

REE 示踪条带施放法研究坡面土壤 侵蚀垂直分布规律

据彤军 田均良 刘普灵 李雅琦 张梅花

(中国科学院水利部水土保持研究所 杨陵 712100)

通过室内模拟和野外小区试验,采用中子活化分析手段,进行了运用 REE 示踪条带施放法研究坡面土壤侵蚀垂直分布的可行性分析。结果表明:示踪元素条带施放法研究土壤侵蚀,可定量分析黄土坡面不同坡段的相对侵蚀量,具有满意的试验精度,并揭示了产沙强度随坡长存在 3 种变化模式。

关键词:中子活化分析 土壤侵蚀 示踪 REE 条带施放法

黄土高原的侵蚀环境异常特殊,侵蚀情况非常复杂。在同一坡面,不同部位侵蚀差异显著,致使土壤侵蚀垂直分布的规律性研究受到限制,直接影响土壤侵蚀的正确评估和水土保持的决策,已引起众多科学家的关注^[1]。

随着 REE 示踪法在土壤侵蚀中的应用以及先进的中子活化分析手段的采用,坡面土壤侵蚀垂直分布的研究,在实验方法和理论上均取得了可喜的进展,并得到了满意的观测精度。

运用 REE 示踪法研究一给定的坡面,其示踪元素的施放方法主要有段面法、条带法和点穴法 3 种。段面法精度高,但工作量大,试验成本高,野外操作难;点穴法施放虽然简单,但定位选择难度较大,试验精度较差。我们采用条带法施放示踪元素,并先后进行了室内坡面模拟降雨试验和野外全坡长试验,全面观测分析次暴雨坡面各坡段的产沙、沉积情况。试验表明:利用条带法布设示踪 REE 研究坡面土壤侵蚀垂直分布,具有布设工作量小、试验成本低、适于野外试验、可行性强及试验精度好的优点,因而具有更大的实用价值。本文就运用示踪 REE 条带布设法研究坡面不同部位的侵蚀量及变化趋势进行了讨论。

1 试验方法

1.1 试验原理

REE 示踪条带施放法研究土壤侵蚀垂直分布的原理是基于假设在侵蚀坡面上的每一不同段面内总能找到一条有限宽度的带,其土壤侵蚀强度等于或接近于该段面的平均侵蚀强度。将示踪元素布设于此条带中,施放浓度由公式(1)给出,示踪元素在整个侵蚀过程中随泥沙一起运移,采集径流泥沙样品,用中子活化分析方法测试样品中各示踪元素浓度,根据示踪元素在坡面不同部位的施放浓度及泥沙中的平均含量,由公式(2)、(3)、(4)分别计算不同坡段的侵蚀量、相对侵蚀量和试验精度^[2,3]。

$$C_j = KB_j 10^{-3} / Y_j \quad (g/kg) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$W_j = (R_j - B_j) \times W / C_j = R'_j \times W / C_j \quad (2)$$

此文于 1999 年 7 月 12 日收到。

$$r_j = W_j / W = (R_j - B_j) / C_j = R'_j / C_j \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n W_j}{W} - 1 \quad (4)$$

式中, n 为划分段面数及元素种类数; C_j 为第 j 条带 REE 施放浓度; B_j 种 REE 的土壤背景浓度值; Y_j 为第 j 区相对侵蚀量的最小期望值; K 为考虑其它因素的综合保证系数; W_j 为第 j 个坡面部位的侵蚀量; R'_j 代表侵蚀小区中元素浓度的净增量; R_j 代表侵蚀泥沙中元素的实测浓度; W 为整个坡面的总侵蚀量; r_j 代表第 j 坡段的相对侵蚀量; δ 代表侵蚀量的监测误差。

1.2 样品的中子活化分析法

将收集到的样品在室温下风干, 均匀混合后, 取 20g 样品过 100 目筛, 称取其中 50mg 样品, 用纯铝箔包装, 放入原子反应堆中照射, 利用 γ 能谱仪在各特征能量处测定分析各个 REE 的含量。

