

利用稀土元素示踪法研究黄土高原 土壤侵蚀空间分布规律

李雅琦 田均良 刘普灵 琚彤军

(中国科学院 水土保持研究所 杨陵 712100)
水利部

本文介绍一种利用核素示踪技术研究黄土高原不同地形部位土壤侵蚀量的监测新方法。试验结果表明,与中子活化分析技术相结合的 REE 示踪法可以定量地测定坡面不同地形部位的相对侵蚀量,且有较高的精确度及灵敏度,同时也可揭示侵蚀过程中相对侵蚀量沿坡面的变化趋势;还可反映野外全坡长小区土壤侵蚀的分布模式。室内外试验证明,该方法为土壤侵蚀的量化研究开辟了新的途径。

关键词: REE 示踪法 土壤侵蚀 空间分布

前 言

土壤侵蚀是黄土高原综合治理开发的核心问题,不仅关系到当地工农业的持续发展,而且关系到黄河下游的安危。研究土壤侵蚀空间分布规律,是整治侵蚀土地、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,但通常沿用的测量方法^[1~3],因其受测量精度和适用范围的限制,给土壤侵蚀空间分布的定量分析带来困难,特别是不同地形部位的土壤侵蚀量,尚无理想的观测方法,致使土壤侵蚀空间分布的规律性研究受到限制,严重地影响了水土流失的正确评估和综合治理。

随着示踪法在土壤侵蚀研究中的应用,中子活化分析也进入了新的应用研究领域。稳定性稀土元素(REE)示踪法研究土壤侵蚀,可根据研究需要选择元素的种类和施放部位,其灵活性及适用性是传统的研究方法所无法比拟的,它不仅避免了放射性示踪法存在的污染问题,更适宜于各种不同地形部位的土壤侵蚀研究。而中子活化分析(INAA)作为一种先进的分析手段,以其灵敏度高,精确度好,多元素测量等特点,为稳定性元素示踪法的应用提供了可靠的保证。所以,将中子活化分析法与示踪法有机地结合起来,分析测定 REE 示踪元素含量来研究土壤侵蚀的发生、分布及变化过程,可为黄土高原土壤侵蚀的空间分布规律性研究提供可靠的依据。

材 料 与 方 法

实验方法 REE 示踪法及中子活化分析技术研究土壤侵蚀,是先将稀土元素化合物施放

此文于 1996 年 5 月 12 日收到。

于被研究区域的不同地形部位,使其均匀地分布于土体中,并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侵蚀泥沙中示踪元素的种类和含量,根据示踪元素在不同地形部位的施放浓度及其泥沙中的平均含量测定值,计算不同地形部位侵蚀量与侵蚀量的比值(相对侵蚀量),以判测泥沙的来源及不同地形部位土壤侵蚀量的差异^[4]。

由于中子活化分析对大多数稀土元素分析灵敏度高^[5],且分析方法简便。在土壤侵蚀研究中,利用 REE 作为示踪元素,尚能克服因示踪元素间理化特性差异而引起的误差。加之,在黄土高原稀土元素易与土壤相结合,不溶于水,不易被植物吸收,且不损害生态环境,可起到在土壤侵蚀过程中对泥沙的示踪作用。鉴此,我们选用了 La, Ce, Nd, Eu, Yb, Dy 等 7 种稀土元素作为示踪元素。

为保证研究方法的可靠性和可比性,分别布设了室内径流小区模拟试验和野外全坡长小区试验。模拟试验在水保所降雨大厅内进行,径流小区($6.5 \times 2\text{m}^2$,坡度为 15°)沿坡长自上而下划分为 A, B, C 3 段,分别以 Eu, Sm 和 Ce 3 种稀土元素与各段土壤均匀混合。第 2 次降雨试验结束之后,在原小区 A、B、C 3 段上又分别追加了 1 条 20cm 宽的横向条带,分别依次施放了 Yb, Nd, La 3 种元素(图 1. a)。野外试验在水保所安塞生态试验站进行,全坡长径流小区面积为 $113 \times 5\text{m}^2$,坡度平均 25° 。用 6 种稀土元素(La, Ce, Nd, Sm, Eu, Dy)分别施放于小区条带内(图 1. b)。

