

REE 示踪坡面侵蚀的演变过程

薛亚洲^{1,2}, 刘普灵^{1,2}, 杨明义^{1,2}

(1. 中国科学院水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 通过人工模拟降雨, 利用分段和分层结合布设不同的稀土氧化物(Rare- Earth Oxide), 研究次降雨条件下坡面侵蚀的演变过程。结果表明, 随降雨的进行, 坡面侵蚀一般存在一个由片蚀—近坡角纹沟发育—细沟发育—坡面侵蚀稳定(至基准面)的动态演化过程, 各过程中相应侵蚀形态占据主导地位; 沟头的出现是导致各侵蚀段侵蚀活跃的重要因素; 连续小雨强降雨条件下, 坡面以细沟发育为主, 侵蚀过程较初次降雨要平稳得多。

关键词: REE 示踪法; 坡面侵蚀; 时空演变规律

文献标识码: A **文章编号:** 1000—288X(2004)02—0008—04 **中图分类号:** S157.1; O615.4

Using Rear- Earth Element Tracers for Studying Spatial and Temporal Process of Soil Erosion in Sloping Land

XU E Ya-zhou^{1,2}, L U Pu-ling^{1,2}, YANG M ing-yi^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;

2 Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: By placing different rare earth oxide in different soil depth and different section across a slope in the field plots, the temporal and spatial process of soil erosion is studied under simulated rainfall situation. The results indicated that there is a dynamic process from sheet erosion, ripple erosion near the plot bottom, headward erosion, and relative stableness of slope (ended on the erosion basis). Relevant erosion types were dominant within corresponding erosion stages. The emergence of rill head is the key factor boosting up the erosion of different section on slope. Under gentle intensity consecutive rainfall, headword erosion is dominant on the plots, and its erosion process is much more stable than erosion process of the first rainfall.

Keywords: REE tracer technology; slope land erosion; temporal and spatial erosion process

土壤侵蚀是全球关注的重大而又复杂的环境问题。长期以来, 许多学者对此进行了较为深入的研究。示踪技术是目前研究土壤侵蚀的一种有效实验手段。核素示踪技术应用于土壤侵蚀研究^[1], 已经有 40 a 历史。到目前为止, 已经发展了大气降尘放射性核素示踪, 天然放射性核素示踪, 人工施放稳定性稀土元素示踪等核示踪方法^[2-3]。

从 20 世纪 80 年代至今, 放射性核素示踪取得了一定成效。但其主要应用于研究中长期、大面积土壤平均侵蚀率。对定量分析次降雨条件下坡面侵蚀方式及空间分异演化过程, 稀土元素示踪则比较优越。

周佩华, 田均良等人在野外将 REE 沿坡面分段布设, 成功地测定了坡面侵蚀的垂直分布规律^[4-6]。刘普灵等在室内利用 REE 沿坡面不同深度分层布

设, 研究了人工次降雨条件下坡面片蚀和细沟侵蚀的演变过程^[7]。

定量分析坡面不同区段和不同深度的侵蚀演变规律, 以上都是在不同次降雨、不同下垫面条件下分别进行。然而坡面侵蚀是一个立体的侵蚀空间, 既有来自坡上、坡中和坡下部不同区段的侵蚀, 同时又有来自坡面不同深度的侵蚀。全面地认识坡面侵蚀的演变规律, 需要在同一实验中, 对坡面不同深度和不同区段的侵蚀演变规律同时进行定量分析。

该项研究正是通过沿坡面垂直分段和分层结合布设不同稀土元素, 研究侵蚀的时空演变规律, 从而深刻地了解坡面侵蚀发生的动态过程, 为建立基于物理过程的侵蚀预报模型有关参数的确定提供新的研究手段。

1 实验方法与分析精度

1.1 施放量计算

本实验选取具有典型代表性的黄绵土作为供试土壤。在保证测试精度的前提下, 兼顾实验成本和和应用前景, 本实验选取了 Eu_2O_3 , Yb_2O_3 , Tb_2O_3 , Sm_2O_3 ,

Nd_2O_3 , CeO_2 , La_2O_3 这 7 种稀土元素氧化物作为示踪材料。各种元素的施放浓度和氧化物施放量的计算见《土壤侵蚀稀土元素示踪法操作技术研究》一文(刘普灵等)^[8]。

元素施放浓度、氧化物施放量及其供试土壤中的稀土元素背景值如表 1 所示。

表 1 示踪氧化物施放指标

化学式	Eu_2O_3	Yb_2O_3	Tb_2O_3	Sm_2O_3	Nd_2O_3	CeO_2	La_2O_3
元素施放浓度/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	36 000	64 000	17 600	180 000	360 000	400 000	640 000
纯度/%	99.990	99.90	99.990	99.900	99.000	99.990	99.950
元素背景值/($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	1 200	2 400	0 660	6 000	36 000	60 000	32 000
氧化物施放量/g	0.250	0.875	0.373	5.016	61.091	112.075	256.698

