

细沟水蚀动态过程的稳定性稀土元素示踪研究

雷廷武^{1,2}, 张晴雯¹, 赵军¹

(1. 中国科学院 水利部 水土保持研究所国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;

2. 中国农业大学 水利与土木工程学院, 北京 100083)

摘要: 本文利用稳定性稀土元素(Rare Earth Element)REE示踪法探讨了坡面水蚀动态过程的试验方法, 根据细沟侵蚀沿坡长的产沙特点, 给出了元素的施放方法、施放深度和浓度的数学表述及计算方法, 并进行了室内细沟侵蚀模拟实验。试验采用3个流量(2、4、8L/min)5种坡度(5°、10°、15°、20°、25°), 3次重复。试验采用8m土槽, 分区段施用10种不同的稀土元素进行示踪, 每个施放区长0.8m, 宽0.1m, 不同坡段根据侵蚀特点采用不同的施放深度。给出了根据收集到的侵蚀土壤样本中不同稀土元素的含量及总的土壤侵蚀量计算坡面不同部位的侵蚀产沙量的方法, 由试验数据计算了不同水动力条件下的土壤侵蚀量沿细沟的分布, 并分析了坡度和流量对坡面侵蚀量随坡长变化的影响。结果表明, REE示踪法可以示踪细沟土壤侵蚀的动态过程, 且可保证一定的精度要求。由示踪方法得到的细沟土壤侵蚀量, 在一定坡度和流量下, 产沙量随着沟长的增加而增加, 但增加的幅度越来越小, 且渐趋于一个稳定值。侵蚀产沙量随着坡度和流量的增加而增加, 但坡度较流量对产沙变化的影响更大。

关键词: 稀土元素; 示踪法; 细沟侵蚀; 动态过程

中图分类号: S157.2 **文献标识码:** A

土壤侵蚀随时间和空间的动态变化数据在开发和验证土壤侵蚀预报模型、理解土壤侵蚀机理、评价泥沙影响、布局最好的控制土壤侵蚀管理措施等方面是非常有用的。WEPP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与模拟程序。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。象WEPP一样, GUEST与EuroSEM模型等也是基于物理过程的模型, 这些模型的基本结构比较相似^[1]。

模型中的公式和田间的实际情况的潜在性差异在于多数侵蚀数据是空间和时间上的积分, 也就是说, 侵蚀方程可以计算沿坡面任意坡段的剥蚀率和泥沙输移, 但得到的田间数据多数是在田间或小区出口处得到的总泥沙输移量。而空间分布侵蚀模型只有通过具有空间分布的泥沙数据来验证^[2]。

为了获得空间分布数据, 已有多种示踪剂被开发和利用。利用较多的是¹³⁷Cs法。¹³⁷Cs与地表物质的紧密结合使其能有效地用于中长期土壤侵蚀示踪等研究中。测定研究区¹³⁷Cs的含量和空间分布, 并与该区¹³⁷Cs沉降背景值比较, 可以建立土壤侵蚀、沉积和¹³⁷Cs含量间的定量关系。由于¹³⁷Cs半衰期长, 适用于计算多年土壤平均净侵蚀和沉积速率。常用的天然放射性示踪核元素包括²¹⁰Pb, ⁷Be, ²²⁶Ra, ²³⁴Th^[3-5]。这些核元素在土壤剖面中具有独特的垂直分布特征和分布深度, 因此可以根据其分布特征应用单一核素或2~3种核素复合示踪泥沙来源。单一核素得到的结果相对比较粗糙, 多核素复合示踪研究泥沙来源的精度比单核素高, 但存在如何校正由泥沙输移分选带来的影响。由于放射性元素的沉降主要集中于表土, 而有些地区由于强

收稿日期: 2003-07-21

基金项目: 中国科学院“引进国外杰出人才基金”项目(982602); 教育部项目(重大01-10)