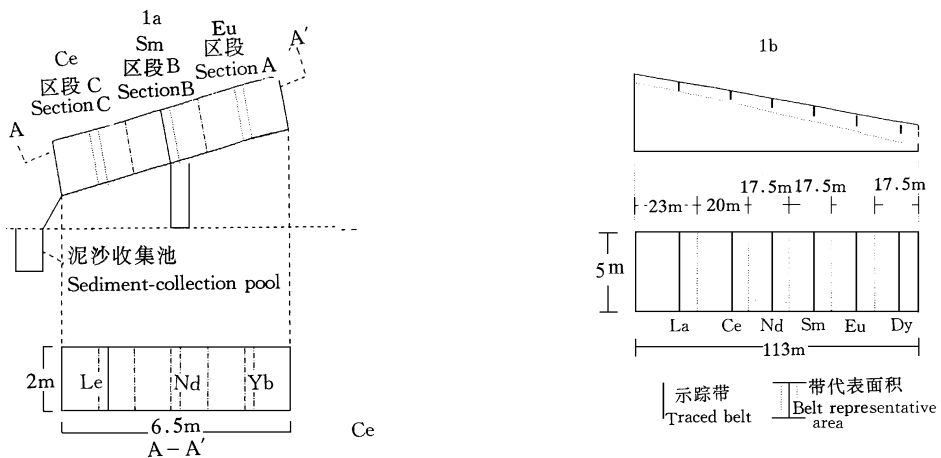


图 1 REE 施放区域图

Fig. 1 The diagram of REE tracing areas

- a. 室内模拟降雨试验小区 b. 野外径流小区
a. A simulation rainfall plot b. A field runoff plot

REE 的施放量取决于研究期间小区的最大可能的总侵蚀量、元素的中子活化截面、示踪元素活化后的最低检测线、核素特征 γ 射线间干扰水平及实验成本等。另外,为保证分析结果的可靠性,侵蚀泥沙中示踪元素的含量还应与土壤背景值差异显著。根据上述条件,利用 REE 示踪元素浓度计算公式确定 REE 的施放量^[4]。

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,每隔 3~ 5min 采集径流浑水样品。为了检验 REE 示踪法的精确度,每次模拟试验的浑水全部收集在沉积池内,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。为了保证样品的代表性,沉积泥沙样品利用网格法取样。全部样品经风干,研磨,均匀混合后,过 100 目筛,称取适量的(50mg 左右)样品,用干净的高纯铝箔包好,与空白及标准一起送往反应堆照射。

样品的分析方法 活化后的样品,经过一段时间的冷却,在配有 Ortec 高纯锗探测器的多道-计算机系统上测定,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-计算机程控系统自动给出。

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(SRM_s)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*

Table 1 The activated neutron analysis for quality controlled samples (mg/kg)

元素 Element	INAA 检测线 INAA detect limit	黄土高原 土壤含量 Loess pla- teau soil content	BCR- 1		MAG- 1	
			分析值 Analysis value	保证值* Reference value	分析值 Analysis value	保证值* Reference value
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

* The reference value is from E. S. Gladney, 1982. Compilation of elemental concentrations in eleven united states geological survey rock standards in geostandards newsletter, Vol. VII April 1983.

结果与讨论

表 2 给出了 1992 年室内模拟试验结果。第 1 次试验误差为 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空间分布。在第 3 次模拟试验中, 3 个区段又分别标记了 3 条 10cm 宽的条带。表 2 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。与段面施放法相比, 条带施放法更简单易行, 故条带示踪法更适用于野外土壤侵蚀空间分布研究。

