第 41 卷 第 1 期
2004 年 1 月

土 壤 学 报
ACTA PEDOLOGICA SINICA

Vol. 41, No. 1
Jan., 2004

确定侵蚀细沟土壤临界抗剪应力的 REE 示踪方法*

唐泽军[1] 雷廷武[1,2†] 张晴雯[2] 赵 军[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室, 陕西杨凌 712100)

摘 要 近年来兴起的 REE 示踪方法, 可以研究土壤侵蚀的发生和发展的过程, 及其沿坡面变化的规律。本研究采用 Dy、La、Sm、Yb、Ce、Eu、Nd、Tb 等 8 个 REE、3 个雨强(50 mm h^{-1}, 100 mm h^{-1}和 150 mm h^{-1})和 4 个坡度(8.74%, 17.63%, 36.4% 和 46.63%)进行了一系列人工模拟降雨试验, 展示了土壤侵蚀沿坡面变化与坡面细沟发展的关系, 分析了土壤表面水流动力特征与土壤侵蚀之间的动态平衡。由土壤侵蚀沿坡面的变化, 确定了土壤细沟侵蚀发生的临界距离, 并由此得到侵蚀细沟土壤临界剪应力。对不同试验条件下最大细沟侵蚀率与径流剪应力和细流力之间的关系进行了回归分析。

关键词 稀土元素; 模拟降雨; 土壤侵蚀

中图分类号 S152.7 文献标识码 A

细沟的形成与土壤表面径流的动力特征有着十分密切的关系, 径流在侵蚀土壤的过程中, 其动力特征会沿坡面发生变化, 从而引起沿土壤坡面产生差异性侵蚀, 在某些部位形成细沟。通常, 土壤侵蚀是径流沿土壤表面所产生的剪应力的函数[1,2], 在低流速的情况下, 径流所产生的剪应力小于土壤抗侵蚀的临界剪应力 τ_c 时, 几乎不会产生土壤剥蚀。当土壤表面径流的强度增加时, 沿坡面径流的速度和能量将增加, 径流的剪应力增加, 当超过临界剪应力 τ_c 时(克服土壤颗粒间的黏结力), 就会产生剥蚀, 同时, 径流还必须有足够的能量克服土壤表面的黏结力, 土壤颗粒才能被水流携带[1~4]。

土壤剥蚀率与径流的剪应力有着很好的线性关系, Shainberg 的粉壤土试验表明[1], 当径流的剪应力超过 0.74 Pa 时, 相关系数达到 0.91, 由回归分析公式, 确定了土壤可剥蚀率和临界剪应力分别为 6.46 g m^{-2} s^{-1} Pa^{-1}和 1.05 Pa。有些学者[5]提倡在土壤剥蚀和输沙的计算中采用细流力(Stream power, 为对应细沟, 且称之为细流力)这个重要的参数, Shainberg 的试验数据表明土壤剥蚀率与细流力有着更好的相关性[1], 包含所有数据的相关数大于 0.94。径流的剪应力和细流力是刻画土壤表面径流动力特征的两个重要参数, 它们有着密切的联系, Nearing[4] 等人从简单的力平衡的方法建立了两个参数之间的联系, 但认为两者与土壤剥蚀之间不存在唯一的线性关系。

径流剪应力是径流在坡面位置和时间的函数, 一般随坡长和时间增加而增大, 能够表征径流侵蚀土壤的能力。与之相伴随的临界剪应力 τ_c 是表征土壤抗侵蚀能力的一个参数, 其值相对比较固定, 与土壤的比重、含水量、结构等因数有关。τ_c 是土壤侵蚀计算公式中的一个非常重要的参数, 但如何确定 τ_c 一直是个没有很好解决的问题, 至今仍没有一个广为接受的理论或试验的方法。通常的做法是将侵蚀量与径流的剪应力进行回归分析, 取回归直线在剪应力轴上的截距为 τ_c 值, 这方法没有反映土壤侵蚀的内在机理和过程, 而且有时得到的 τ_c 值甚至是负值, 显然与实际情况不相符。

