

# 土壤侵蚀示踪稀土元素的中子活化分析技术

李雅琦 刘普灵 琚彤军

(中国科学院水土保持研究所 陕西杨陵 712100)  
水利部

**摘要** 介绍了应用REE示踪法研究土壤侵蚀的中子活化分析方法。试验结果表明,与REE示踪法相结合的中子活化分析技术,用以定量地测定各种不同地形部位的相对侵蚀量,具有较高的精确度及灵敏度,其相对误差均小于15%。室内外试验分析结果证明了该方法为土壤侵蚀的量化研究提供可靠的分析手段。

**关键词** 土壤侵蚀 REE示踪法 中子活化分析

## INAA of Tracing REE Applied to Studies of Soil Erosion

Li Yaqi Liu Puling Ju Tongjun

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

**Abstract** INAA techniques of tracing REE applied to studies of soil erosion has been introduced in this paper. Experimental results have showed that this method can be used for precise determination of soil erosion amounts on different topographical parts with a relative error less than 15% while it be used with the REE tracer method together. It also provide a reliable way for quantitative study of soil erosion.

**Key words** soil erosion REE tracer method INAA

黄土高原的土壤侵蚀是一个非常严峻的环境问题,它不仅给当地的社会经济发展带来严重障碍,又是黄河泥沙的重要来源。分析研究不同地形部位土壤侵蚀的垂直分布,揭示土壤侵蚀的变化规律,是有效整治侵蚀土地,合理进行水土保持规划,优化配置水土保持措施的重要依据。但由于黄土高原土壤侵蚀的复杂性和悬殊性,通常沿用的观测方法<sup>[1-2,3]</sup>,其测量精度和适用范围,均难满足土壤侵蚀垂直分布研究的需要,特别是不同地形部位的土壤侵蚀量,尚无理想的观测方法,既限制了土壤侵蚀分异规律的追踪研究,又影响了水土流失的正确评估和综合治理。

利用现代的核示踪方法和先进的中子活化分析技术,定量地监测不同地形部位土壤侵蚀

量,可以克服沿用方法的不足,使土壤侵蚀研究进入量化新阶段。稳定性 REE 示踪法,可根据研究需要选择元素的种类和施放部位,灵活性大,适用性强,不存在放射性污染问题,更适宜于各种不同地形部位的土壤侵蚀研究。而中子活化作为现代的分析手段,具有灵敏度高,精确度高,适用性广,多元素测量,无需化学处理,非破坏性,且分析方法简便,自动化程度高等其它分析方法无可比拟的优点,为 REE 示踪法的应用提供了可靠的保证。所以,将中子活化分析与示踪法有机地结合起来,分析测定 REE 示踪元素含量以研究土壤侵蚀的发生、分布及变化过程,为黄土高原土壤侵蚀的垂直分布研究提供可靠的依据。现就我们利用 REE 示踪法研究土壤侵蚀垂直分布中的中子活化分析方法简述如下:

## 1 实验原理

中子活化分析的基本原理是将待测元素经中子照射后,发生核反应,使待测元素活化,变成放射性核素,根据该放射性核素放出射线的能量和强度,即可对待测元素进行定性、定量分析。在实际分析中,放射性强度的测量需做一系列校正,为了避免过多的参数测量引起的误差积累,通常采用把标准样品和待测样品在相同条件下,进行中子照射和放射性测量,比较其放射性强度,即可得出待测元素含量。计算公式如下:

$$C_j = \frac{S_j}{S_{d_j}} \times S_{r_j} \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中:  $n$  —— 被分析的元素数;  $C_j$  —— 第  $j$  种元素的含量;  $S_{d_j}$  —— 标准样品中单位重量第  $j$  种元素的计数;  $S_{r_j}$  —— 被测量样品单位重量第  $j$  种元素的计数;  $S_{c_j}$  —— 标准样品第  $j$  种元素浓度保证值。

利用 REE 示踪法和中子活化分析研究土壤侵蚀,就是将稳定性 REE 作为示踪剂,对试验小区土壤进行标记,使其均匀地分布于被研究区内,并在降雨过程中随侵蚀土壤一起迁移,采集径流池中的泥沙样品,然后利用中子活化分析方法测定示踪元素的含量,从而计算出不同地形部位的土壤侵蚀量,以达到监测泥沙来源及不同地形部位土壤侵蚀量的目的。

