

应用 REE 示踪法研究细沟流净剥蚀率*

张晴雯¹ 雷廷武^{1,2†} 赵 军¹

(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, 陕西杨凌 712100)

(2 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083)

STUDY OF DETACHMENT RATE IN RILLS WITH THE REE TRACING METHOD

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

(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, Shaanxi 712100, China)

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

关键词 细沟侵蚀; 剥蚀率; 稀土元素示踪法
中图分类号 S157.2 文献标识码 A

细沟侵蚀在坡面水蚀中占有重要地位, 用模型模拟预报细沟侵蚀具有重要意义。以往对细沟发育的研究主要停留在定性描述上, 缺少对过程的定量分析。现有的基于物理过程基础上的侵蚀预报模型, 如水蚀预报模型 WEPP (Water Erosion Prediction Project), 从概念上可以模拟侵蚀产沙的时空变化, 但模型中的参数如细沟净剥蚀率、输沙能力、土壤可蚀性参数等取值困难、过程繁琐, 限制了过程模型的验证以及在细沟侵蚀预报中的实际应用^[1, 2]。

过程模型需要有空间分布特征的数据来验证^[3]。为了获得空间分布数据, 已有多种示踪剂被开发和利用。稳定性稀土元素 (Rare Earth Elements, 简称 REE) 与土壤有较好的结合力, 且在黄土高原土壤中含量甚微, 植物富集有限, 同时它们是稳定性同位素, 对环境无危害, 且可以通过人为施放增强研究的目的性和精确度, 从而在侵蚀过程研究中显示出了特有的潜在功能。REE 示踪法是 80 年代中后期发展起来的一门新技术。国内田均良等人^[4]将 REE 示踪法应用于黄土区土壤侵蚀垂直分布研究; 石辉等^[5]利用人工模拟降雨实验发现 REE 可较好地示踪流域泥沙来源。Zhang 等^[6]通过测定 REE 氧化物

与土壤颗粒结合能力评价了 REE 示踪法研究土壤侵蚀的可能性。

由于稳定性稀土元素独特的性能, 本文将应用 REE 示踪技术确定细沟侵蚀过程中重要水蚀参数——净剥蚀率, 以期对土壤侵蚀预报模型向完整物理模型转化和全方位验证中所需要的参数计算提供工具。

1 REE 示踪法实验设计

1.1 REE 示踪元素的选取

从方法的精度及实验成本和推广前景考虑, 示踪元素还应具有土壤含量甚微、施加量少且易于识别、精确探测等特征。为此, 本研究主要选取了 Ho (钬)、Tb (铽)、Eu (铕)、Yb (镱)、Dy (镝)、Sm (钐)、La (镧)、Tm (铥)、Ce (铈)、Nd (钕) 10 种稀土元素, 其相应的背景值分别为: Ho: 1.2 mg kg⁻¹; Tb: 0.81 mg kg⁻¹; Eu: 1.2 mg kg⁻¹; Yb: 2.64 mg kg⁻¹; Dy: 4.8 mg kg⁻¹; Sm: 6 mg kg⁻¹; La: 32 mg kg⁻¹; Tm: 2.4 mg kg⁻¹; Ce: 60 mg kg⁻¹; Nd: 36 mg kg⁻¹。

* 中国科学院“引进国外杰出人才”项目(982602)、中国科学院知识创新重要研究方向项目(KZCX3-SW-422(-01))、国家自然科学基金项目(40171062)资助

† 通讯作者, 通讯地址: 中国农业大学水利与土木工程学院, 邮编: 100083; 电话: 010-62336423; E-mail: ddragon@public3.bta.net.cn
作者简介: 张晴雯(1975-), 女, 博士, 现工作单位为中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 研究方向为土壤侵蚀过程研究及模拟
收稿日期: 2003-09-30; 收到修改稿日期: 2004-02-30