本文的目的是通过稀土元素示踪土壤侵蚀过程的降雨模拟试验, 分析土壤表面径流的动力特征与土壤侵蚀沿坡面变化的规律, 寻找确定 τ_c 值的方法。

1 几个有关的细沟侵蚀基本公式

土壤侵蚀 WEPP 模型中稳定条件下的土壤侵蚀

* 教育部科学技术研究重大项目(ZD01-10)、中国科学院"引进国外杰出人才"项目(982602)资助

† 通讯作者: ddragon@public3.bta.net.cn, Tel. 010-62336367

作者简介: 唐泽军(1958~), 湖南人, 博士, 副教授, 主要从事水土环境的研究。E-mail: tangzejun@sina.com.cn

收稿日期: 2003-03-02; 收到修改稿日期: 2003-08-02

连续方程为[5~8]:

$$\frac{dq_s}{dx} = D_r + D_i \tag{1}$$

式中, q_s为单位径流量的含沙重($g\ m^{-1}\ s^{-1}$); x 为距离(m); D_r 为细沟侵蚀率($g\ m^{-2}\ s^{-1}$); D_i 为细沟间侵蚀率($g\ m^{-2}\ s^{-1}$)。

细沟剥蚀率是 WEPP 模型的核心部分, 表达式为:

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c)\left(1 - \frac{q_s}{T_c}\right) \tag{2}$$

式中, K_r 为土壤可蚀性参数($g\ m^{-2}\ s^{-1}\ Pa^{-1}$); τ 为径流的剪应力(Pa); τ_c为土壤临界抗剪应力(Pa); T_c 为径流的输沙能力($g\ m^{-1} s^{-1}$)。

从(2)式可以看出, 当径流中含沙量为零时, 细沟侵蚀率最大, 这时有:

$$D_r = K_r(\tau - \tau_c) \tag{3}$$

径流剪应力与土壤表面径流的动力特征及坡度有关:

$$\tau = \rho g h S \tag{4}$$

式中, ρ 为水的密度($kg\ m^{-3}$); g 为重力加速度($9.8\ m\ s^{-2}$); h 为径流深度(m); S 为坡度(%)。

Bagnold 首先从溪流输沙的研究中提出了细流力(Stream power)的概念[9], 后来许多学者在细沟侵蚀研究中计算径流的输沙能力时引入了细流力的概念[2~4,10,11], 细流力定义为:

$$\omega = \rho g S q \tag{5}$$

式中, q 为单位宽度径流量($m^2\ s^{-1}$)。

Nearing 得到了细流力一个更简单的公式[7]:

$$\omega = \tau V \tag{6}$$

式中, V 为径流的流速($m\ s^{-1}$)。

径流的流速与深度有关, 是与土壤侵蚀的几个公式有着密切关系的参数, Hillel[1] 导出了如下的径流流速公式:

$$V = C h^{1/2} S^{1/2} \tag{7}$$

式中, C 为谢才系数。

2　试验材料与方法

试验土样取自于内蒙古清水河地区耕作表层土, 是典型的黄绵土, 为淡黄色。土壤颗粒以粉砂为主, 粉砂粒占总量的 60% 左右, 粘粒约占 15% 左右, 容重约为 $1.2\ g\ cm^{-3}$。土体松软, 有团粒或团块结构。试验前将土样风干并过 1 cm× 1 cm 的粗筛, 剔除植物根系等杂物。

试验用的 REE 有 Dy、Ce、La、Sm、Yb、Nd、Tb、Eu 等 8 个元素, 为粉末状的氧化物。采用逐步稀释的方法分别将 8 个 REE 与试验用土混合制成富含 REE 的试验示踪用土, 并取样测定 REE 的含量。

试验由 3 个雨强($50\ mm\ h^{-1}$, $100\ mm\ h^{-1}$, $150\ mm\ h^{-1}$)和 4 个坡度(8.74%, 17.63%, 36.4%, 46.63%)相互交叉的 12 个试验构成。每个试验又分两个阶段, 在试验的前一阶段的降雨试验完成后, 将试验土样静置 24 h, 试验的第二阶段再重复前一次降雨试验过程。