作者简介: 雷廷武(1958-), 男, 湖北洪湖人, 教授, 博士, 从事土壤侵蚀过程研究与模拟、农业水土科学与工程方面的研究。

烈的侵蚀,表土已侵蚀殆尽,从而限制了其在实际中的应用。

与放射性核素不同,放射性离子因其容易被控制而被用于土壤侵蚀的研究。Woolridge于^[6]1965年将⁵⁶Fe喷洒在土壤表面来跟踪定位,研究土粒的移动。Toth和Alderfer(1960)用⁶⁰Co标记来研究土壤团聚体^[7]。这种方法的缺陷在于此示踪剂的放射性对研究人员和环境都是很危险的。为了克服此缺陷,有研究者采用荧光玻璃球和磁性塑料球来研究土壤侵蚀,但又带来了新的问题。这些示踪物大小面积不同,颗粒密度、形状和表面形状均不同,而且不能与土壤颗粒紧密结合,以致于不能随土粒同时移动,降低了其量化分析的敏感性。

研究土壤侵蚀和泥沙来源的理想示踪剂应克服以上局限性,即能被土壤颗粒强烈吸附,难溶于水,植物富集有限,淋溶迁移不明显,对研究人员和生态环境无害,有较低的土壤背景值,且分析检测灵敏度高。稳定性稀土元素(Rare Earth Elements,简称REE)可以克服上述缺陷,从而在侵蚀过程研究中显示特有的潜在功能。稀土元素—中子活化技术分析应用于土壤侵蚀研究是近十多年来发展起来的新技术。1986年,美国的Knaus^[8]等人首先用稳定性稀土元素示踪和中子活化分析技术,成功地测定了沼泽地的演变。其基本原理为稀土元素在土壤侵蚀研究开辟了新途径。REE包括元素周期表中的21号元素钪(Sc)、39号元素钇(Y)、61号元素钷(Pm)以及镧系La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu等14种元素,由于这些元素的化学与地球化学性质相似且密切伴生,故在地球化学研究中归为一类,通称为稀土元素。稀土元素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的目的性和精确度。仪器中子活化分析(Instrument Neutron Activation Analysis,简称INAA)对大多数稀土元素分析灵敏度高,方法简便,为其应用提供了可靠的保证。REE示踪法是20世纪80年代中后期发展起来的一门新技术,国内学者田均良等人^[9]曾将稀土元素示踪法应用于黄土区侵蚀的垂直分布研究,取得了重要进展,并通过野外全坡长坡面径流小区的试验、观测数据的分析,探讨了稀土元素示踪法对侵蚀泥沙在坡面运移和沉积进行了研究分析。石辉^[10,11]在室内模拟试验表明用多种稀土元素示踪能比较满意地解决小流域侵蚀产沙的空间分布问题,是一种研究小流域泥沙来源的有效方法。已有的室内模拟和野外实验均表明稀土元素示踪法具有较高的精确度和灵敏度,其相对误差均小于15%,可以为土壤侵蚀的量化研究提供可靠的分析手段。Zhang X. C.等^[12]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。

本研究用REE示踪技术探讨坡面细沟流的侵蚀动态变化过程。利用稳定性稀土元素示踪法研究土壤侵蚀分布,其基本原理是将示踪元素化合物与土壤均匀混合后布设于被研究地区的不同地形部位,使之冲刷过程中随径流泥沙一起移动,尔后采集径流泥沙样品,利用中子活化分析方法测定示踪元素的含量,从而判断泥沙的来源及不同地形部位土壤侵蚀的差异。用以确定细沟侵蚀沿坡长的动态分布特征。

1 试验设计

1.1 试验处理 实验方法既是将实际过程进行简化归纳并在一定程度上重现的有效途径,又是进一步进行统计分析及水动力学分析的基础。在简化条件下由实验得到的认识,可结合野外实际观测结果进行分析处理并进行时空上的合理外延。据已有的细沟侵蚀研究可知,细沟侵蚀主要是由短历时暴雨形成水流冲刷产生的,多发生在大于5°的坡耕地上,深多不超过耕层(约20cm),以5~15cm居多。坡面细沟水蚀主要取决于2个典型因子,即降雨状况和下垫面条件。黄土地区属超渗产流区,坡面产流主要取决于雨强(对室内水流冲刷实验而言,其主要影响因子则是径流流量)。在土壤质地和结构一致的情况下,影响下垫面的主要因子是坡度。据此设计细沟侵蚀室内模拟冲刷实验是合理的,可对坡面侵蚀产沙过程的机理进行研究,这种方法既可借助于物理模型来获取机理分析的数据,又可以设计多种边界条件并在较短的时间内重现,便于观测过程。试验共有2个处理:坡度,流量。试验采用5个沟坡:5°、10°、15°、20°、25°;3个