1.2 REE 示踪元素的坡面布置

试验采用长 8 m、宽 1 m 的土槽,土槽分隔成 0.1 m×8 m 的细沟,再将每条细沟分成十等份,分段分别使用上述 10 种元素进行示踪。每个区段长 0.8 m,宽 0.1 m。自上坡到下坡将区段编号为:1、2、...、10。在每一等份上施放 1 种元素。为了在测量显著的情况下节约用料,将背景值低的元素施放在土壤侵蚀量小处,由此稀土元素在坡面的布置编号顺序从上坡面向下坡面排列,即 1 号元素(Nd)施放在最上坡,10 号元素(Ho)施放在最下坡,依次排序为 Nd、Ce、Tm、La、Sm、Dy、Yb、Eu、Tb、Ho。

1.3 REE 施放深度及浓度的确定

REE 的施放深度应大于可能土壤侵蚀深度。据已有的研究结果和初步的实验模拟知,在室内放水冲刷模拟实验条件下,细沟侵蚀土壤剥蚀率随坡长(近似地)呈指数递减^[7],而侵蚀深度与剥蚀率成正比,由此可以推知侵蚀深度随坡长呈幂函数减少。设细沟集中流时坡上侵蚀深度为 20 cm,坡下侵蚀深度 0.5 cm。同时考虑到实验操作方便,设计了 4 种不同示踪元素的施放深度,分别为 20 cm、15 cm、10 cm、5 cm。

REE 的施放浓度设置如下。设试验时段内土壤侵蚀总量为 W ,对应于第 i 坡段的侵蚀量为 W_i ($i=1, 2, \dots, 10$)。基本施放浓度应使得在总的土壤侵蚀量中某种元素的含量达到其相应背景值的 2 倍以上。在总的侵蚀土壤中,第 i 种 REE 的浓度 C_i 为:

$$C_i = \frac{M_i}{W} = \frac{W_i C_i + W C_i^0}{W} = w_i C_i + C_i^0 \quad (1)$$

式中, M_i 为侵蚀土壤中第 i 种元素的质量; w_i 为第 i 种 REE 元素坡段的侵蚀土壤的权重($\frac{M_i}{W}$); C_i^0 为第 i 种元素的背景值; C_i 为施放浓度。某种稀土元素在总的侵蚀土壤中的浓度应比其相应的背景值高 2 倍以上,或应大于或等于 3 倍的背景值。从而,第 i 种元素的施放量 A_i 为:

$$A_i = W_i C_i = W_i \frac{2}{w_i} C_i^0 = 2 W C_i^0 \quad (2)$$

由上式计算得到的元素施放浓度分别为: Ho: 53.89 mg kg⁻¹; Tb: 78.26 mg kg⁻¹; Eu: 115.94 mg kg⁻¹; Yb: 255 mg kg⁻¹; Dy: 371 mg kg⁻¹; Sm: 231.88 mg kg⁻¹; La: 927.53 mg kg⁻¹; Tm: 35.97 mg kg⁻¹; Ce: 930.7 mg kg⁻¹; Nd: 149 mg kg⁻¹。元素施放量分别为: Ho: 22.31g; Tb: 16.2 g; Eu: 24 g; Yb: 52.8 g; Dy: 76.8 g; Sm: 96 g; La: 384 g; Tm: 22.34 g; Ce: 577.97 g; Nd:

92.55 g。

1.4 示踪土样样品采集

根据上述示踪元素的施放深度,土壤容重按 1.2 g cm⁻³ 计算,求得土壤质量(kg),由施放量和元素的氧化物分子式/分子量,采用逐步稀释法先配制示踪元素氧化物浓缩土样,用碾钵充分碾磨使之尽可能混合均匀,再依据释放倍数逐次混入干土样直到配制成所需要的释放浓度。每一坡度取样如下:未混入 REE 的试验土取样 3 个,以确定土壤的各种 REE 真实背景值。配完土后,每一元素的混合土样在一次制备完成后取样 3 个,以确定真实施放浓度。9 条细沟每条取侵蚀土样 3 个,用于确定沿细沟沟长的土壤侵蚀量。