试验程序如下: 选定试验坡度和雨强。每次降雨试验前进行雨强标定。将试验小槽均匀分成八段, 试验槽底部先装 20 cm 厚的细砂, 然后按估计在不同部位的可能侵蚀深度, 在细砂上装 10~ 12 cm 厚的试验土, 再装 3 ~ 5 cm REE 示踪土, 使试验土和 REE 示踪土的厚度正好为 15 cm 厚。细砂与土之间用细纱布隔开(纱布的作用是下次试验只须换黄土)。装土的容重约为 $1.2\ g\ cm^{-3}$, 保持与野外耕作土基本相同。装土完毕后, 将试验槽调整到选定的坡度。开始连续不断的降雨, 一旦开始产流, 立即按 2、3、5、5、5、5 min 的时间间隔测定径流量, 同时采取泥砂样并测定产砂量。降雨时间取决于产流时间, 一般在最后一个试验小槽产流 30 min 后停止降雨, 完成第一阶段降雨试验。试验土样静置 24 h 后, 重复第一阶段降雨试验过程, 实现第二阶段降雨试验过程, 完成一组试验。

REE 样品的分析是在中国原子能科学研究院原型微反应堆上采用中子活化分析方法进行的。

3　结果与讨论

REE 可以很好地示踪土壤侵蚀的过程, 揭示不同时刻土壤侵蚀率沿土壤坡面变化的动态趋势, 由于土壤侵蚀是径流沿土壤表面所产生的剪应力的函数, 所以土壤侵蚀沿坡面的变化又反映了土壤表面径流的剪应力在侵蚀过程中的变化趋势。图 1a 是在雨强 $100\ mm\ h^{-1}$坡度 36.4%条件下, REE 示踪土壤侵蚀沿坡面及随时间变化趋势图。从图 1a 可以看出, 土壤侵蚀率沿坡长随时间有规律的起伏变化, 在距坡端部 3 m 以内, 土壤侵蚀率的等值线很稀, 侵蚀量很小而且沿坡面没有明显的变化; 从 3 m 处开始往下, 土壤侵蚀率显著增大, 土壤侵蚀率等值线变得密集, 土壤侵蚀率沿坡面变化明显。从 6 m 处往下, 土壤侵蚀率等值线又变得稀疏。从时间上来看,

随降雨时间的延长, 土壤侵蚀率的等值线逐渐密集, 而且密集的区域向坡上游移动, 土壤侵蚀向上扩展。

不同条件下一系列的试验都显示了土壤侵蚀率沿坡面随时间变化的类似趋势, 小雨强小坡度的条件下, 土壤侵蚀率等值线稀疏的区域可以扩展很广, 等值线密集区域集中在土壤坡面的下部(图 1b), 而大雨强大坡度的条件下, 等值线稀疏区域比较小, 大侵蚀率的等值线密集区增大(图 1c)。REE 示踪显示的土壤侵蚀随坡面变化的趋势深刻地揭示了土壤侵蚀的过程, 使公式(2)的物理意义更为清晰。降雨产生径流后, 随径流的强度增加, 径流的剪应力增加, 当超过土壤细沟侵蚀的临界剪应力时, 细沟侵蚀发生, 土壤的侵蚀率显著增大。

基于土壤侵蚀随坡面的变化过程及公式(2)的物理意义, 从不同条件下土壤侵蚀率随坡面的变化趋势图, 可以获得确定土壤抗细沟侵蚀临界剪应力 τ_c 的计算方法。一系列的试验均显示在坡面上一定位置土壤侵蚀率显著增大, 这就隐含土壤表面径流在此处的强度逐渐增大时其水动力条件发生了变化。当土壤表面的径流不大时, 沿坡面可能产生有限的土壤侵蚀, 这时土壤侵蚀在坡面各处大致是相同的。当径流聚集了足够的能量, 其所具有的剪应力大于土壤细沟侵蚀临界剪应力时, 土壤侵蚀率就会突然显著增大, 此处为土壤细沟侵蚀临界距离, 所对应的径流剪应力即为土壤抗细沟侵蚀临界剪应力。

