

# 侵蚀泥沙坡面沉积研究初报

田 均 良

(中国科学院 水土保持研究所 陕西杨陵 712100)  
水 利 部

**摘 要** 利用元素示踪法的优点,对坡面侵蚀土体的颗粒在坡面上的运移、沉积状况进行了研究。通过对野外全坡面径流小区的试验、观测数据的分析,讨论了侵蚀泥沙在坡面沉积的分布特征及其影响因素,探讨了沉积对利用示踪法研究土壤侵蚀空间分布的影响程度。研究结果表明稀土元素示踪方法在坡面、沟道侵蚀泥沙的沉积研究中可望有广泛的应用前景。

**关键词** 侵蚀 泥沙 沉积

## A Primary Report for a Study on Deposition of Erosion Sediments on Slope

*Tian Junliang*

(*Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences  
and Ministry of Water Resources Yangling Shaanxi 712100*)

**Abstract** By means of the advantages of element tracing method, the movement and deposition of erosion soil particles on slope are studied in this research work. Based on analyses of the data from field experiments with a whole slope length plot, the character of sediment deposition distribution on the slope and its influencing factors are discussed in the paper. The influencing levels of sediment deposition to study soil erosion spatial distribution by using the tracer method is also discussed. The results have demonstrated that the application of REE tracer method for studying deposition of erosion sediments from slope and gully is respected to have a broad future.

**Key words** erosion sediments deposition

在土壤侵蚀过程中,泥沙的运移和沉积状况是研究者所普遍关心的问题。通过观测和估算,人们已对沟道至河流的泥沙输移比作了不少研究。但迄今为止,对土体在坡面侵蚀中的沉积状况却了解甚微,这在一定程度上限制了坡面土壤侵蚀机理研究乃至坡面土壤侵蚀预测预报的研究深入。本研究首次利用稀土元素(REE)示踪法,对侵蚀泥沙在坡面上的运移、沉积进行了研究分析,获得了坡面侵蚀泥沙运移过程中的沉积资料,为土壤侵蚀泥沙沉积开辟了量化研究的新径。

## 1 采样与分析数据处理

使用安塞全坡长径流小区,在小区中布设了6条REE示踪带。试验小区每次发生径流产沙后,利用环刀沿坡面REE示踪带的上下5m的横向带上,依次定容采样。样品风干后利用中子活化分析法<sup>[1]</sup>,测定样品中的示踪元素浓度。在1991~1995年对模拟试验和野外全坡长小区进行了连续采样。由于黄土地区土壤(特别是本试验小区的黄绵土),元素含量均一<sup>[2]</sup>,沿坡面水平和剖面垂直方向REE含量分异系数很小(一般均小于0.05),且INAA对REE又有很高的分析精度,因此,坡面土壤中元素含量相对于背景值的显著升高,只能是由于标记土体在坡面因外因作用而形成的土体颗粒运移中再分布所引起的。因试验小区用铁丝网封闭,人类活动相对较小,土壤侵蚀泥沙在坡面运移过程中沉积可视为是形成土体在坡面上再分布的主要因素。分析坡面不同部位土壤中示踪元素含量的净增幅度及分布,即可了解泥沙沉积的基本特征。

由于坡面样品采集定容采样,采样环刀的大小为 $h=5\text{cm}$ , $d=5\text{cm}$ ,则通过不甚复杂的数学推导,泥沙在坡面采样点上的单位面积沉积量 $SW_{ij}$ 可通过式(1)计算。

$$SW_{ij} = 10k \cdot h \cdot \rho \cdot \frac{C_{ij}}{C_{di}} (\text{kg/m}^2) \quad i = 1, 2, \dots, 6 \quad (1)$$

$$j = 1, 2, \dots, n$$

式中: $SW_{ij}$ ——来自第 $i$ 个示踪带所代表的侵蚀区的泥沙沿坡面运移中,沉积于采样点 $j$ 处的单位面积的重量( $\text{kg/m}^2$ ); $h$ ——采样用环刀高度; $\rho$ ——采样点土壤容重; $C_{ij}$ ——第 $i$ 个示踪元素在采样点 $j$ 处的含量增加量( $\text{mg/kg}$ ); $C_{di}$ ——示踪元素 $i$ 的施加浓度(第 $i$ 示踪带); $i$ ——示踪元素(带)的序号; $k$ ——示踪条带所代表的侵蚀区面积系数。