2 细沟侵蚀模拟冲刷试验

2.1 试验土壤

试验采用延安安塞(黄土高原)的黄绵土。实验用土为母质性黄绵土,其颗粒组成为砂粒(> 0.05 mm)含量占 20.175%,粉粒含量(0.05~0.005 mm)占 63.9%,粘粒含量(< 0.005 mm)占 15.92%,中值粒径为 0.029 mm。装填前将土过边长为 10 mm 的筛孔,并测其容重。将土均匀装入土槽,填入土容重控制在 1.2 g cm⁻³ 左右,厚度约为 20 cm。每次试验前将土壤充分饱和,并放置 24 h 以上再开始试验,从而保证均匀一致的初始含水量及部分消除填装不均匀的影响。

2.2 试验处理及量测

实验设计坡度共为 5 个水平: 5°、10°、15°、20°、25°; 3 个流量水平: 2、4、8 L min⁻¹ (即 0.12、0.24、0.48 m³ h⁻¹)。每个处理有 3 个重复。由自来水管及水箱加水泵供水,采用阀门控制流量,用水表计时标定流量。为了使入水管水流均匀注入,在水管出水口采用 9 cm 长的出水端口,其上布有许多均匀的小孔,并用纱布均匀缠绕该出水端口,保证水流在细沟内均匀分布,并且使其对出水口处土壤的局部扰动尽可能地小。流速测量用有色试剂进行。当水流稳定时,记录染色剂通过一定沟长的时间,用于计算流速。水流稳定后,在各个出水口分别收集所有的泥沙样,定容并烘干称重用于确定总的土壤侵蚀量。

3 计算方法

设试验时段为 ΔT , 流量为恒定,产沙量在时段

ΔT 内不随时间变化, 对应于第 i 种 REE 的第 i 区段所产泥沙量在径流中的含量为 λ_i 。从而对于第 i 种 REE 元素所对应的 i 区段的土壤侵蚀有:

$$W_i = \int_0^{\Delta T} \lambda_i q dt = \lambda_i q \Delta T \quad (3)$$

细沟净剥蚀率为单位时间(s) 单位面积(m^2) 被剥蚀掉的土壤的量(kg), 可由不同坡段部位的含沙量计算不同水动力条件下自坡上开始(第 1 区段)到坡下第 i 段的细沟流净剥蚀率为 D_{ri} :

$$D_{ri} = \frac{\lambda_i}{(x_i - x_{i-1}) \varpi} q = \frac{W_i}{\Delta T \Delta x \varpi} \quad (i = 1, 2, \dots, 10) \quad (4)$$

式中, D_{ri} 为第 i 段细沟流净剥蚀率($kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$), W_i 为第 i 坡段的侵蚀量(kg), ΔT 为试验时段(s), Δx 为施放某一种元素的细沟长度(m), ϖ 为第 i 坡段细沟平均宽度(m)。

4 结果与讨论

采用上述计算公式及中子活化分析结果, 计算得到了不同水动力条件下的细沟流净剥蚀率, 细沟侵蚀净剥蚀率沿细沟分布的趋势见图 1 所示。从图

1 可以看出, 随着坡长的增加细沟净剥蚀率迅速增大, 至增到最大值后又逐渐减小。最大净细沟剥蚀率随着坡度和流量的增大而增大, 且净剥蚀率达到最大值所需要的坡长随坡度和流量的增大而缩短。坡度对净剥蚀率的影响很显著, 最大净剥蚀率随坡度的增加而增加; 流量对最大净剥蚀率的影响随坡度的不同而不同, 陡坡时(坡度为 20° 和 25°) 流量对最大净剥蚀率的影响相对较缓坡时要小。坡度为 25° 时, $2 L \cdot min^{-1}$ 和 $4 L \cdot min^{-1}$ 时的最大净剥蚀率基本一样, $8 L \cdot min^{-1}$ 时的最大净剥蚀率比 $2 L \cdot min^{-1}$ 和 $4 L \cdot min^{-1}$ 时的最大净剥蚀率要大得多, 但三个流量下达到最大净剥蚀率的沟长几乎一样, 在沟坡 2 m 和 3 m 之间。坡度为 20° 时, 三种流量下的最大净剥蚀率几乎相等, 且达到最大净剥蚀率的沟长也一样, 在沟坡 3 m 左右。坡度为 15° 时, 净剥蚀率随坡长的变化稍有不同, 在坡长为 3 m 左右达到最大值后, 并非平缓地减小而是出现波动, 出现了第二个峰值。且流量为 $8 L \cdot min^{-1}$ 时, 第二波峰出现最早, 流量为 $2 L \cdot min^{-1}$ 时的第二波峰出现最迟。 10° 时, $2 L \cdot min^{-1}$ 和 $4 L \cdot min^{-1}$ 时的最大剥蚀率所在沟长滞后于 $8 L \cdot min^{-1}$, 在 3 m 和 4 m 之间。 5° 时达到最大净剥蚀率的坡长明显要长于其他坡度, 约在 5 m 左右。