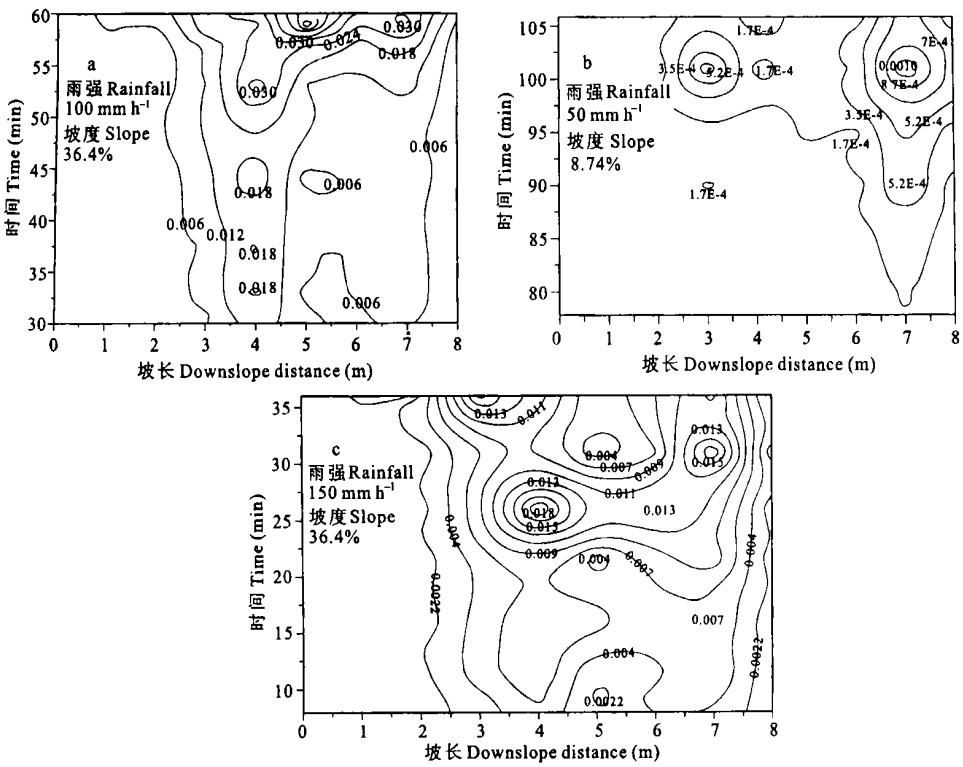

图 1 土壤侵蚀率随坡面和时间变化等值线图

Fig. 1 Detachment rate as a function of distance of slope and time

许多计算土壤细沟侵蚀临界抗剪应力的试验数据通常是从短坡或长坡两类试验槽获取的, 二者都有一定的缺陷, 从土壤细沟侵蚀临界抗剪应力的物理意义上来说是不明确的。对短坡来说, 径流所聚集的能量可能尚不足以克服土壤临界抗剪应力。对长坡来说, 用来计算的土壤侵蚀量是全坡的累积, 无法区分细沟和细沟间的土壤侵蚀量。而采用 REE 示踪土壤侵蚀的方法较好地克服了这两方面的不足, 通过土壤侵蚀沿坡面变化的特征, 界定土壤侵蚀的临界距离, 把计算土壤侵蚀临界剪应力转化为计算临界距离处径流的运动参数问题。

据公式(3)、(4)、(5)、(6)和(7)以及不同试验条件下的土壤侵蚀率随时间沿坡面变化的趋势计算的各项参数列于表 1。从表中可以看出, 土壤临界剪应力除了个别的值, 一般界于 1 到 2 Pa 之间, 平均值为 1.31 Pa。土壤临界剪应力是土壤产生显著侵蚀时土壤表面颗粒之间破裂时的张应力, 是土壤的一个物理参数, 对于某一类土壤来说通常是一个常

数, 但在不同的试验条件下, 可能在一定值范围内波动。当径流的剪应力大于 τ_c 时, 细沟侵蚀发生, 土壤侵蚀显著增加。

表 1　各试验条件下土壤临界剪应力及参数的计算

Table 1　Calculation of critical shear stress of soil and other parameters in the experiments