## 2 结果与讨论

### 2.1 侵蚀泥沙在坡面沉积的分布特征

在4年的连续试验中,大多数次降雨侵蚀中,坡面上部(La, Ce示踪区)侵蚀泥沙在坡面上的沉积不同程度上均有所表现,而坡面中下部的侵蚀泥沙在坡面上的沉积发生的频数和强度均较上部低一些。图1显示了在相同距离内,来自坡面不同部位的泥沙在坡面上可观测到发生沉积的样品频数的上述差异,这种现象与侵蚀的种类和坡面径流特征相符合。在坡面上部以面蚀和轻微细沟侵蚀为主,汇流现象也不明显,径流的汇流水面相对较小,这一方面使其侵蚀量较小,但另一方面径流搬运泥沙的运载力也较弱,在全坡面的运移过程中距离又长,泥沙的沉积现象也自然相对显著。反之,在坡面中下部位,由于汇流作用,细沟、浅沟侵蚀较多,径流多集中在细沟浅沟的局部有限面积内,流量大,运载力强,且上部来的径流泥沙具有更大的动能,致使这些部位侵蚀泥沙在坡面的运移过程中,沉积作用相对变得较弱。

图2以几次降雨侵蚀的泥沙坡面沉积分布为例,显示了上述特征。由图2可看出,侵蚀泥沙的沉积主要沿径流方向,发生在邻近的径流区内,随着距离的增加,沉积量急剧减少。若暂不考虑降雨特征,以每次降雨坡面沉积量与径流距离的实测数据进行单因子选优回归分析,则可获得下列回归方程式:

$$Y = ax^b \quad (2)$$

式中: $Y$ ——在距某一示踪带距离 $X$ 的坡面沉积区域内来自该示踪带的侵蚀泥沙的沉积量

(kg/m<sup>2</sup>); X —— 沉积区与泥沙源区的距离(m); *a, b* 为回归系数。

表 1 以 1992~1995 年几次降雨为例列出第 1、2 示踪区(La、Ce)的侵蚀泥沙沉积量与搬运距离的回归分析结果。

由表 1 可以看出, 在 3 年的降雨侵蚀中, 侵蚀泥沙在坡面上的沉积量分布大都显著地呈现为式(2)分布模式。对本项目第 1、第 2 示踪带(La、Ce 带)土壤侵蚀在坡面的分布分别可用下式描述:

$$y = 94.49x^{-1.3135} \quad (\text{La 带侵蚀泥沙})$$
$$y = 77.54x^{-0.9641} \quad (\text{Ce 带侵蚀泥沙})$$

(4)

上两式也表明了 La、Ce 两带的侵蚀泥沙沉积随其运移距离的变化关系基本相似。

表 1 示踪带侵蚀泥沙沉积量与运移距离回归分析

降雨日期	历时 (min)	雨量 (mm)	平均雨强 (mm/min)	泥沙量 (kg)	<i>a</i>	<i>b</i>	相关系数	相关水平 ( $\alpha$ )
La 示踪带								
1992-07-09	50	10.5	0.21	166.8	1.56	-0.37	-0.3228	<0.5
1993-07-10	90	27.4	0.30	3025	155.9	-1.892	-0.7252	<0.05
1993-07-26	43	10.8	0.25	2154	83.7	-1.659	-0.7712	<0.01
1993-08-03	—	80.7	—	6347	17.46	-1.051	-0.5553	<0.1
1994-07-19	30	10.7	0.36	249	93.05	-1.5309	-0.8601	<0.001
1994-07-07	141	24.0	0.17	413	21.76	-1.1275	-0.7239	<0.01
1995-06-01	—	12.6	—	113	92.48	-1.404	-0.8396	<0.001
1994-08-03	133	8.5	0.06	158	87.94	-1.422	-0.8527	<0.001
1994-08-05	202	20.1	0.10	558	212.0	-1.6199	-0.8697	<0.001
1994-08-10	500	39.5	0.09	485	317.3	-1.7364	-0.9251	<0.001
1995-07-14	25	28.1	1.12	—	21.66	-0.9442	-0.4736	<0.5
1995-08-05	590	42.6	0.07	875	29.39	-1.005	-0.6307	<0.05
平均				94.49±89.75	-1.3135±0.4102			
Ce 示踪带								
1995-06-01					50.98	-1.0585	-0.9371	<0.001
1994-08-10					65.71	-0.8859	-0.9189	<0.001
1994-08-05					4.570	-0.1737	-0.3507	<0.5
1994-08-03					11.23	-0.4660	-0.4922	<0.5
1994-07-19					51.20	-1.3031	-0.5191	<0.5
1994-07-07					66.54	-1.1837	-0.8603	<0.01
1994-07-02	270	8.8	0.03	—	43.00	-1.1579	-0.6582	<0.1
1993-08-03					401.1	-1.8160	-0.6862	<0.1
1993-07-26					3.594	-0.6322	-0.7512	<0.1
平均				77.54±117	-0.9641±0.4621			