流量：2、4、81/min。每一个处理有3个重复，总试验次数为45次。

1.2 试验水槽 设计的水槽长8m，宽1m，沿宽度方向上每10cm置一隔板，将水槽分隔成宽10cm、长8m的细沟。隔板高33cm，长8m，固定在水槽中。水槽放置在一个坡度可调的平台上，调节平台的坡度即可调节到实验所需要的坡度。

1.3 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(>0.05mm)含量占20.175%，粉粒含量(0.05~0.005mm)占63.9%，黏粒含量(<0.005mm)占15.92%，中值粒径为0.029mm。装填前将土过边长为10mm的筛孔，并测其容重。将土均匀装入水槽，填入土容重控制在 $1.2\text{g}/\text{cm}^3$ 左右，厚度约为20cm。每次试验前将土壤充分饱和，并放置24h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。

1.4 供水和流量控制及试验量测 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。3个水槽流量分别标定。为了使入水管水流均匀注入，在水管出水口采用9cm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。

2 REE示踪元素的用法与用量的计算

2.1 REE示踪元素的选取及坡面布置 用于土壤侵蚀研究的示踪元素，应具有和土壤有较好的结合能力、不溶于水、不易被植物吸收及不损害生态环境等特征。此外，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(铽)，Dy(镝)，Sm(钐)，La(镧)，Tm(铥)，Ce(铈)，Nd(钕)10种稀土元素，相应的元素氧化物分别为 Ho_2O_3 ， Tb_4O_7 ， Eu_2O_3 ， Yb_2O_3 ， Dy_2O_3 ， Sm_2O_3 ， La_2O_3 ， Tm_2O_3 ， CeO_2 ， Nd_2O_3 。为了在测量显著的情况下节约成本，一般相对侵蚀量大的部位，适合布设背景值大但价格低的元素。

试验采用8m长水槽，水槽分隔成 $0.1\text{m} \times 8\text{m}$ 的细沟，再将每条细沟分成10等份，分段分别使用上述10种元素进行示踪。每个区段长0.8m，宽0.1m，深Hm(后文讨论)。自上坡到下坡的顺序将各区段编上从小到大标号：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：即在放水情况下(上坡侵蚀量大)，将具有较小背景值的元素施放在下坡。各元素施放位置见表1。

2.2 施放深度及浓度 施放深度应大于可能土壤侵蚀深度。设细沟集中流时，设坡上侵蚀深度为20cm，坡下侵蚀深度0.5cm。由已有的研究知，细沟侵蚀土壤剥蚀率随坡长(近似地)呈指数递减^[13]，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。同时考虑到实验操作方便，设计了不同示踪元素的施放深度，见表2。

表1 各元素物理性质、背景值及其在坡面的施放位置

序号	符号	熔点	沸点	原子量	分子式	背景值ppm	分子量
1	Nd	1024 ± 5	3180	144.2	Nd ₂ O ₃	36	336.4
2	Ce	804 ± 5	2930	140.12	CeO ₂	60	172.1
3	Tm	1500 ~ 1600	2130	168.93	Tm ₂ O ₃	2.4	385.87
4	La	920 ± 5	4230	138.905	La ₂ O ₃	32	305.8
5	Sm	1052 ± 5	1630	150.4	Sm ₂ O ₃	6	348.8
6	Dy	1485 ± 20	2330	162.5	Dy ₂ O ₃	4.8	373.0
7	Yb	824 ± 5	1530	173	Yb ₂ O ₃	2.64	394.0
8	Eu	826 ± 10	1490	151.96	Eu ₂ O ₃	1.2	351.9
9	Tb	1336	2530	158.925	Tb ₄ O ₇	0.81	747.7
10	Ho	1490	2330	164.93	Ho ₂ O ₃	1.2	377.9

注：编号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。

表2 设计施放深度及浓度

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
施放深度/cm	20	15	15	15	10	10	5	5	5	5
施放浓度/ppm	149	930.7	35.97	927.53	231.88	371	255	115.94	78.26	53.89
放大倍数	80	38.2	26.4	18.3	12.6	8.74	6.04	4.18	2.89	2

REE的施放浓度讨论如下。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, ..., 10)。基本施放浓度是使得在总的土壤侵蚀量中某种元素的含量达到相应背景值的2倍以上。施放的第i种REE在总的侵蚀土壤中的浓度c_i，可根据其施放浓度C_i计算为