## 2 分析方法

### 2.1 样品采集与制备

在施放示踪元素前,在试验小区取土壤背景样,降雨前,每区段(带)取标记土壤样品。在降雨试验期间,采取径流浑水样,利用烘干称重法测定径流量和泥沙侵蚀总量。野外试验的侵蚀泥沙总量通过测量沉积区内浑水体积与浑水含沙量计算。沉积泥沙样品利用网格法取样,以保证样品的代表性。

全部样品在室温下风干,均匀混合后,利用网格法取 100g 研磨后过 100 目筛,最后取 50~100mg 的样品,封装于 1cm×1cm 大小的铝箔袋内,再用干净的高纯铝箔包好以备作活化靶用。

### 2.2 照射与测量

样品照射在北京原子能科学研究所的核反应堆进行,每 50 个样品(包括标准样品和质控样品)组成一活靶,照射中子积分通量为  $n \times 10^{13}$  中子/(cm<sup>2</sup>·s),对于每一活靶来说,中子积分通量是相同的。

活化后的样品,经过一定时间的冷却,在配有 ORTEC 高纯锗探测器的多道——计算机系

统上测定,该系统对 $^{60}\text{Co}$ 的1332keV $\gamma$ 射线能量分辨率为2.4keV,测量时必须保证标准和样品几何条件的相同,这样获取的计数在经过衰变校正、测量时间与样品重量归一化后,分析样品中各元素的浓度由多道——计算机程控系统根据(1)式计算程序自动给出。

### 2.3 分析质量控制与精度检验

为了保证分析精度,我们在每批分析样品中加入国际通用的标准参考物质(SRMs)作为质控样品。表1列出了质控样品的分析结果及中子活化分析对有关REE的检测线。为了便于比较,表中同时给出了黄土高原土壤的平均背景值。由表1可以看出,中子活化分析REE具有较高的检测灵敏度,这对于有效地减小示踪元素用量,降低试验成本非常有利。显而易见,中子活化分析对REE有十分满意的精确度。

表1 质控样品的中子活化分析结果\*

元素	INAA 检测线	黄土高原 REE含量	BCR-1		MAG-1	
			分析值	保证值	分析值	保证值
La	<0.1	34.3	25.2±1.5	25.0±0.08	41.9±2.4	46
Ce	<0.1	63.2	53.1±2.5	53.7±0.8	95.1±5.9	94±7
Nd	1	31.2	31.3±1.2	28.7±0.6	39.8±4.9	44±3
Sm	0.01	5.47	7.09±0.59	6.58±0.17	7.62±0.75	7.8±0.9
Eu	0.001	1.15	2.12±0.07	1.95±0.05	1.60±0.16	1.6±0.2
Yb	0.1	2.74	3.67±0.19	3.39±0.08	2.64±0.36	3.0±0.3

\* 保证值引自 E. S. Gladney, 1982 Compilation of Elemental Concentrations in Eleven United States Geological Survey Rock Standards in Geostandards Newsletter; Vol. 11 April 1983.

## 3 结果和讨论

### 3.1 坡面径流小区试验的示踪元素分析

表2给出了室内模拟试验中以段面法及条带法布设的示踪REE的中子活化分析测量值,并给出利用烘干称重法计算出的侵蚀总量。由表2可以看出,除第一次降雨试验侵蚀泥沙中示踪元素Eu、Sm未被检出外,其它示踪元素的含量和土壤背景含量差异显著。

表2 坡面径流小区试验示踪REE元素含量\*

试验 序号	雨强 (mm/min)	侵蚀总 量(kg)	泥沙示踪元素平均含量(mg/kg)					
			Eu	Sm	Ce	Yb	Nd	La
1	1.14	23.15	—	—	184±9	—	—	—
2	1.61	114.6	5.31±0.36	10.1±0.88	106±7	—	—	—
3	1.61	106.6	4.79±0.31	4.05±0.78	127±10	4.85±1.18	82±15	98.7±6.0

\* 表中Yb、Nd、La为条带施放元素进入泥沙中的平均含量。

利用示踪元素在坡面上不同部位的施加浓度及其泥沙中的平均含量测定值,即可方便地计算出不同地形部位侵蚀量与总侵蚀量的比值(相对侵蚀量)。表3列出模拟降雨试验小区各部位相对侵蚀量的计算结果。

表3中第一次试验精度为14%,其余均小于10%,说明REE示踪法的精度完全可以用来测定土壤侵蚀分布状况。表3的结果表明,条带施放法分析结果(包括侵蚀分布模式及精度)与面施法非常吻合,表明条带示踪法用于野外土壤侵蚀垂直分布研究,和段面施放法相比,条带施放法更简单易行。