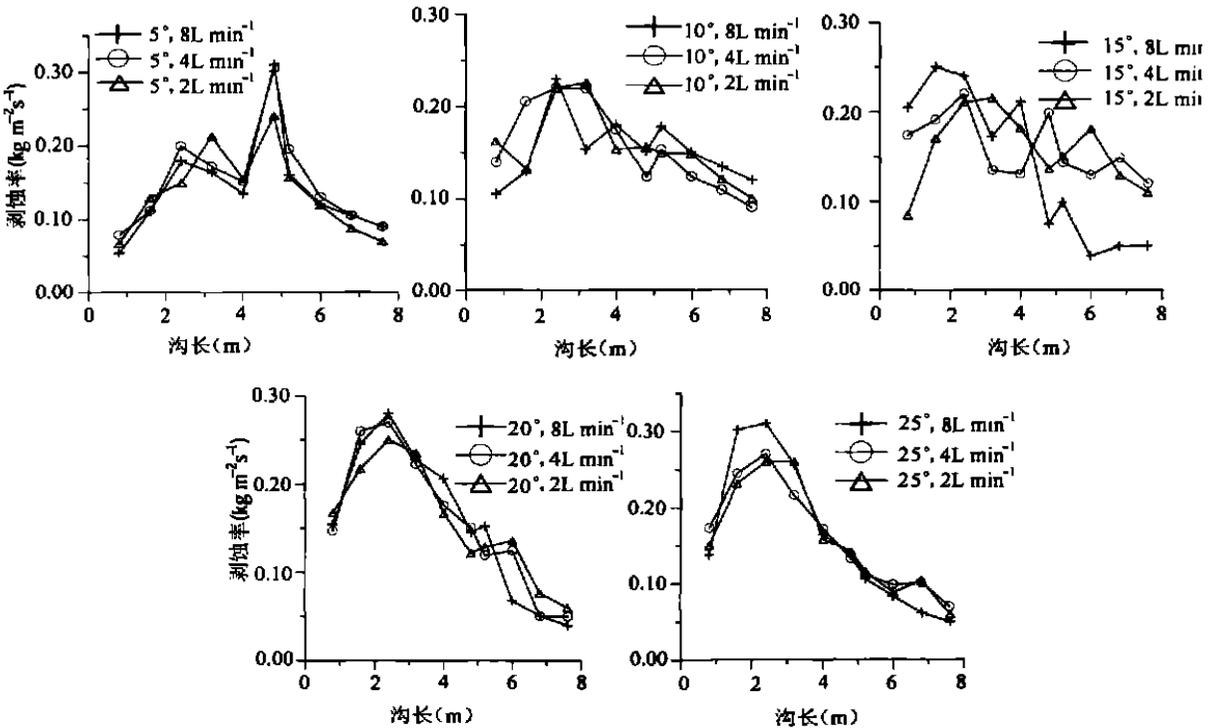


图 1 不同水动力条件下细沟流净剥蚀率随坡长的变化

细沟流侵蚀是一种复杂的做功消耗能量的过程,遵循物质和能量守恒定律,可以用机械能守恒定律来分析细沟流侵蚀过程中的能耗问题。从不同水动力条件下得到的净剥蚀率和坡长的关系可以看出,最大净剥蚀率并不是出现在一开始清水引入的地方,即坡顶的净剥蚀率并不是最大,而且随着坡度的增加,最大净剥蚀率越靠近坡顶。细沟流由坡顶向坡下流动过程中,由于势能向动能转化,如果没有任何阻力,径流流速应愈来愈大;同时,由于细沟流的剥蚀作用,细沟流中含沙量沿坡面增加,坡面开始变得不再平整,径流的紊动作用也开始增加,这样细沟流在向下坡运动过程中要剥蚀新土粒和携带输移土壤颗粒而做功,同时要克服流体内部紊动、混掺,以及坡面逐渐增大的阻力而消耗内能,其具有的能量会在流动过程中损失掉一部分,径流在向下坡流动的过程中势能转化为剥蚀土粒的动能部分减小,在某一坡段这种转化达到最大。细沟流能耗越大,细沟净剥蚀率越大,所以,细沟净剥蚀率会随着坡度和流量的增大而增大,这和图 1 反映出的趋势是一致的。最大净剥蚀率出现的点应该和细沟发育的临界坡长、临界剪切力是对应的,随着坡度和流量的增大,达到临界能耗所需要的坡长缩短。如果进一步分析临界径流能量消耗和最大净剥蚀率的关系,可以找到细沟侵蚀发生存在的临界能量消耗值,并由此推出细沟发育的临界坡长和临界剪切力,此项内容有待进一步研究。

5 结 论

由稀土元素示踪技术结合室内细沟侵蚀模拟冲刷实验确定了不同水动力条件下细沟流剥蚀率。实验结果表明,细沟流净剥蚀率随坡度和流量的增大而增大,随着坡长迅速增大至最大值,然后逐渐减小。最大细沟流净剥蚀率随坡度的增大而增大,流

量对最大细沟流净剥蚀率的影响随坡度的不同而不同,缓坡时影响更为显著。同时最大细沟流净剥蚀率也与坡长有关,随着坡度变陡、流量增大,净剥蚀率达到最大值所需的坡长缩短,这种变化趋势尤其在 20° 和 25° 时更为明显, 15° 时这种变化趋势出现了波动,且波动峰与流量明显相关。从能量转化的角度来看,最大净剥蚀率与细沟流临界能量消耗值是对应的,且临界能耗随着坡度和流量的增大而增大。这种能量的转化和消耗引起的细沟流净剥蚀率随坡度、流量以及坡长的变化,是与细沟的发育过程紧密相连的。临界能量消耗值和最大净剥蚀率的定量关系可望进一步研究,以期找到细沟侵蚀发生的临界坡长。

参 考 文 献

- [1] Lei T W, Nearing M A, Haghighi K, *et al.* Rill erosion and morphological evolution: A simulation model. *Water Resources Research*, 1998, 34(11): 3 157~ 3 168
- [2] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, *et al.* A process based soil erosion model for USDA Water Erosion Prediction Project technology. *Trans. ASAE*, 1989, 32(5): 1 587~ 1 593
- [3] Huang C H, Brandford 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
- [4] 田均良,周佩华,刘普灵,等.土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. *水土保持学报*, 1992, 6(4): 23~ 27
- [5] 石辉,田均良,刘普灵,等.小流域产沙空间分布的模拟试验研究. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 75~ 84
- [6] Zhang X C, Friedrich J M, Nearing M A, *et al.* Potential use of rare earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2001, 65: 1 508~ 1 515
- [7] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, *et al.* Soil detachment rates for sediment loaded flow in rills. *Trans. ASAE*, 2002, 45(6): 1 897~ 1 903
- [8] Lei T W, Zhang Q W, Zhao J, *et al.* A laboratory study of sediment transport capacity in the dynamic process of rill erosion. *Trans. ASAE*, 2001, 44(6): 1 537~ 1 542