2 试验设计

2.1 室内模拟降雨试验

为了验证 REE 示踪法研究土壤侵蚀的可行性及其精度, 为野外试验的布设、实验解决技术问题。在室内进行了模拟降雨试验, 着重解决了条带布设位置的选取及技术依据, 并观测了不同坡段的侵蚀量及变化趋势。

从分析精度、实验成本和推广应用前景等方面考虑, 选用 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Dy 和 Yb 七种 REE 作为示踪元素。这几种 REE 的化学性质极其相似, 都具有稳定的表生地化行为。即使同时使用多种 REE 示踪, 也完全可以克服不同元素间化学性质的差异而引起的实验误差。在本实验中, 采用示踪元素条带施放与不同种类示踪 REE 段面施放的混合施放, 以便于比较。

坡面模拟试验选在水保所侵蚀实验大厅, 试验小区面积为 $6.5\text{m} \times 2.0\text{m}$, 坡度为 15° , 盛土深度为 50cm, 供试土壤为当地土壤, 采用侧喷式设备进行降雨。实施段面施放法, 试验结束后, 在不破坏已有段面布设的元素分布状况下, 只在原段面内分别加一元素不同于原段面中布设元素的条带, 即可实施段面与条带施放法的混合试验。整个坡面自上而下等分为 A、B、C 3 段, 条带布设在段面的中部, 宽度为 20cm, 施放 Yb、Nd、La₃ 种元素(不同于段面法的 Eu、Sm、Ce) 如图 1 所示。施放浓度 C_j 由公式 (1) 算出, 施放量则为 C_j 与条带体积的乘积。实验雨强 1.61mm/min, 降雨历时 30min, 采集径流泥沙样, 利用烘干法测定降雨的泥沙总量。

2.2 野外全坡长小区试验

为了扩大研究坡面的空间尺度, 进一步验证 REE 条带施放法研究土壤侵蚀垂直分布的有效性, 1992 年春季在水土保持研究所安塞生态站建立全坡长试验小区, 小区基本情况见表 1。

室内人工模拟降雨试验研究表明, 在坡面的某一坡段内坡段下方约 2/3 处的土壤侵蚀强度, 可代表此坡段的平均土壤侵蚀强度。把全坡长小区在斜面方向上分为 6 个坡段, 最上两个坡段斜坡长分别为 23m 和 20m。其它 4 个坡段斜坡皆为 17.5m, 因此 6 个坡段 REE 的施放位置分别在斜坡长的 16m、37m、54.5m、72m、89.5m 和 107m 处。全坡长小区自上而下 REE 施放的种类分别为 La、Ce、Nd、Sm、Eu 和 Dy, 如图 2 所示。La 的施放宽度为 0.24m, 深度为 20cm, 其余 REE 施放宽度均为 0.2m, 深度均为 0.3m。每次降雨后在集流池中均匀布设 20 个

采样点, 每个采样点面积为 50cm^2 , 20 个采样点总面积占池面积的 1%, 取出每个采样点的泥沙样, 风干称重, 测量稀土元素含量。

表 1 全坡长径流小区基本情况

Table 1 Basic condition of runoff plot

坡长 (水平投影) Length (m)	坡宽 Width of slope (m)	坡向 Direction of slope	坡型 Shape of slope	平均坡度 Average grade	地貌部位 Parts of landform	土壤 Sorts of soil	植被 Vegetation
100	5	东 East	直 Straight	28°	沟间地 Channel land	耕地黄绵土 Huangmian soil	裸地 Nude land