雨强 Rainfall ($mm\ h^{-1}$)	坡度 Slope (%)	临界距离 Critical distance(m)	径流厚度 Depth of flow(m)	径流速度 Flow velocity ($m\ s^{-1}$)	谢才系数 Chezy's C	临界剪应力 Critical shear (Pa)	临界细流力 Stream power ($kg\ s^{-3}$)
50	8.74	6.5	0.000 80	0.62	70	0.77	0.48
50	36.4	3	0.000 47	0.91	70	1.68	1.54
50	46.63	2.5	0.000 10	0.48	70	0.46	0.22
100	8.74	3.4	0.002 23	0.98	70	1.91	1.87
100	17.63	2.9	0.000 56	0.71	70	1.02	0.73
100	36.4	2.5	0.000 47	0.91	70	1.68	1.54
100	46.63	1.3	0.000 23	0.72	70	1.05	0.76
150	8.74	3	0.001 87	0.80	70	1.28	1.03
150	17.63	2.5	0.001 28	0.78	70	1.21	0.94
150	36.4	1.5	0.001 01	0.94	70	1.78	1.68
150	46.63	0.8	0.000 18	0.88	70	1.55	1.37

REE 示踪土壤侵蚀的方法较为准确地确定了坡面各处的土壤侵蚀量的大小。试验的数据表明, 在临界距离内, 土壤侵蚀量非常小, 径流中泥砂的浓度很低, 可以近似认为是清水侵蚀, 在临界距离处土壤侵蚀量显著增大并很快达到最大值, 这个过程清晰地诠释了公式(3) 的物理意义, 公式(3) 很好地表达了剪应力与最大侵蚀量之间的关系。同时通过公式(3) 可以很方便地获得另一个重要的土壤物理参数——土壤细沟可蚀率。

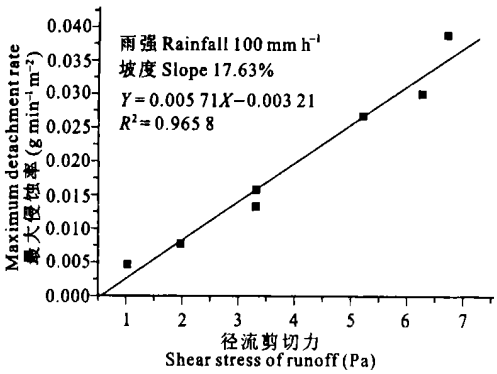

图 2　最大细沟侵蚀率与径流剪应力的关系

Fig. 2　Maximum rill detachment rate as a function of shear stress

图 2 是雨强 100 mm h^{-1} 坡度 17.63% 条件下径流剪应力与最大侵蚀量的关系, 最大侵蚀量与最大侵蚀处的径流剪应力之间有很好的线性关系, 决定系数 R^2 达到 0.97, 表明最大细沟侵蚀量随径流的剪应力增大而增大。最大侵蚀量实际就是细沟侵蚀活跃的区域, 随降雨的继续, 土壤表面径流的动力特征将产生一定的变化。细沟的出现, 径流会集中于细沟内增加径流的侵蚀力, 使细沟的区域逐渐往坡下部增大。土壤侵蚀临界距离会向坡上移动, 但移动距离不大, 依然可以认为土壤侵蚀临界距离内侵蚀量非常小, 所以用公式(3) 来描述细沟最大侵蚀量与径流剪应力的关系是合适的。

不同试验条件下细沟最大侵蚀量与径流剪应力的回归分析列于表 2。回归分析表明, 大多数试验条件下产生的细沟最大侵蚀量与径流的剪应力都有很好的线性相关关系, 相关系数 R^2 均在 0.9 以上, 高相关系数的获得显然与 REE 示踪法能够正确测定最大细沟侵蚀量有关。分析结果表明, 虽然细沟最大侵蚀量与径流剪应力成线性关系, 但不同坡度和降雨强度条件下, 其回归方程是不一样的, 相近的径流剪应力产生的土壤侵蚀可能相差甚远。从形式上来看, 回归公式与公式(3) 完全一样, 回归公式的截距应该是土壤临界剪应力, 然而从回归公式得到的 τ_c 值变化范围比较大, 与 REE 示踪方法得到的 τ_c 对比, 显然与实际情况不符。首先是因为随降雨时间的延续, 土壤的物理性质在不同试验条件的约束下会表现出一定的差异, 而且试验条件的差异性

越大, 物理性质的差异性也就会越大。所以用根据 REE 示踪土壤侵蚀率沿坡面变化规律确定的临界侵蚀距离处土壤表面初始径流的剪应力来获得土壤临界剪应力的方法更为合理。

