的方法存在一些原理性缺陷。采用宽的径流小区, 由于细沟的演变, 泥沙的剥蚀与沉积变化的不确定性, 造成水流对土壤剪切应力估计和对剥蚀率估计存在一定的困难和误差。即使在限定性细沟条件下, 用长的细沟的载沙量相对于细沟长度的均值来估计最大可能剥蚀率并用于估计土壤的可蚀性参数, 将使土壤可蚀率的估计值产生 50% ~ 90% 的误差。因此, W EPP 模型估计土壤可蚀性参数的方法和 W EPP 模型现有的可蚀性参数有必要重新加以考虑和检验。在限定性细沟、稳定水流条件下, 进行细沟侵蚀产沙过程试验, 细沟长度为无限短的细沟估计土壤剥蚀率, 并以此作为最大可能土壤剥蚀率来估计土壤可蚀性参数是合理而有效的方法。

#### [参 考 文 献]

[1] Flanagan D C, Nearing M A. USDA Water erosion prediction project hillslope profile and watershed model documentation[R]. NSERL Report No. 10, U S D A - A R S Nation soil erosion research Laboratory, West Lafayette, 1995. In. 47901.  
[2] 吴普特. 动力水蚀实验研究[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997.  
[3] Elliot W J, Liebenow A M, Laflen J M, et al. A

- compendium of soil erodibility data from WEPP cropland soil field erodibility experiments 1987 and 1988 [R]. N SERL Rep. No. 3, USDA - ARS, West Lafayette, N, 317pp.
- [4] Gilley J E, Elliot W J, Laflen J M, et al Critical shear stress and critical flow rates for initiation of rilling[J]. J Hydrology, 1993, 142: 251- 271.
- [5] Huang C, Bradford J M, Laflen J. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation [J]. Soil Sci Soc Am J, 1996, 60: 734- 739.
- [6] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al Soil detachment by shallow flow [J]. Trans ASAE, 2002, 45 (2): 351- 357.
- [7] Lei T W, Nearing M A, Haghghi K, et al Rill erosion and morphological evolution: a simulation model [J]. Water Resources Research, 1998, 34(11): 3157- 3168.
- [8] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, et al Laboratory study on sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion[J]. Trans ASAE, 2002, 44(6): 1537- 1542.
- [9] Lei T W, Nearing M A. Flume experiments for determining rill hydraulics, erosion and rill patterns[R]. 10<sup>th</sup> ISCO Int Con, West Lafayette, USA, 1999, May 21 - 28.
- [10] 雷廷武, 张晴雯, 赵军, 等. 确定侵蚀细沟集中水流剥离速率的解析方法[J], 土壤学报, 2002(6): 788- 793.
- [11] Lei Tingwu, Zhang Qingwen, Xia Weisheng, et al Analytic determination of soil erodibility and critical shear stress [A]. Proceedings 12<sup>th</sup> International Soil conservation Organization Conference [C]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [12] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al Soil detachment by shallow flow [J]. Trans ASAE, 2002, 45 (2): 351- 357.
- [13] 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.

## Theoretical analysis of estimation error of soil erodibility for rill erosion in WEPP model

Lei Tingwu<sup>1,2</sup>, Zhang Qingwen<sup>2</sup>, Yao Chunmei<sup>1</sup>, Yan Lijuan<sup>1</sup>, Liu Han<sup>1</sup>, Yang Chao<sup>1</sup>

(1. The Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, College of Hydraulic and Civil Engineering, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Rill erosion is of great significance in hill-slope erosion. Soil erodibility for rill erosion is a very important parameter for soil erosion prediction with Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. The estimation of the soil erodibility needed by WEPP was based on the potential detachment rate of rill erosion, measured with long rill channel. The dynamical erosion processes along a rill caused estimation error of the erodibility. Theoretical algorithm was given for determining the estimation error of the present method. Theoretical analysis indicated that for a well-defined rill channel, the estimation error of erodibility was mainly from the error of potential detachment estimation. The ideal estimated value of the potential detachment rate was the derivative value, at the initial position, of the function between sediment load and rill length. Computed results showed that the error in erodibility presently used in WEPP model was as high as 90% with the lowest value being higher than 50%. Therefore, it was suggested that both the method and the erodibility data for the WEPP model need to be reexamined and reevaluated. Possible ways for reduction of estimation error of the parameter were suggested.

**Key words:** WEPP; soil erosion; model parameters; error analysis

雷廷武, 张晴雯, 姚春梅, 等. WEPP 模型中细沟可蚀性参数估计方法误差的理论分析[J]. 农业工程学报, 2005, 21(1): 9- 12.

Lei Tingwu, Zhang Qingwen, Yao Chunmei, et al Theoretical analysis of estimation error of soil erodibility for rill erosion in WEPP model[J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(1): 9- 12 (in Chinese with English abstract)