1.2 实验布设

本实验在中国科学院水土保持研究所土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室人工模拟降雨大厅进行, 小区规格为 $500 \text{ cm} \times 100 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ (长 \times 宽 \times 深), 沿坡面将小区分上层(1 cm)和下层(19 cm); 沿垂直方向将小区分为 4 段, 各段长度从坡角起依次为 50, 100, 150, 200 cm ^[9-10]。为保证结果可靠性和演变规律的研究精度, 供试土壤全部均匀施放不同的稀土氧化物, 实验全过程以 1 min 为时段接取全部水沙样。

依据不同稀土元素土壤背景值和检测灵敏度差异, 从坡角起稀土氧化物施放次序依次为: 表层 Eu_2O_3 , Yb_2O_3 , Tb_2O_3 , Sm_2O_3 ; 下层 Nd_2O_3 , CeO_2 , La_2O_3 , 下层最后一段为空白土。为便于比较, 室内试验与野外小区布设坡度、土壤容重尽量保持一致, 小区坡度为 22° ; 土壤容重约 1.32 g/cm^3 (图 1)。

1.3 降雨试验与样品处理

室内人工模拟降雨试验采用雨强为 90 mm/h , 降雨历时以小区坡角处侵蚀到示踪下界面为止, 实验小区迎雨面积为 4.64 m^2 。降雨产流后记录侵蚀状况并进行摄影。降雨期间每隔 1 min 接取全部水沙样, 试验结束采集坡面沉积样。所有泥沙样品经风干后在 105°C 烘干 8 h, 粉碎研磨至 60 目, 并将部分泥沙样研磨粉碎, 搅拌均匀, 取样以备 NAA 分析使用。

1.4 分析精度

为了保证分析精度, 在每批样品中加入国际通用的标准参考物质(GSS—2, GSS—7, GSS—8)作为质控样品。通过将标准样品分析值与保证值进行比较, 达到分析精度控制的目的^[11]。表 2 列出了本次实验 NAA 对所选稀土元素的检测值以及质控样品的分析结果。可以看出: 中子活化分析对相关稀土元素的检测误差能够满足分析精度的要求, 分析结果有较高的准确度。

2 结果与分析

2.1 侵蚀率计算

侵蚀过程泥沙样品中不同稀土元素的含量确定后, 坡面不同部位侵蚀率 L_i^j (kg/m in) 按下式计算:

$$L_i^j = (M_{ij}^j - B_i) O_j^i / E_i \quad (1)$$

式中: j ——取样时刻; i ——第 i 种稀土元素示踪区; M_{ij} —— j 时刻第 i 种示踪稀土元素的测试浓度 (mg/kg); B_i —— i 元素背景值 (mg/kg); O_j —— j 时刻侵蚀率 (kg/m in); E_i —— i 元素施放浓度测试值 (mg/kg)。则 j 时刻侵蚀率 L_j (kg/m in) 为:

$$L_j = L_i^j \quad (2)$$

在 j 时刻, 第 i 种稀土元素示踪区的侵蚀贡献率 D_i^j (%) 的计算公式为:

$$D_i^j = 100 L_i^j / L_j \quad (3)$$

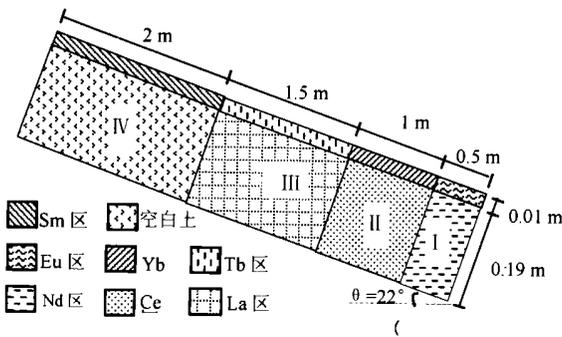


图 1 实验布设示意图

根据稀土氧化物施放量、土壤容重及土壤水分, 分别称取各示踪区稀土氧化物和土壤重量, 采用逐级稀释均匀混合后依照各区规格从下层到上层布设好小区。为了减少人为扰动因素, 静置 30 d 后再降雨实验。实验小区静置期间, 每隔 10 d 微喷 1 次, 保证降雨前土壤含水量与自然状态基本一致, 以备试验。