表 2 最大细沟侵蚀率与径流剪应力的回归分析

Table 2 Regression analyses of maximum rill detachment rate and shear stress of runoff

雨强 Rainfall(mm h^{-1})	坡度 Slope (%)	回归公式 Regression model	决定系数 R^2	临界剪切力 Critical shear(Pa)	回归公式临界剪切力 Critical shear stress from regression (Pa)
50	8.74	$y = 0.0008x - 0.0003$	0.91	0.77	0.375
50	36.4	$y = 0.0054x - 0.0036$	0.91	1.68	0.667
50	46.6	$y = 0.0116x + 0.0127$	0.95	0.46	-1.095
100	8.74	非线性 Nonlinear		1.91	
100	17.6	$y = 0.0057x - 0.0032$	0.96	1.02	0.561
100	36.4	$y = 0.001x + 0.0143$	0.93	1.68	-14.3
100	46.6	$y = 0.0022x - 0.0063$	0.95	1.05	2.864
150	8.74	$y = 4E-05x + 0.0001$	0.93	1.28	-2
150	17.63	$y = 0.0002x + 0.0004$	0.89	1.21	-2
150	36.4	$y = 0.0005x + 0.0092$	0.93	1.78	-18.4
150	46.6	$y = 0.0001x + 0.0024$	0.95	1.55	-24

Rose、Shainberg 等人[1,3,5]提倡在土壤细沟侵蚀研究中使用细流力这一重要参数, Huang[10]认为考虑了坡度和径流强度共同作用的细流力在计算径流中砂含量时更为合理。Bagnold[9]和 Rose[5]给出了一个包含临界细流力的细沟侵蚀率计算公式, 认为只有当细流力大于临界细流力时, 才能发生显著的土壤侵蚀。表 3 是不同试验条件下细沟最大侵蚀量与细流力的回归分析, 大多数试验条件下产生的细沟最大侵蚀量与细流力的相关系数比径流剪应力的相关系数要高。Nearing 等人[4]的试验表明径流的剪应力和细流力都不是很好的描述土壤侵蚀的径流参数; Huang[10]的研究认为细流力与径流中砂浓

表 3 最大细沟侵蚀率与细流力和临界剪切力的回归分析

Table 3 Regression analysis of maximum rill detachment rate vs. stream power and Critical sheer stress

雨强 Rainfall (mm h^{-1})	坡度 Slope (%)	回归公式 Regression model	相关系数 R^2	临界细流力 Critical stream power (Pa m s^{-1})	回归公式临界剪切力 Critical shear stress from regression (Pa)
50	8.74	$y = 0.0006x - 3E-05$	0.91	0.48	0.05
50	36.4	$y = 0.0028x + 0.0017$	0.89	1.54	-0.67
50	46.63	$y = 0.0088x + 0.0171$	0.98	0.22	-1.94
100	8.74	非线性 Non linear		1.87	
100	17.63	$y = 0.0028x + 0.0025$	0.99	0.73	0.56
100	36.4	$y = 0.0003x + 0.0163$	0.94	1.54	-54.33
100	46.63	$y = 0.0006x + 0.0016$	0.97	0.76	-2.66
150	8.74	$y = 2E-05x + 0.0002$	0.95	1.03	-10
150	17.63	$y = 6E-05x + 0.0006$	0.90	0.94	-10
150	36.4	$y = 0.0001x + 0.0115$	0.93	1.68	-115
150	46.63	$y = 4E-05x + 0.0027$	0.98	1.37	-67.5

度有着很好的二次非线性性; Shainberg 等人[1,3]的试验认为细沟侵蚀量与径流的剪应力和细流力都有很好的线性相关关系。本试验的结果与 Shainberg 等人的结果相近。众多的试验显示出不同的研究结果, 这反映了不同的土壤在不同的试验条件和方法下, 会得出土壤侵蚀与径流剪应力和细流力不同关系的结论, 表明土壤侵蚀与径流剪应力和细流力之间还有待深入的研究。