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

式中: M_i为侵蚀土壤中第i种元素的质量；w_i为第相应于第i种REE元素坡段的侵蚀土壤的权重。C_i^o为第i种元素的背景值。按照上述讨论，c_i应相对背景值提高2倍以上，或应大于或等于3倍的背景值，即

$$\frac{c_i}{C_i^o} = \frac{(w_i C_i + C_i^o)}{C_i^o} = 1 + \frac{w_i C_i}{C_i^o} \geq 3 \quad (2)$$

或

$$\frac{w_i C_i}{C_i^o} \geq 2 \quad (3)$$

从而施放倍数为

$$\frac{C_i}{C_i^o} \geq \frac{2}{w_i} \quad (4)$$

取

$$C_i = \frac{\sigma_i}{w_i} C_i^o \quad (i = 1, 2) \quad (5)$$

σ_i 是施放倍数，即REE施放浓度与其背景值的比值。从而第*i*种元素的施放量 A_i 为

$$A_i = W_i C_i = W_i \frac{\sigma_i}{w_i} C_i^o = \sigma_i W C_i^o \quad (6)$$

根据上述讨论算出的元素施放浓度和相对于背景值的放大倍数如表2所示。

2.3 示踪土样的配制 根据上述计算的某一示踪元素的施放深度求得土壤质量(kg)，由施放量和元素的氧化物分子式/分子量可以配制示踪元素/混合土样。称取某元素氧化物用量的1/10并与5g的烘干土混合，用碾钵充分碾磨使之尽可能混合均匀。将由此配制的高浓度示踪土样逐步进行稀释，配足所需示踪土样。将10种元素按不同倍数稀释，La和Ce配成稀释倍数为2.5%，其余元素的稀释倍数为1.25%的浓缩土样，即La和Ce的配制浓度为25000ppm，其余元素为12500ppm。以上方案既考虑最大显著性(0.75倍REE背景值)又不使某些元素剩余太多。考虑到实验填土操作的方便性和准确性，对施放深度做了调整。土样按试验的坡度分5次配制，每次为3个流量的3个重复(共9条细沟)统一配制，每次配土见表3。

表3 各元素的(纯)用量

坡段编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
REE	Nd	Ce	Tm	La	Sm	Dy	Yb	Eu	Tb	Ho
浓缩土样/kg	1.47	4.6	0.357	3.07	1.53	1.228	0.844	0.3839	0.2592	0.3569
施放土样/kg	124.2	124.2	82.8	82.8	82.8	41.4	41.4	41.4	41.4	82.8

3 计算方法

3.1 样品采集和土壤侵蚀量的计算 每一坡度取样如下：每个样品取5g干土样，以备中子活化分析，确定准确的REE浓度。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，计3×10=30个样，以确定真实施放浓度。9条细沟每条取侵蚀土样3个，共9×3=27，用于确定沿细沟沟长的土壤侵蚀量，即土壤侵蚀在空间上的分布。5个坡度的所有试验的总样本量为：(30+27)×5=285个。(未混入REE的)试验土取样3个，以确定土壤的各种REE背景值。如此，总样品达288个。

每次试验完成后，收集汇流槽中全部径流泥沙，测量总的土壤侵蚀量和侵蚀泥沙中不同稀土元素的浓度 C_i ($i=1, 2, \dots, 10$)。用此浓度值剔除该元素背景值后乘以全部侵蚀泥沙质量，得到某施放区REE的纯元素侵蚀量 e_i 。

$$e_i = (c_i - C_i^o)W \quad (8)$$

对应第*i* 元素施放段的侵蚀量为*W_i*，则下式成立

$$e_i = W_i C_i \quad (9)$$

式(9)的意义为：从侵蚀泥沙中收集到的所施放的第*i* 种REE元素的量值(*e_i*)，与第*i* 段中失去的该种元素的量(*W_iC_i*)相等。由式(9)可得

$$W_i = \frac{e_i}{C_i} \quad (10)$$

式(10)说明，用第*i* 种REE元素的(扣除背景值以外的)元素侵蚀量除以相应区段该REE元素的施放浓度，就可得到此段的土壤侵蚀量。结合式(8)、(10)得到

$$W_i = \frac{(c_i - C_i^o)}{C_i} W \quad (11)$$

即第*i* 种元素所在区段的土壤侵蚀量*W_i*等于此元素在总土壤侵蚀量*W*中浓度增量相对于施放浓度的百分数与总土壤侵蚀量*W*的乘积。

3.2 含沙量的计算 设试验时段为 *T* 流量为恒定，产沙量在该时段内不随时间变化，对应于第*i* 种REE的第*i* 区段所产泥沙的含量在总径流量中的含量为 *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