表 2 质控样品的中子活化分析结果

元素	GSS—2			GSS—7			GSS—8		
	检测值	标准值	误差/%	检测值	标准值	误差/%	检测值	标准值	误差/%
Eu	2.98	3.00	4.10	3.42	3.40	3.80	1.15	1.20	4.20
Yb	2.23	1.97	4.70	2.08	2.40	5.10	2.75	2.80	1.80
Tb	0.86	1.00	11.30	1.48	1.30	12.40	0.68	0.89	23.20
Sm	17.40	17.70	0.40	10.40	10.30	0.50	6.34	5.90	7.50
Nd	208.00	210.00	9.60	45.50	45.00	13.20	28.40	32.00	11.30
Ce	400.00	400.00	1.30	106.00	97.00	1.50	68.90	66.00	4.40
La	165.00	164.00	0.80	46.80	45.00	1.00	35.00	35.50	1.40

2.2 次降雨条件下坡面侵蚀的空间演化

图 2 表示了雨强为 85mm/h, 降雨历时为 58min 的条件下片蚀、细沟侵蚀和坡面不同部位的侵蚀率。根据各区上下层的示踪结果, 也可得出每一区片蚀和细沟侵蚀率演变的量化关系。图 2 表明, 产流开始约 20min 后, 径流寻找适宜细沟汇集成小股状水流, 由于股状水流流速增大, 促使相邻纹沟连接, 并吞, 形成主细沟。此后片蚀沿坡角从下而上继续发生, 但相对于片蚀, 细沟侵蚀一直处于主导地位。20min 后的侵蚀率曲线表明, 片蚀和细沟侵蚀的增减基本是同步进行。证明片蚀导致小跌穴的形成, 从而促使细沟发育; 细沟的溯源侵蚀又增加片蚀。反之亦然。

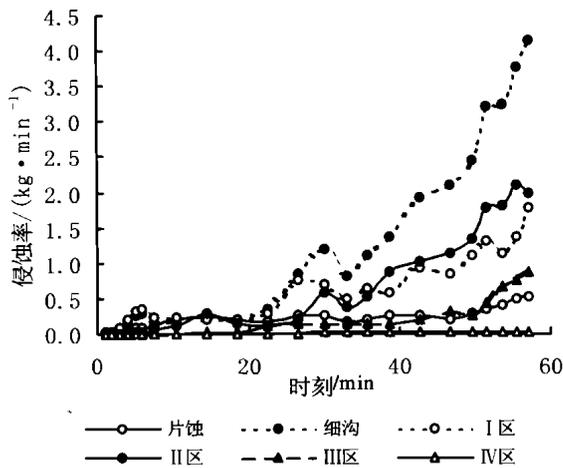


图 2 各示踪带侵蚀率曲线图

各区的侵蚀率消涨关系表明, 产流约 28min 内, I 区下层侵蚀带比较活跃, 处于加速增长。28min 后随着溯源侵蚀和坡面上部跌坎的产生, II 区侵蚀开始活跃, 其侵蚀率涨幅开始超过 I 区而占据主导地位。进一步细化各区片蚀和细沟侵蚀率的演变关系, 以 I 区为例, 试验表明, 产流开始后约 20min 内, I 区片蚀活跃, 这一阶段径流泛坡面而下, 以片蚀、小跌穴和近坡角纹沟发育为主。20~ 28min, 随着主细沟在 I 区的形成, I 区细沟侵蚀率急剧增长而片蚀率随之下降。随着主细沟出现, 坡面以溯源侵蚀为主。

II 区的侵蚀加速过程较 I 区有一个较明显的滞

后现象, 可能是由于主沟内的每一次加速下切都会导致随后溯源侵蚀的加速。利用公式(3)计算出各示踪区侵蚀贡献率(即不同示踪区在各时刻侵蚀中的百分含量), 侵蚀贡献率曲线如图 3 所示。