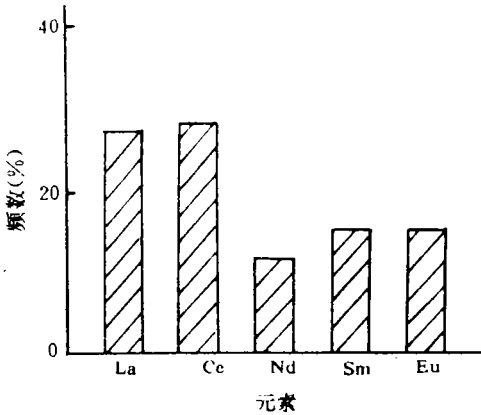
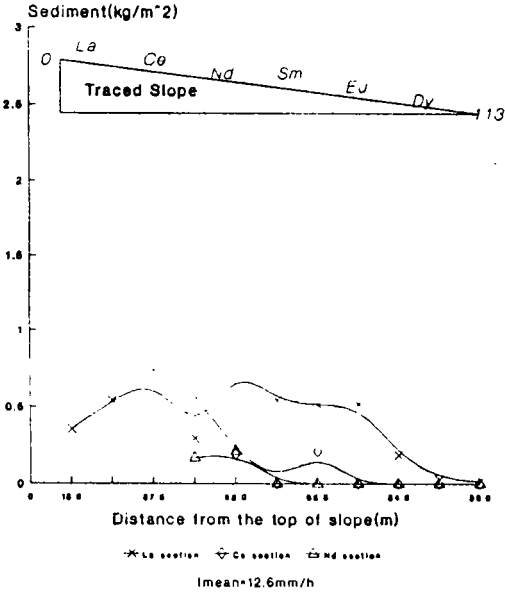


图 1 在相同距离内不同部位侵蚀泥沙可观测到的沉积样品发生频数

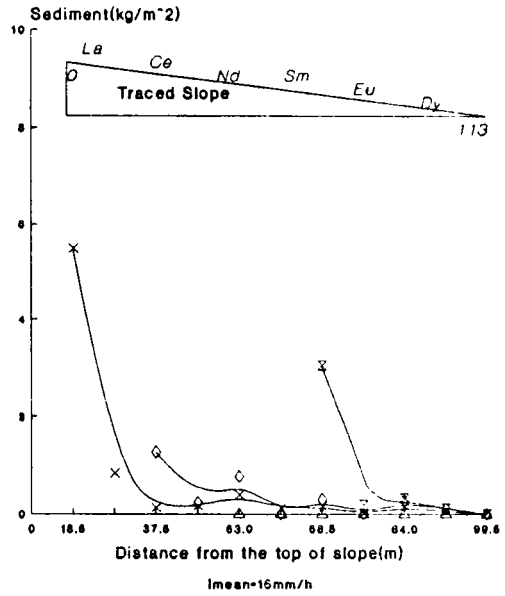
2.2 不同降雨特征对泥沙坡面沉积的影响

分析结果表明, 坡面的侵蚀泥沙量与降雨径流历时直接相关。对 La 带每次降雨侵蚀泥沙沉积回归方程中的 *a* 值与降雨历时进行回归分析, 则直接可得到:

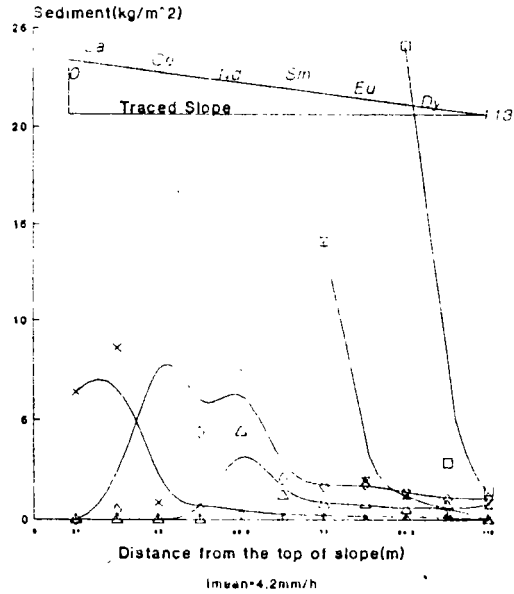
SEDIMENT DEPOSITION ON THE PLOT  
(1992.7.9 total erosion amount 168.8kg)  
rainfall 10.5mm)



SEDIMENT DEPOSITION ON THE PLOT  
(1993.7.26 total erosion amount 2154kg  
rainfall 10.8mm)



SEDIMENT DISTRIBUTION ON THE SLOPE  
(1994.8.10 total erosion amount 485.6kg  
rainfall 39.6mm/h)



SEDIMENT DISTRIBUTION ON THE SLOPE  
(1995.8.1 total erosion amount 113kg  
rainfall 12.6mm)

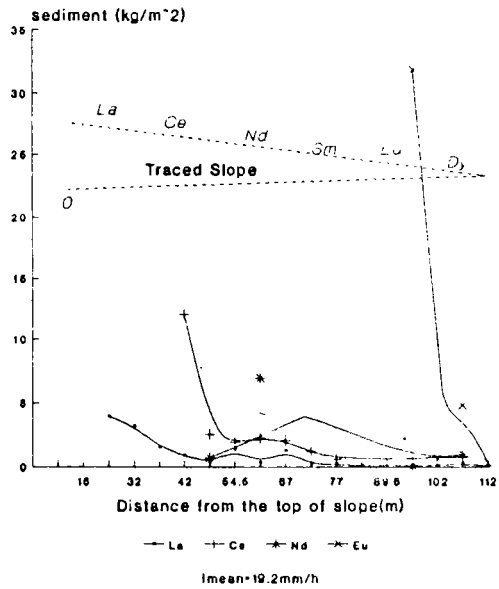


图 2 不同部位侵蚀泥沙的坡面沉积分布

$$A = 32.74 + 0.5765t$$

$$r = 0.8398$$

(5)

式中： $A$ —— $a$  值， $t$ ——降雨历时，其中回归相关系数达 0.839 8，二者呈显著正相关( $\alpha < 0.05$ )。该式表明，降雨历时直接影响(2)式中的  $a$  值，从而显著地影响了沉积量，降雨径流时间愈长，坡面上的泥沙沉积量愈显著。

用同样的方法，分别对表 1 中的  $a$ 、 $b$  值和降雨强度、雨量进行回归分析，相关程度均不显著，且趋势不十分确定，不同降雨特性对坡面沉积的影响尚待于进一步深入研究。

2.3 坡面总侵蚀量和产沙量的比例估算

为了便于描述坡面侵蚀对小流域泥沙的贡献，我们这里用总侵蚀量定义为由次降雨而引起在坡面上移动的土体的总重量，而产沙量则仅指搬运出坡面小区的侵蚀泥沙的重量。

由前面的讨论可知，小区的侵蚀泥沙沉积多来自于坡面上中部的侵蚀区的泥沙。为此，我们用第 1(La)、第 2(Ce)示踪带侵蚀泥沙在坡面上的沉积总量进行讨论。

这两个带沉积总量用对(2)式进行积分求得：

$$Y = \int_{x_1}^{x_2} ax^b dx = a \frac{x^{(b+1)}}{b+1} \Big|_{x_1}^{x_2}$$

(6)

式中： $x_1$ 、 $x_2$ ——距示踪带 1m 和示踪带到小区下沿的距离，La 带取 1.96，Ce 带取 1.75。表 2 列出了利用上式对第 1、第 2 带几次降雨中的沉积量估算。

在计算次降雨沉积量时，需考虑上次降雨沉积对背景值的影响，由于坡面侵蚀以细沟侵蚀为主，故采集的坡面沉积样示踪元素的含量可受两次沉积的叠加的影响。为此，在表 2 的数据中已对上述问题进行了扣除处理。另一个问题是沉积在坡面上的变化不一定是理想的连续状况，用积分的方法计算则均视为连续分布。这样算得的结果可能要比实际量要大。故表 4~7 也只能视为坡面沉积量的粗略估算。