$$W_i = \int_0^{\Delta T} \lambda_i q dt = \lambda_i q \Delta T \quad (12)$$

或

$$\lambda_i = \frac{W_i}{q \Delta T} \quad (13)$$

自坡上开始(第1区段)到坡下，第*j* 段末水流中的含沙量随坡长的变化为 *θ_j*

$$\theta_j = \sum_{i=1}^{i \leq j} \lambda_i = \frac{1}{q \Delta T} \sum_{i=1}^{i \leq j} W_i \quad (j=1, 2, \dots, 10) \quad (14)$$

4 结果与讨论

4.1 不同水动力条件下细沟侵蚀产沙分布 采用上述计算公式，用试验数据计算得到了不同坡度和流量下，细沟侵蚀过程沿细沟分布的动态产沙特点(见图1所示)。由图1可见，不同坡度下产沙量在给定流量时随沟长的变化具有相似的趋势：一定坡度和流量下，细沟流顺坡运动，在距离坡顶很近时，产沙量增加很快，但随着距坡顶距离的增加，其增加的幅度也越来越小，水流中的含沙量有趋于定值的趋势。且坡

度越大，这种趋于稳定的趋势越快；同样同一坡度下，流量越大，这种趋于稳定的趋势也越快。

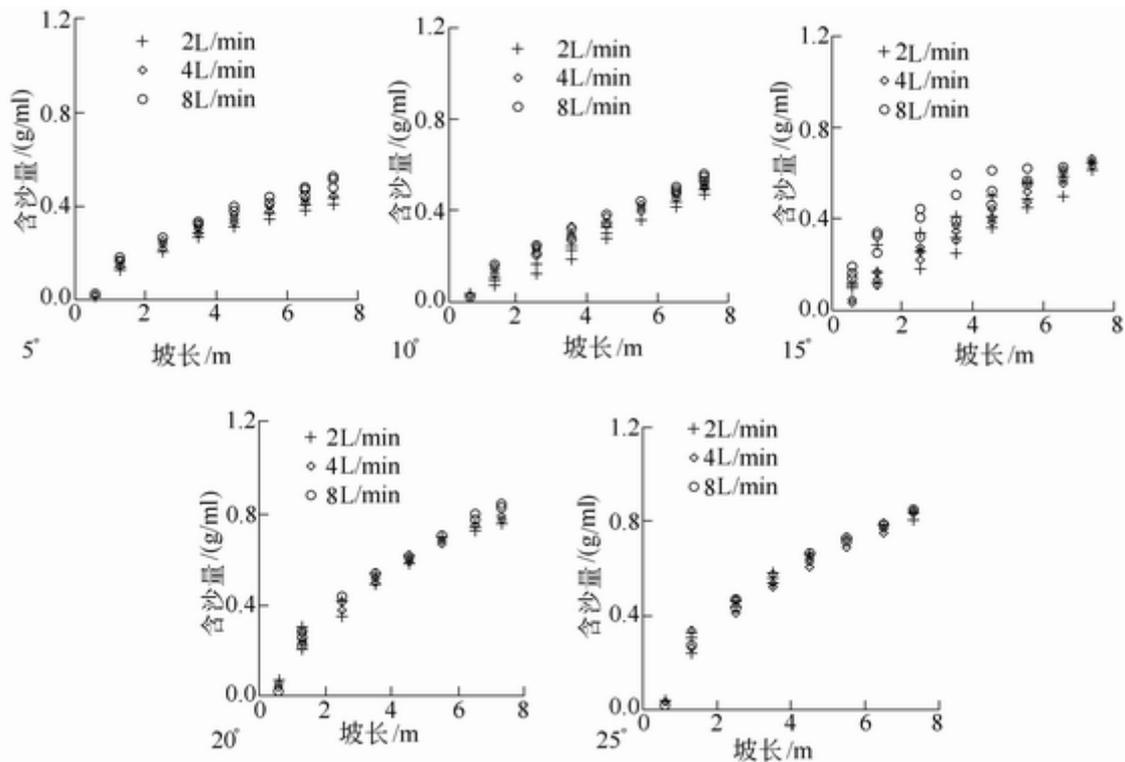


图1 REE示踪法估算的产沙量沿沟长的分布

细沟侵蚀过程是细沟流在顺坡流动过程中，径流冲刷过程和坡面抗蚀作用以及下垫面物质补给能力之间消涨变化及对比协调的结果。细沟流的冲刷能力决定于径流本身所具有的能量及含沙量。坡面细沟流向坡下运动时，由于水流在流动过程中要克服冲刷、携带输移土壤颗粒，其具有的能量就不可能完全用来剥蚀新的土粒，这样随着细沟流顺坡向下运动，新增加到径流内的泥沙会减少。同时，由于流体内部紊动、混掺消耗内能等而做功，其具有的能量会在流动过程中损失一部分。在一定的坡度和流量时，细沟流所具有的能量是一定的，随着径流向下坡的运动，新土壤物质的补给，径流所携带的泥沙会逐渐达到一个饱和状态，即如试验结果所显示的一样，含沙量随破长的增加而增加，但逐渐趋于稳定。

由不同坡度下的侵蚀产沙量分布可以看出，坡度和流量是影响侵蚀产沙量的主要因素。坡度较流量对产沙量的影响要大。不同坡度时产沙量不同，产沙量随坡度的增加而增加。在同一坡度下，流量不同产沙量也不同，产沙量随流量的增加而增加。