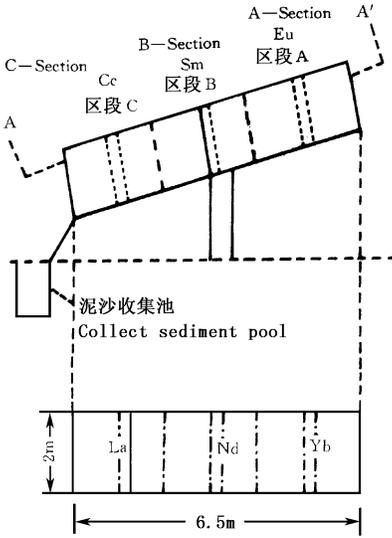


图 1 坡面试验小区示踪元素布设示意图

Fig. 1 The sketch map of discharging tracer in the simulation experiment

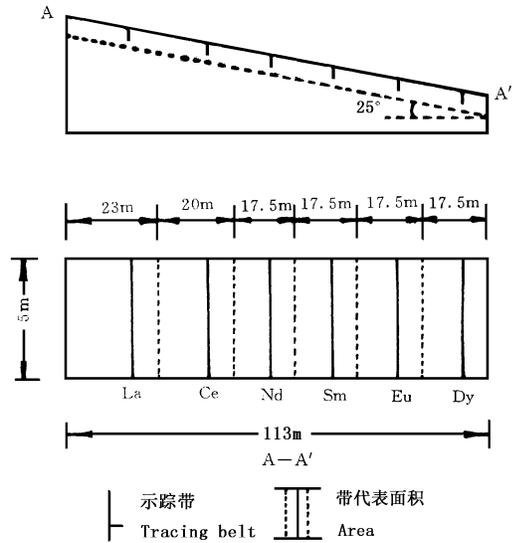


图 2 野外全坡长小区 REE 布设示意图

Fig. 2 The sketch map of discharging REE in field runoff plot

3 结果与讨论

3.1 REE 条带施放法可行性分析

室内坡面降雨试验的泥沙总量以及利用中子活化分析测定采集样品中各示踪元素的浓度由表 2 列出。

表 2 降雨泥沙中各示踪 REE 的含量

Table 2 Content of tracer in rainfall sample of runoff

降雨强度 Rainfall intensity (mm/min)	侵蚀总量 Gross erosion (kg)	泥沙示踪元素平均含量 Average content of tracing elements in samples (mg/kg)					
		Eu	Sm	Ce	Yb	Nd	La
1.61	106.6	4.79 ± 0.31	4.05 ± 0.78	127 ± 10	4.85 ± 1.18	82 ± 15	98.7 ± 6

注: 表中 Eu, Sm, Ce 为段面施放元素进入泥沙中的平均含量。

Note: Eu, Sm, Ce is an average content of tracer by section discharge method

根据条带施放元素 Yb, Nd, La 的平均含量测量结果, 以收集的泥沙量为控制量, 用条带侵蚀强度作为段面的平均侵蚀强度, 用公式 (2)、(3)、(4) 分别计算段面侵蚀量、相对侵蚀量及相

对误差。再用段面施放元素 Eu、Sm、Ce 测定结果,用同样方法计算上述 3 项结果,如表 3 所示。

表 3 不同地形部位相对侵蚀量、侵蚀量和相对误差比较

Table 3 Comparison of relative erosion yield, erosion yield and relative error in the parts of landform

释放方法 Discharge method		地形部位 Part of landform			相对侵蚀总量 Relative erosion yield	Erosion yield λ (%)
		上部 Upper	中部 Middle	下部 Lower		
		条带法 Belt method	条带相对侵蚀量 Belt relative yield	0.012		
条带法 Belt method	条带侵蚀量 Belt yield	1.28	1.27	5.42		
	段面相对侵蚀量 Section relative yield	0.1302	0.1289	0.5503	0.8094	
段面法 Section method	段面侵蚀量 Section yield	13.89	13.74	58.66		-19.06
	相对侵蚀量 Relative yield	0.165	0.103	0.667	0.935	
段面法 Section method	侵蚀量 Erosion yield	17.6	11.0	71.0		-6.5

由表 3 可以看出:以泥沙池中所收集的泥沙量作为控制量,以条带侵蚀强度作为该段面的平均侵蚀强度所计算出段面侵蚀量及相对侵蚀量的误差均较大,为 19.06%,但进一步分析表明,上、中、下条带相对侵蚀量的比值为 1:0.45:2.86,与相应的段面上、中、下各部位相对侵蚀量比值为 1:0.99:4.22 有类似的土壤侵蚀垂直分布趋势,与我们在降雨结束后所观察到的坡面侵蚀形态相符。因此可以推断,采用条带施放法所得出的侵蚀量确实代表了条带本身的侵蚀强度。从理论上讲,条带法研究土壤坡面侵蚀是无可质疑的。至于条带施放法所推算出的侵蚀量小于段面施放法,这主要是由于试验中将条带布设在段面的几何中部,径流发生时,由于泄流作用,中部的侵蚀强度显然要小于段面的平均强度。