利用中子活化分析对侵蚀过程中示踪稀土元素的含量测定, 还可用于揭示在土壤侵蚀过

程中坡面不同部位相对侵蚀量的变化趋势,这在土壤侵蚀机理研究中尤为重要。图 2 显示了在模拟试验中,不同部位相对侵蚀量随降雨过程的变化趋势。

由图 2 可以看出,坡面不同区段随降雨过程侵蚀变化趋势差异显著。降雨开始的 12min 内,小区上部(A 段)相对侵蚀量呈减少趋势,尔后逐渐增加,下部(C 段)的相对侵蚀量在整个降雨过程中(除降雨结束前)稍有增加外,总体上呈减少趋势,且降雨 12min 后,C 段相对侵蚀量减少速率变缓。在小区中部(B 段),在大部分降雨过程中,相对侵蚀量呈增加趋势,但在降雨结束前反而减少。降雨开始期间,3 段间相对侵蚀量的差异较大,12min 后,这种差异的程度减弱并逐步趋于稳定。

表 2 模拟试验不同部位侵蚀量的计算结果

Table 2 Calculated results of erosion amounts in different parts of the plot in simulation experiments

试验 序号 Experiment No.	区段位置 Section location								实测总 侵蚀量 Actual gross erosion (kg)
	上部 Upper(A)		中部 Middle(B)		下部 Bottom(C)		合计 Sum		
	总量 Gross (kg)	相对 Relt (%)	总量 Gross (kg)	相对 Relt (%)	总量 Gross (kg)	相对 Relt (%)	总量 Gross (kg)	相对 Relative (%)	
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

* Data from the belt-tracing method

上述结果表明,人工降雨小区各段位侵蚀量分布呈 $C > A > B$ 的总趋势。这种变化趋势是受坡长、坡度和坡形等多种因素影响的结果。但在本试验中,坡度和坡形一定时,相对侵蚀量的变化趋势可能受段位土体容重及降雨均匀度等因素的影响,并且与小区侵蚀细沟密度分布趋势一致。该方法的试验结果定量地描述了小区土壤侵蚀的垂直分布。

连续 4 年的野外 REE 示踪试验结果表明,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。表 3 列出 1993 年的试验结果,显示了满意的全坡长小区不同段面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%。

此外,由表 3 可知,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随每次的降雨情况而在变化,为了探索侵蚀强度的变化规律,我们通过计算各坡段的产沙强度,来说明产沙强度随坡长的变化模式(如表 4 和图 3 所示)。由表 4 可知,各坡段产沙强度的差异除受坡长影响外,还受坡度和坡形影响。本试验中,各坡段的坡度除第 1 段为 20° 外,其余坡度变化均在 $28^\circ \sim 31^\circ$ 之间(在临界坡度附近),对侵蚀量的影响不大,所以本文仅在此讨论产沙强度随坡长的变化。由图 3 可以看出,产沙强度随坡长变化存在 3 种模式。第 1 种模式为增长型,

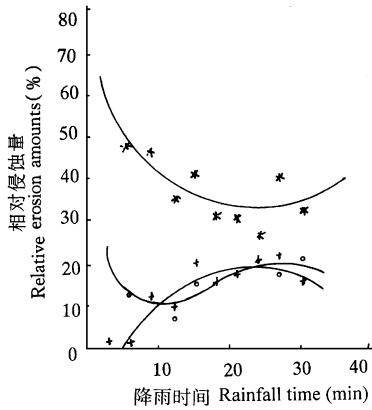


图 2 降雨过程中小区相对侵蚀量的变化趋势

Fig.2 The change trends of relative erosion amounts along the slope in a rainfall process

• A 段 + B 段 * C 段
• Asection + Bsection * Csection

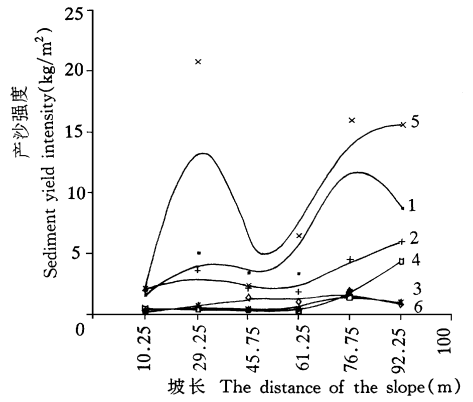


图 3 野外小区产沙强度随坡长的变化模式

Fig.3 The change patterns of sediment yield intensity with the slope length in a field plot

1. 1993. 07. 10 2. 1993. 07. 26 3. 1993. 07. 29
4. 1993. 07. 31 5. 1993. 08. 03 6. 1994. 08. 10