表 2 第 1、第 2 示踪带侵蚀泥沙在坡面上的沉积总量

降雨 日期	降雨 历时	雨量 (mm)	产沙总量 (kg)	A	B	C	A+B/C
				La 带沉积量 (kg)	Ce 带沉积量 (kg)	侵蚀总量 (kg)	
1993-07-26	43	10.8	2154	171	38.0	2363	8.84
1993-08-03	—	80.7	6347	71	47.6	6466	1.83
1994-07-07	141	24	413	4	150	567	27.2
1994-07-19	30	10.7	249	85	0	334	25.4
1994-08-03	133	8.5	158	18	67	243	34.9
1994-08-05	202	20.1	558	143	0	701	20.4
1994-08-10	500	39.5	485	94	177	756	35.8

由表 2 可以看出，在 1993 年的两次降雨中，两个侵蚀区位的泥沙沉积小于总侵蚀量的 10%，这两次产沙量均较高，而降雨历时均较短，雨强较大，大部分泥沙均运移出了小区。

1994 年的几次连续降雨则可能由于历时长，降雨雨强小，从而侵蚀力弱，使沉积量超过了总侵蚀量的 20% 以上。

可见，不同的降雨特征，是影响坡面(小流域)产沙量的重要影响因素。短历时高雨强的次降雨引起的坡面产沙在水土流失防治中应予以特别重视。

2.4 坡面沉积对利用 REE 示踪法研究坡面侵蚀垂直分布的影响

前面已提及，前一次降雨侵蚀在坡面上的沉积对计算次降雨坡面沉积量的影响问题。同时，由于存在沉积问题，使利用示踪带的原示踪元素浓度计算坡面不同部位的侵蚀量也受到一

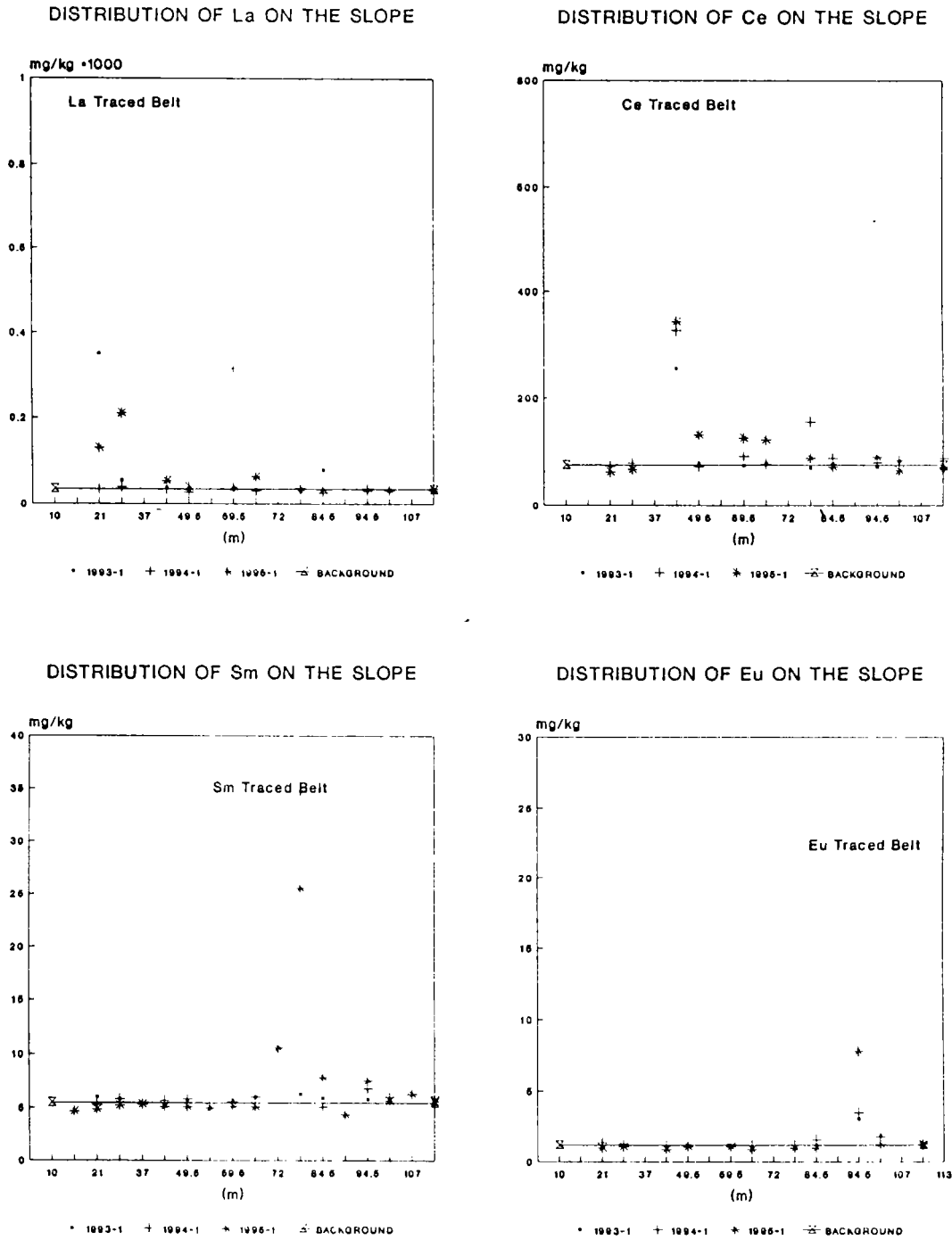


图 3 沉积样品元素含量分布图

定的影响。本节利用观测的数据对这种影响的程度进行初步分析。

由表 3 和图 3 可看出,检测到的沉积样品示踪元素含量的最大值与示踪带元素浓度的比值,在坡面的上部均小于 1%,而在中下部也不超过 1.5%。在我们计算不同部位泥沙侵蚀量时,采用示踪带元素浓度,故上次降雨坡面上沉积泥沙中示踪元素含量对坡面侵蚀分布的计算结果的影响相对有限,不对估算结果产生显著影响。另外,由图 3 也可以看出,示踪元素含量高的沉积样均发生在离示踪带 5m 左右的范围之内。在更远的距离沉积样元素含量陡减。因此,大部分区域内,沉积引起的坡面土壤元素含量升高,对侵蚀量分布的计算误差更可忽略不计。