基于同样的道理, 用根据 REE 示踪土壤侵蚀率沿坡面变化规律确定的临界侵蚀距离处土壤表面初始径流的细流力来计算临界细流力的方法是合理的。

4 结　论

REE 示踪土壤侵蚀的过程揭示了不同时刻土壤侵蚀率沿土壤坡面变化的趋势, 通过土壤侵蚀沿坡面变化的特征, 可以界定土壤侵蚀的临界距离, 临界距离处土壤表面径流的剪应力与土壤抗侵蚀临界剪应力 τ_c 相平衡, 从而可以把计算土壤侵蚀临界剪应力 τ_c 转化为计算临界距离处土壤表面径流的运动参数问题。一系列的试验数据计算表明, 试验土壤的临界剪应力 τ_c 值界于 1 到 2 Pa 之间, 平均值为 1.31 Pa。

不同试验条件下细沟最大侵蚀量与径流剪应力的回归分析表明, 大多数试验条件下产生的细沟最大侵蚀量与径流的剪应力都有很好的线性相关关系, 相关系数 R^2 在 0.9 以上, 细沟最大侵蚀量与细流力的相关系数比径流剪应力的相关系数要高, 相关性更好。高相关系数的获得显然与 REE 示踪法能够正确测定最大细沟侵蚀量有关。

参 考 文 献

[1] Shainberg I, Laflen J M, Bradford J M, *et al*. Hydraulic flow and water quality characteristics in rill erosn. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1 007~ 1 012

[2] Laflen J M, Elliot W J, Simanton J R, *et al*. WEPP soil erodibility experiments for rangeland and cropland soils. J. Soil Water Conserv., 1991, 46: 39~ 44

[3] Shainberg I, Goldstein D, Levy G J. Rill erosion dependence on soil water content, aging, and temperature. Soil Sci. Soc. Am. J., 1994, 58: 1 007~ 1 012

[4] Nearing M A, Bradford J M, Parker S C. Soil detachment by shallow flow at low slopes. Soil Sci. Soc. Am. J., 1991, 55: 339~ 344

[5] Ross C W. Developments in erosion and deposition models. Adv. Soil Sci., 1985, 2: 1~ 63

[6] Huang C, Bradford J M, Laflen J M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation. Soil Sci. Soc. Am. J., 1996, 60: 734~ 739

[7] Huang C, Bradford J M. Analyses of slope and runoff factors based on the WEPP erosion model. Soil Sci. Soc. Am. J., 1993, 57: 1 176~ 1 183

[8] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, *et al*. Laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. Trans. ASAE., 2002, 44(6): 1 537~ 1 542

[9] Bagnold R A. An approach to the sediment transport problem from general physics. *In*: Thorne C R, *et al*. eds. The Physics of Sediment Transport by Wind and Water. New York : Am. Soc. Civ. Eng., 1966. 231~ 291

[10] Huang C. Empirical analysis of slope and runoff for sediment delivery from interrill areas. Soil Sci. Soc. Am. J., 1995, 59: 982~ 990

[11] Lei T W, Nearing M A, Haghighi K, *et al*. Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. Water Resour. Res., 1998, 34: 3 157~ 3 168

A METHOD FOR DETERMINING CRITICAL SHEAR STRESS OF SOIL IN ERODING RILL WITH REE TRACERS

Tang Zejun[1] Lei Tingwu[1,2†] Zhang Qingwen[2] Zhao Jun[2]

(1 College of Hydraulic and Civil Engineering, China Agriculture University, 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 and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract In recent years, the tracing method of rare earth element (REE) has been used to study the dynamic processes of soil erosion, such as its initiation, development and distribution upon the hill slope. A series of laboratory rainfall simulation experiments were conducted with eight REEs, namely Dy, La, Sm, Yb, Ce, Eu, Nd and Tb. The experiments involved 3 rainfall intensities: 50 mm h^{-1}, 100 mm h^{-1} and 150 mm h^{-1}; 4 slope gradients: 8.74%, 17.63%, 36.4% and 46.63%, with 3 replicates. The REE experiments revealed soil erosion distribution and its relation to the development of eroding rills. Analysis was made to relate the fluctuation in soil erosion upon the slope to the energy in the runoff flow. With quantitative determination of soil erosion along slope by REE tracers, the critical distance at which rill erosion initiated was determined, and the critical shear stress of soil were estimated accordingly. Regression analyses of maximum rill detachment rate and shear stress and stream power of runoff were made.

Key words Rare earth element; Rainfall simulation; Soil erosion