表 3 1993 年野外小区不同区段的相对侵蚀量

Table 3 Relative soil erosion amounts in different sections along a field plot in 1993

区段 Section	标记带距 坡顶距离 Traced belt distance from the top(m)	相对侵蚀量 Relative erosion amount(%)			
		7 月 10 日 July 10	7 月 26 日 July 26	7 月 31 日 July 31	8 月 3 日 August 3
		La	16	5.09	9.02
Ce	37	14.58	14.66	6.30	38.44
Nd	54.5	8.64	7.69	4.91	4.46
Sm	72	8.62	6.56	3.42	10.44
Eu	89.5	39.65	16.25	21.39	25.98
Dy	107	22.06	21.33	68.73	25.36
合计 Sum		98.65	75.50	114.07	109.15

随坡长增大,产沙强度持续增强,如 1993 年 7 月 31 日降雨基本上显示了这种趋势。第 2 种模式为增长递减型,随坡长增大,开始产沙强度增大,其后出现递减趋势,如 1994 年 8 月 10 日和 1993 年 7 月 29 日降雨出现了这种趋势。第 3 种模式为波动型,存在两次增长和两次减小过程,如 1993 年 7 月 10 日和 1993 年 8 月 3 日的暴雨侵蚀表现了这种变化趋势。

上述结果表明,随着次暴雨径流深度的变化,土壤侵蚀垂直分布表现出明显的复杂性。土

壤侵蚀强度随坡长的变化可能存在增长型、递减型和波动型 3 种模式。这种变化模式为深入研究土壤侵蚀形成发展过程和分布规律以及对土壤侵蚀机理均有重要的参考价值。

表 4 全坡长小区各坡段产沙强度

Table 4 Sediment yield intensity in different sections of the whole slope plot (kg/m^2)

坡段 Section (m)	坡度 Slope	1993. 7. 10	1993. 7. 26	1993. 7. 29	1993. 7. 31	1993. 8. 3	1994. 8. 10
0~ 20	20	1. 51	1. 91	0. 18	0. 46	2. 09	0. 14
20~ 38	28	4. 99	3. 59	0. 59	0. 35	20. 62	0. 61
38~ 54	31	2. 37	2. 14	0. 49	0. 32	2. 39	1. 41
54~ 69	29	3. 33	1. 83	0. 40	0. 22	6. 40	1. 09
69~ 85	29	15. 49	4. 50	1. 83	1. 37	15. 93	2. 02
85~ 100	29	8. 62	5. 94	1. 02	4. 41	15. 55	0. 80

参 考 文 献

- 1 刘黎明, 林 培. 黄土高原丘陵沟壑区土壤侵蚀定量方法与模型的研究. 水土保持学报, 1993, 7(3): 73~ 79
- 2 徐国礼, 周佩华等. 沟道侵蚀与地面遥感监测研究. 水土保持学报, 1991, 5(2): 22~ 24
- 3 吴永红, 李 倬, 张信宝等. 黄土高原沟壑区谷坡农地侵蚀及产沙的 ^{137}Cs 法研究. 水土保持通报, 1994, (2): 22~ 25
- 4 田均良, 周佩华等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. 水土保持学报, 1992, 6(4): 23~ 27
- 5 田均良, 彭祥林. 黄土高原土壤地球化学. 北京: 科学出版社, 1994

A STUDY ON SOIL EROSION SPATIAL DISTRIBUTION PATTERNS IN LOESS PLATEAU BY RARE EARTH ELEMENT TRACER METHOD

Li Yaqi Tian Junliang Liu Puling Ju Tongjun

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

ABSTRACT

A new method with nuclear technology to study soil erosion amount monitoring on different topography part in Loess Plateau is reported in this paper. Experiment results have shown that the method of rare earth element tracing combined with neutron activation analysis (NAA) can be used to quantitatively determine relative erosion amounts on different topography parts with better precision and sensitivity. It also can be used to reveal the change trend of relative erosion amounts along a slope in erosion processes, as well as the soil erosion distribution patterns.

Key words: REE tracing, soil erosion, spatial distribution