表 3 坡面沉积样品元素含量比较 单位 mg/kg

元素	示踪浓度	沉积样最大浓度	沉积/示踪浓度
La	143067	458	0.003
Ce	133650	830	0.006
Nd	56563	217	0.004
Sm	7113	85.4	0.012
Eu	1088	13.0	0.012

注:元素含量均为减去土壤背景值。

但这里需要提出,在前面的讨论中,我们已发现了在长历时低强度的降雨中,来自坡面上、中部侵蚀泥沙的沉积量可达到 20%~30%,考虑到坡面沉积发生的随机性,在这种情况下,示踪条带的上面也同样可发生沉积。在降雨后人工锄平细沟的活动也可能引起示踪条带上覆盖一薄层邻区的土壤。在这种情况下,在示踪带的面蚀形成的泥沙中元素含量浓度则远远小于其应有的示踪元素含量,从而使计算这个示踪区的泥沙量时,计算量会小于实际产沙量。考虑到在坡面中下部侵蚀中,细沟侵蚀为主要方式,在坡耕地上,细沟的深度一般要在 5cm 以上,使收集的泥沙大多为细沟侵蚀带来的示踪带的泥沙。所以,即使在坡面沉积显著的情况下(如低雨强,长历时降雨),由于坡面泥沙沉积及人为活动的影响,本方法测得的不同地貌部位的相对侵蚀量虽可能偏小,但却可以代表细沟侵蚀的贡献。

3 结 论

REE 示踪法因其较高的量化程度和监测精度,已成功地用于土壤侵蚀空间分布研究。通过本文讨论可以看出,REE 示踪法还可为侵蚀泥沙运移过程的泥沙沉积研究开拓新的研究手段,小区试验结果表明,坡面侵蚀泥沙在低雨强、长历时降雨侵蚀过程中,沉积明显,输沙比较低,且在坡面不同部位泥沙的沉积状况差异明显;坡面产沙以短历时、高雨强的侵蚀产沙为主。利用 REE 示踪法,可望深化对泥沙运移、沉积过程的认识,在泥沙来源、侵蚀动力学等研究中也可有广阔的应用前景。

参考文献

1 田均良等.土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报.水土保持学报,1992,6(4)  
2 田均良,彭祥林.黄土高原土壤地球化学.科学出版社,1994