为了满足野外工作开展的需要,通过模拟试验提供的数据及经验数据,近似推算了这一位置在距坡顶 2/3L 处。

3.2 坡面不同部位相对侵蚀量的变化趋势

通过分析径流样中示踪 REE 的含量,对降雨过程中坡面不同部位侵蚀量进行了计算,用各部位相对侵蚀量对降雨时间作图,可以显示坡面小区降雨试验中各地形部位相对侵蚀量的变化趋势(如图 3)。

坡面上部土壤(A段),在降雨 9min 前相对侵蚀量呈减少趋势,其后逐渐增加;在中部(B段),相对侵蚀量在降雨的大部分时间呈增加趋势,而在降雨结束前几分钟略有下降。下部土壤(C段),整个降雨过程相对侵蚀量呈减少趋势,仅在降雨 12min 后减少的速率有所下降,且在降雨结束略有回升。同时还可看出,在降雨开始的一段时间内,土壤侵蚀的垂直分异现象

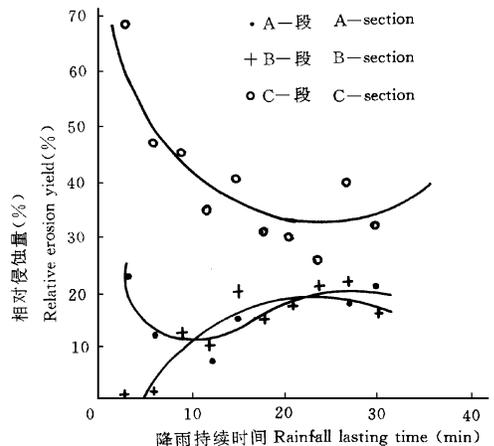


图 3 降雨过程坡面不同部位相对侵蚀量变化趋势

Fig. 3 Change trend of relative erosion yield in different parts of the slope during rainfall

相对显著,在十几分钟后,各部位相对侵蚀量间差异明显减少并渐趋稳定。

上述试验结果,反映出在降雨小区上,坡面各段位侵蚀量的分布呈 $C > A > B$ 的总趋势,这种趋势虽可能是因受到段位土体容重,降雨均匀等多种因素的影响结果,但确于实际坡面侵蚀形态相似。比如小区中部(B段),可能由于建造小区时土体较紧实,侵蚀强度小于上部(A段),同时也表明了利用条带法研究坡面侵蚀的试验结果,客观地描述了供试小区的土壤侵蚀垂直分布特征。

3.3 野外试验精度分析

全坡长径流侵蚀小区共观测产沙 15 次,土壤侵蚀垂直分布各坡段相对侵蚀量的计算采用上述(3)、(4)公式联立给予评价,15次降雨侵蚀计算精度由表 4 列出。

表 4 全坡长小区土壤侵蚀垂直分布计算精度

Table 4 Calculation accuracy of vertical distribution erosion in runoff plot

降雨时间 Rainfall time	1993-07-10	1993-07-26	1993-07-29	1993-07-31	1994-08-03	1994-07-02
计算精度 Accuracy	0.956	0.755	0.986	1.141	0.956	0.957
降雨时间 Rainfall time	1994-07-07	1994-07-19	1994-08-03	1994-08-05	1994-08-10	1994-08-31
计算精度 Accuracy	0.582	0.412	0.542	0.578	0.990	0.362
降雨时间 Rainfall time	1995-06-01	1995-07-14	1995-08-05			
计算精度 Accuracy	0.518	0.742	0.589			

理论上讲计算精度应为 1,由上表可知全坡长小区第 1 年土壤侵蚀垂直分布观测精度达到 75% 以上,第 2 年和第 3 年的计算精度比较差为 50% 左右,土壤侵蚀垂直分布的计算精度随时间变化而递减,这可能与施放条带的 REE 浓度变化或由于各条带施元素间的再沉积的影响,有待于进一步研究。但是,全坡长小区开始几场降雨侵蚀的计算精度比较好,其计算结果仍能说明沿坡长土壤侵蚀的变化趋势,