坡面上结合紧密的土壤颗粒由静止到起动再最终被径流输移主要经历如下2个阶段：通过径流产生沿坡面的剪切应力使土粒之间的黏结力破坏，使土粒由有序变为疏散；然后克服土粒和土粒之间或土粒和地表之间的摩擦力使土粒起动。土壤颗粒从土壤母质被剥蚀、移动的过程是由侵蚀动力引起的。土壤剥蚀是细沟中泥沙的主要来源，坡面上侵蚀量大的地方，土壤剥蚀总是很活跃。剥蚀率被定义为单位时间(s)单位面积(m²)被剥蚀掉的土壤的量(kg)^[14, 15]。当水流剪切力大于土壤临界剪切力时土壤颗粒被剥蚀，可能的土壤剥蚀率从概念上可表达为： $D_r = k(\tau - \tau_c)$ ，式中K为细沟可蚀性参数，(1/s)； τ 为水流剪切应力，(N/m²)； τ_c 为土壤临界抗剪切应力，(N/m²)。坡面上土粒的剥蚀与细沟可蚀性参数K和土壤临界抗剪切应力 τ_c 有关，而这受制于土壤本身的性质，如土壤颗粒之间的黏结力、土壤的固结能力和土壤含水量等物理性质，以及

泥沙颗粒本身的运动特性。同时剥蚀率的大小受制于土壤临界抗剪切应力 τ_c 和细沟流的剪切力的对比关系。只有当水流作用的剪切力大于土壤临界抗剪切应力 τ_c 时, 土粒之间的黏结力才可能遭到破坏进入起动状态。对同一种试验土壤, 土壤的物理性质是基本一致的。也就是说对同一种试验土壤而言, 剥蚀率的大

小取决于径流剪切力的大小。据根据水流连续理论和水流动力学原理^[16], 水流的剪切应力为: $\tau = \rho g h_w \sin \theta$, 也就是说径流剪切力由径流深度和坡度决定的。对同一种试验土壤, 在相对距坡顶一样的沟坡长度, 径流剪切力随着坡度和流量的增加而增加, 径流中携带的由剪切破坏而补给的土粒就会增加, 相应含沙量就会增加。坡度和流量愈大, 剪切力愈大, 细沟流剥蚀的土粒就多, 含沙量增加的就愈快。

4.2 测定精度 测量精度采用由REE测得的侵蚀量与实际的侵蚀量间的相对误差表示, 其计算公式如下

$$\delta = \left(\sum_{i=1}^n w_i / W - 1 \right) \times 100\% \quad (15)$$

式中: δ (%) 为试验相对误差; n 为细沟划分的区段数或REE施放的种数。计算的误差列入表4。

由表4看出, 不同水动力条件下REE示踪法计算侵蚀量的试验误差均小于15%, 试验精度是令人满意的。

将由稀土元素示踪法计算得到的细沟含沙量随坡长的变化与由传统方法计算得到的相应的值进行了比较, 结果见图2。

图2表明由REE示踪法计算得到的值和由传统方法计算得到的相应的值有很好的相关性。图中实线为 1:1 斜线, 数据点越靠近此实线说明两者的相关性越好, 相关分析得到的确定系数 R^2 分别为 5° , 0.89; 10° , 0.91; 15° , 0.90; 20° , 0.91; 25° , 0.91。