我们在安塞试验站利用条带法布设了全坡长径流小区试验。根据各条带的REE施放浓度

和集水池中的示踪元素含量,计算出各坡段相对侵蚀量如表4所示。

表3 模拟试验不同部位侵蚀量的计算结果

试验序号	区段位置						合计		实测总侵蚀量(kg)
	上部		中部		下部		总量(kg)	相对(%)	
1	0	0	0	0	26.44	1.14	26.4	114.0	23.2
2	13.56	11.83	19.02	16.60	75.64	66.00	108.2	94.4	114.6
3	17.38	16.30	12.65	11.87	83.73	78.55	113.8	106.7	106.6
4*	16.89	15.81	21.00	19.70	71.43	67.01	109.3	102.5	106.6

\* 条带施放法的试验结果。

表4 1993年野外小区不同区段的相对侵蚀量

元素	坡段(m)	相对侵蚀量(%)				
		7月10日	7月26日	7月29日	7月31日	8月3日
La	0~20	5.09	9.02	5.09	9.32	4.47
Ce	20~38	14.58	14.66	14.58	6.30	38.44
Nd	38~54	8.64	7.69	8.64	4.91	4.46
Sm	54~69	8.62	6.56	8.62	3.42	10.44
Eu	69~85	39.65	16.25	39.65	21.39	25.98
Dy	85~100	22.06	21.33	22.06	68.73	25.36
合计		98.65	75.50	98.06	114.07	109.15

野外试验示踪元素含量分析结果,显示了满意的全坡长小区不同段面相对侵蚀量的计算精度。除7月26日降雨外,其余监测误差均小于15%,说明该方法对全坡长小区不同部位的相对侵蚀量的监测精度也十分理想。

由表4可见,野外全坡长小区各部位的相对侵蚀量随着坡段的变化而变化,图1给出了野外试验土壤侵蚀沿全坡面的连续分布模式,虽然这些分布模式因受多种因素的影响表现得比较复杂,但它反映了全坡长小区相对侵蚀量的分布总趋势,对土壤侵蚀的机理研究有着重要的参考价值。

上述结果表明,中子活化示踪REE法成功地监测了野外全坡长小区各坡段相对侵蚀量的变化趋势和变化幅度,为深入研究土壤侵蚀形成发展过程和分布规律提供了可靠的科学依据。

### 3.2 对侵蚀过程样的含量分析

利用中子活化分析对侵蚀过程样示踪稀土元素的含量测定,可用于揭示在次降雨土壤侵蚀过程中坡面不同部位相对侵蚀量的变化趋势<sup>[4]</sup>。

在坡面小区以段面法布设的A、B、C三个区段中,上部(A段)相对侵蚀量在降雨开始时呈减少趋势,尔后逐渐增加。而中部(B段),在大部分降雨过程中,土壤相对侵蚀量逐渐增加,只是在降雨结束前略有减少。下部(C段)的相对侵蚀量在整个降雨过程中,总体上呈减少趋势。

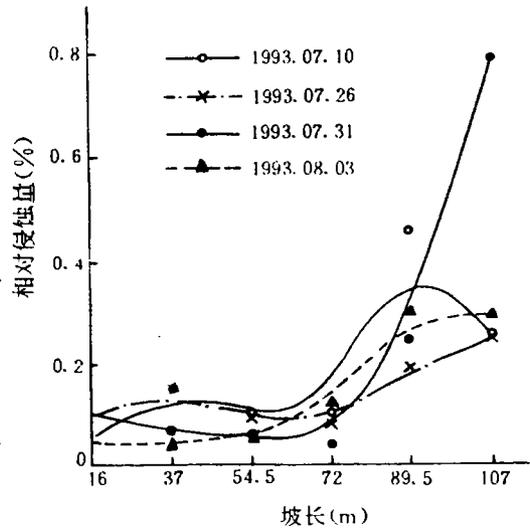


图1 野外试验土壤侵蚀分布模式

这种变化趋势表现出的坡面不同区段随降雨过程侵蚀变化显著差异,可为土壤侵蚀的机理研究提供科学依据。

### 3.3 沟坡试验结果分析

根据黄土高原丘陵沟壑区的地理特征,我们在进行坡面径流小区试验的同时,也在露天试验场以条带与点穴法结合布设了沟坡试验,两次降雨试验产沙总量及 REE 含量的测定结果如表 5 所示。