对研究土壤侵蚀垂直分布确能提供重要的数据。由于每次降雨的相对侵蚀量变化和幅度不尽相同,且各坡段水平投影的差异,为了比较它们的侵蚀强度变化,选择了 6 次观测精度较高的降雨侵蚀,分别计算各坡段的产沙强度(kg/m^2),表 5 列出了各坡段的产沙强度。

分析可知产沙强度随坡长变化可能存在 3 种模式,这 3 种模式前人已在小区研究中都已提出并有观测数据证明。第 1 种模式为增长型,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,随着坡长增大,其后出现递增趋势,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

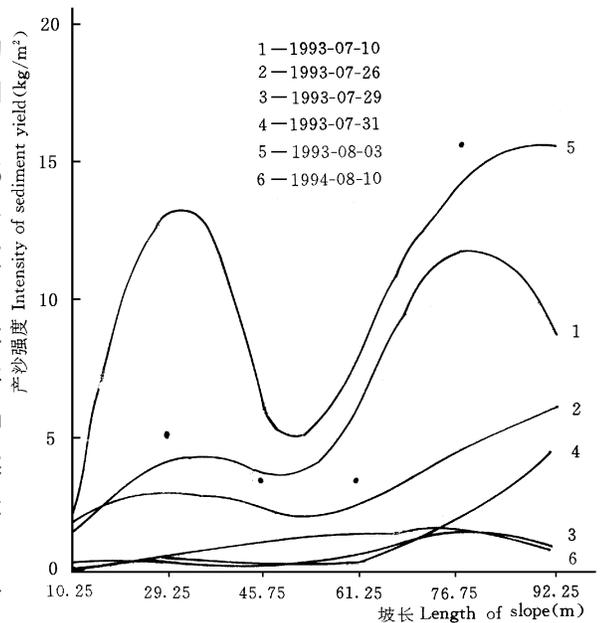


图 4 产沙强度与坡长的关系

Fig. 4 Relationship between intensity of sediment yield and length of slope

现了这种变化趋势。图 4 可说明每次降雨侵蚀的产沙强度随坡长的变化模式。

表 5 全坡长小区各坡段产沙强度

Table 5 Intensity of producing sand in runoff plot with each section (kg/m^2)

水平坡度 Horizontal(m)	坡度 Grade	1993-07-10	1993-07-26	1993-07-29	1993-07-31	1993-08-03	1994-08-10
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	1.14
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

4 结 语

根据室内外的试验资料分析, 可得出下列几点认识和结论:

(1) 利用示踪 REE 条带施放法, 根据元素平衡原理, 可定量分析黄土坡面不同坡段的相对土壤侵蚀量, 并具有较好的精度。

(2) 稀土元素施放后, 随着降雨次数的增加, 各坡段的相对侵蚀量的计算精度呈递减趋势, 研究认为可能与坡面沉积过程对所施稀土元素的再分布有关。

(3) 通过室内模拟试验和野外小区试验, 结果表明, 利用 REE 示踪法定量测定不同地形部位的相对侵蚀量, 为土壤侵蚀垂直分布研究开辟了新的途径。

参 考 文 献

- 1 朱显谟. 黄土区土壤侵蚀的分类. 土壤学报. 1956, 4(2): 99~ 102
- 2 刘普灵, 等. 土壤侵蚀稀土元素示踪法操作技术研究. 水土保持研究, 1997, 4(2)
- 3 田均良, 等. 土壤侵蚀稀土元素示踪法初报. 水土保持报. 1992, 6(4)

VERTICAL DISTRIBUTION OF SOIL EROSION IN SLOPE WITH THE BELT DISCHARGE METHOD OF REE TRACER

Ju Tongjun Tian Junliang Liu Puling Li Yaqi Zhang Meihua

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

ABSTRACT

Based on the experimental data obtained from the belt discharge of REE tracer and INAA technology in room and field, the probability using this method to study vertical distribution of soil erosion in slope is analyzed. The results indicate that the belt discharge method of REE tracer has good accuracy and can be used to study soil erosion in slope and analyze relative erosion of different zone in slope. The research reveals that there are three models in the degree of sand producing with slope length.

Key words: INAA, soil erosion, tracing REE, belt discharge method of REE tracer