5 结论

本研究采用多种稀土元素示踪细沟水蚀动态过程。给出了元素的施放方法、施放深度。推导了确定了元素施放浓度的计算方法。详细讨论了通过分析泥沙样品中各种稀土元素的含量和总土壤侵蚀量计算各坡段土壤侵蚀量的方法。由REE示踪的试验数据并采用本文提出的计算方法计算得到的结果显示, 细沟侵蚀产沙量随细沟长度的增长而增加, 但增加的幅度越来越小, 且渐进一个稳定值。含沙量随沟长的变化受流量的影响较小, 而受坡度的影响较大。分析了REE示踪土壤侵蚀的精度, 结果表明这种方法具有较好的试验精度和它特有的灵活性和实用性, 这对检验可反映坡面泥沙来源时空变化的土壤侵蚀预报模型是非常有用的。

表4 不同水动力条件下REE示踪法计算侵蚀量的试验误差

坡度	流量/(L/min)	1	2	3
5°	2	11.7	10.6	10.6
	4	4.1	12.9	3.3
	8	7.6	13.2	10.7
10°	2	8.8	5.2	3
	4	10	14.6	11.8
	8	9	5.1	11.8
15°	2	14.9	13.5	14.8
	4	2.6	14.9	7.9
	8	8.9	14.4	3.7
20°	2	4.7	2.5	7.9
	4	6.1	3.4	13.8
	8	3.2	16.6	4.7
25°	2	12.4	14.2	12.2
	4	4.6	2.9	11.8
	8	14.4	14.7	14.3