表 5 沟坡试验示踪 REE 含量

试验 序号	雨强 (mm/min)	模型	产沙总 量(kg)	REE 浓度(mg/kg)			
				La	Ce	Nd	Sm
1	1.14	1#	0.55	29.72	0	125.73*	344.44
		2#	3.80	36.17	151.28	121.98	183.43
2	1.58	1#	9.00	36.33	4.33	61.09	169.27
		2#	14.95	44.14	270.74	52.74	206.51

表 6 沟坡模型元素施放处侵蚀强度

试验 序号	雨强 (mm/min)	模型	元素施放处的侵蚀强度(kg/m <sup>2</sup> )			
			La	Ce	Nd	Sm
1	1.14	1#	0.044	0	0.40	3.51
		2#	0.36	0.85	2.65	6.16
2	1.58	1#	0.88	0.057	3.14	28.21
		2#	1.78	5.96	4.51	55.51

通过对沟坡连续体模型试验中 REE 的含量分析,便可计算出元素施放处的侵蚀强度(如表 6 所示),由此可以做出沟坡模型侵蚀强度垂直分布曲线图,如图 2 显示了 1# 型在两次降雨试验中的分布趋势,由图可见,沟坡试验的侵蚀强度随着雨强的增大而递增,这与坡沟侵蚀实际状况是相符的。

上述结果表明,中子活化示踪 REE 对沟坡试验的土壤侵蚀监测仍具满意的结果。若欲用此求解某一区域总侵蚀量,其精度取决于点穴的布设密度,密度越高,精度越高。可见,该方法用以小流域的侵蚀产沙研究也可能有广阔的应用前景。

## 4 结 语

室内外试验结果表明,中子活化分析及 REE 示踪,是土壤侵蚀垂直分布定量分析研究比较理想的分析方法。该方法不仅可以准确地测定坡面不同地形部位的相对侵蚀量,还可客观地描述降雨侵蚀过程各地形部位相对侵蚀量的变化趋势,并可揭示沟坡不同地形部位侵蚀强度变化分布趋势。该方法的精确度和灵敏度是任一沿用的土壤侵蚀测定方法所无法比拟的,为土壤侵蚀规律性研究提供了有效的分析手段。初步研究结果已显

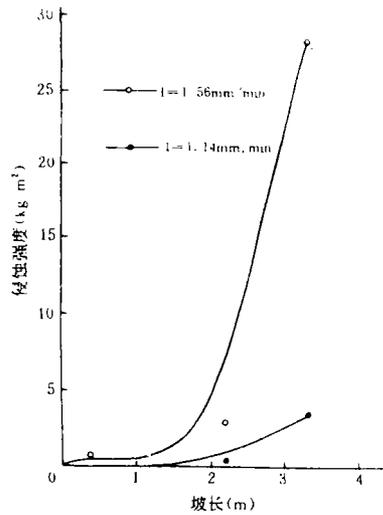


图 2 沟坡试验 1# 模型侵蚀强度分布图

### 3 讨 论

通过上述分析,我们初步得出下列认识。

(1)利用稀土元素示踪法(REE),不仅可以研究次降雨侵蚀产沙垂直分布特征,同时亦可用此方法进行坡面侵蚀过程研究。

(2)坡面侵蚀过程中,侵蚀产沙的垂直分布特征变化较大,这主要与不同时刻的坡面径流强度有关。

(3)次降雨侵蚀产沙垂直分布特征,与次降雨过程中侵蚀产沙的垂直变化特征差异较大,前者仅仅是次降雨侵蚀产沙总效应的反映,而后者则反映了这一特征的动态变化过程。欲深入揭示侵蚀产沙的内在机制,尚需加强侵蚀过程的研究。

#### 参考文献

1 田均良,周佩华等.土壤侵蚀 REE 示踪法试验研究初报.水土保持学报,1992,(4)

\*\*\*\*\*  
(上接第 25 页)

示了核分析技术在土壤侵蚀、泥沙运移及小流域产沙模式等方面的研究有着广阔的应用前景。

#### 参考文献

1 王礼先.关于土壤侵蚀规律研究的目的与方法.水土保持通报,1981,3

2 徐国礼等.地面立体摄影测量在监测沟蚀中的应用.中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,1990,12

3 张信宝等.黄土高原小流域泥沙来源的<sup>137</sup>Cs 法研究.科学通报,1989,3

4 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)