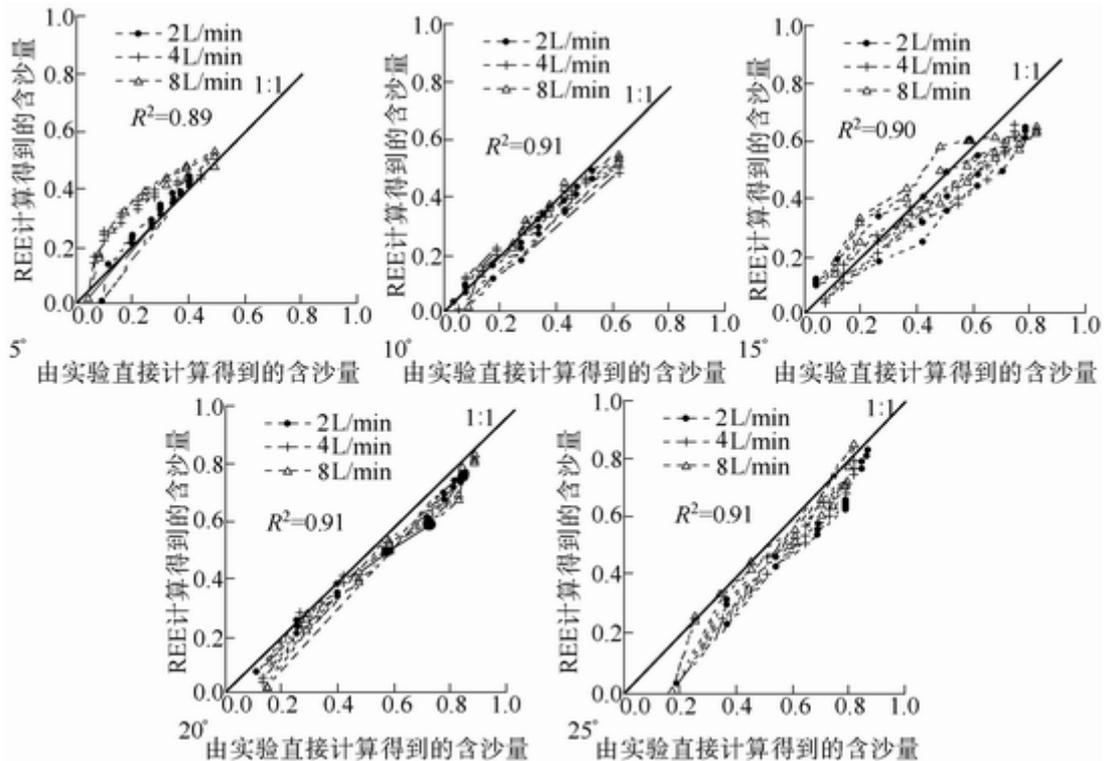


图2 REE示踪法确定的含沙量与试验确定值对比

参考文献：

- [1] Nearing M A, Foster G R, Lane L J, Finkner S C. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology[J]. Trans. ASAE, 1989, 32(5): 1587-1593.
- [2] Huang C H, Brandford J M, Laflen J M. Evaluation of the detachment-transport coupling concept in the WEPP rill erosion equation[J]. SSSA J. 1996, 60: 734-739.
- [3] Riebe B. Monitoring the translocation soil particals using a neutron activated tracer[M]. K.H. Hartge and B.A. Stewart(ed.) Soil structure: Its development and function. CRC Press, Boca Raton, FL, 1995.
- [4] Ritchie J C, Mhenry J R. Application of radioactive fallout Cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A reviw[J]. J. Environ. Qual. 1990, 19: 215-233.
- [5] Walling D E. Improved models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements[J]. J. Environ. Qual. 1999, 28: 611-622.
- [6] Wooldridge D D. Tracing soil particles movement with fluorescent glass particles[J]. Soil Sci. Am. 1965, 32: 469-472.
- [7] Toth S J, Alderfer R B. A procedure for tagging water stable soil aggregates with Co-60[J]. Soil Sci., 1960, 89: 36-37.
- [8] Knaus R M. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland: II. A new soil horizon maker method

for measuring recent accretion[J]. Estuaries, 1989, 12(4): 269-274.

[9] 田均良, 周佩华, 刘普灵, 吴普特, 郑世清, 李雅琦, 武春龙. 土壤侵蚀REE示踪法研究初报[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 23-27.

[10] 石辉, 田均良, 刘普灵. 利用REE示踪法研究小流域泥沙来源[J]. 中国科学E辑, 1996, 26(5): 474-480.

[11] 石辉, 田均良, 刘普灵, 周佩华. 小流域侵蚀产沙空间分布的模拟试验研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 75-84.

[12] Zhang X C, Friedrich J M, Nearing M A, Norton L D. Potential use of Rare Earth Oxides as Tracers for Soil Erosion and Aggregation Studies[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 2001, 65: 1508-1515.

[13] 雷廷武, 张晴雯, 赵军. 陡坡细沟含沙水流剥蚀率的试验研究及其计算方法[J]. 农业工程学报, 2001, 17(3): 24-27.

[14] Nearing M A, Norton L D, Larionov D A. Hydraulics and erosion in eroding rills[J]. Water Resources Research, 1997, 33(4): 865-876.

[15] Nearing M A, Parker S C. Detachment of soil by flowing water under turbulent and laminar conditions[J]. Soil Sci. Soc. Am. J. 1994, 58: 1612-1614.

[16] Foster G R, Huggins L F, Meyer L P A. Laboratory study of rill hydraulics: II. Shear stress relationship[J]. Trans of ASAE, 1984, 797-804.

Study on dynamic tracing of rill erosion process with rare earth element tracer

LEI Ting-wu^{1,2}, ZHANG Qing-wen¹, ZHAO Jun¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Yangling 712100, China; 2. China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The method for tracing of rill erosion process by means of rare earth element (REE) tracer was developed. In accordance with the sediment detachment along a rill, the application method, optimal application depth and suitable concentration of REE were investigated and the computational formula for application dosage of REE was given. Laboratory rill simulation experiments were conducted. The method for determining the sediment yield at different locations of slope according to the REE concentration of eroded soil and the total amount of erosion was established. The distributions of eroded amounts along the rills were calculated from the experimental data and the effects of slope length and flow rate on erosion amount were analyzed. It is found that the proposed REE tracing method can be used to trace the whole formation process of erosion with enough accuracy. The experimental result shows the sediment concentration increases with rill length and tends to a stable amount. The sediment yield increases with the increase of slope gradient and flow rate. But the slope gradient has greater influence on sediment yield than flow rate.

Key words: rare earth element (REE); tracer; rill erosion; dynamic process; sediment yield