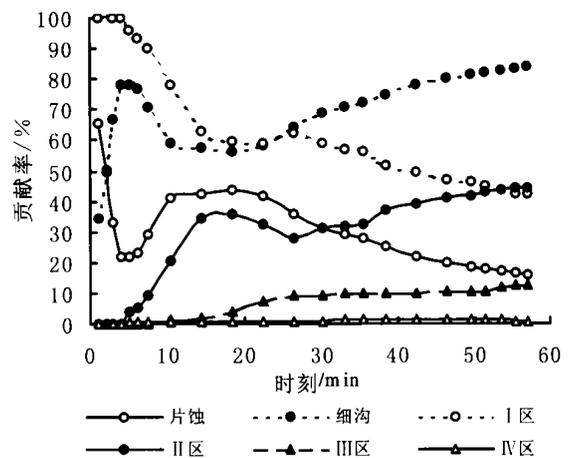


图 3 各时间段不同示踪带侵蚀贡献率

显而易见, 实验全过程细沟侵蚀贡献率呈现出短期增加—下降—相对稳定—升高的趋势, 这一过程有细沟本身增减的作用, 也有片蚀增减反作用的影响。例如细沟侵蚀率在 30~ 33min 下降, 而此时片蚀侵蚀率同样下降(如图 2), 因此在这一时间段中, 细沟的相对侵蚀量(即贡献率)并未减少。其它示踪区侵蚀贡献率的变化同样是自身增减和它区侵蚀增减共同作用的结果。产流 1~ 3min 细沟侵蚀贡献率由 35% 急剧升至 80%, 这是由于径流汇集在坡角形成跌水侵蚀所致, 此时片蚀贡献率相应减少。跌水侵蚀过后, 坡面暂时稳定, 这时雨滴的击溅使片蚀贡献率升高, 至 20min 细沟开始发育, 同时片蚀也在增加, 因此导致片蚀和细沟侵蚀存在一个约 10min (降雨 10~ 20min 内) 的相持阶段。然后细沟继续下切(如图 2, I 区的侵蚀率波动增加), 细沟侵蚀量继续升高, 这时 II 区的侵蚀率增幅开始大于 I 区, 说明溯源侵蚀已经开始占据主导地位。并使得细沟侵蚀贡献率持续上升, 而片蚀贡献率则相应下降。

细沟和片蚀贡献率主要是由 I 区和 II 区提供的。

结合 I、II 区片蚀和细沟侵蚀演变的量化关系, II 区侵蚀贡献率在产流后 3~15 min 由于 I 区侵蚀率的平稳, 使得 II 区的侵蚀贡献率上升幅度较大, 而 I 区的侵蚀贡献率则相应下降。此后两区同时出现片蚀和小跌穴, 其侵蚀贡献率基本处于相持阶段。28 min 后随着沟头溯源至 II 区, 其侵蚀贡献率开始向 I 区的贡献率逼近, 并在 54 min 后超过 I 区而成为坡面侵蚀的主要来源。III 区的侵蚀贡献率变化与此类似。从坡角沿坡面而上, 各区侵蚀贡献率随着溯源侵蚀的发育依次出现上升趋势。沟头的溯源侵蚀和径流在沟头处的汇集, 使得沟头将坡面一分为二, 沟头以下为侵蚀活跃带, 沟头上则显得平稳。

2.3 连续降雨条件下坡面侵蚀的空间演变

初次降雨后, 坡面近坡角区域细沟已经充分发育, 因此连续小雨强降雨 ($I = 60 \text{ mm/h}$) 的坡面以溯源侵蚀为主, 侵蚀过程较初次降雨要平稳得多。降雨后期坡面趋于稳定状态 (图 4)。

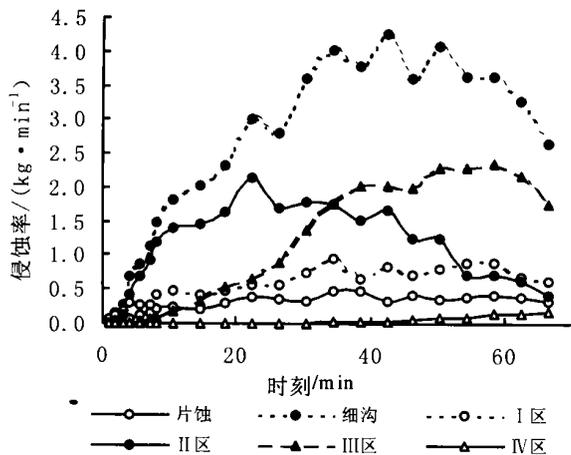


图 4 连续小雨强降雨侵蚀率曲线

连续小雨强降雨条件下, 沟头已经上溯至 III 区, 而 I 区和整个坡面的片蚀率则处于相对稳定状态。产流开始, 细沟主要在 II 区下切和拓宽, 细沟侵蚀率明显随该段细沟的发育而加速, 至 10 min 时, 沟头被激活, 使 III 区侵蚀率加速上升, 这时 II 区则处于相对稳定状态, 侵蚀率开始缓慢下降。表明沟头的出现是导致坡面不同部位侵蚀活跃的重要因素。产流 35 min 后, III 区侵蚀率超过 II 区, 再经 34~39 min 的短暂上升, 开始平稳下来。40 min 后, 侵蚀至下垫面, 此时坡面趋于稳定, 侵蚀不再增加。产流 61 min 后, 整个坡面的侵蚀率开始下降。实验结束, 坡面上部 IV 区只有少量片蚀和跌坎出现, 说明坡顶部可能存在一个相对稳定区, 坡面细沟溯源不会至此。

3 结 论

(1) REE 示踪技术对定量研究坡面侵蚀时空演化过程, 具有较高的准确度。(2) 小跌穴的出现是导致坡面不同部位侵蚀活跃的关键因素, 随着小跌穴的出现, 沟头将坡面侵蚀一分为二: 沟头以下为侵蚀活跃带, 沟头以上则显得平稳。(3) 坡面侵蚀一般存在一个由片蚀—近坡角纹沟发育—溯源侵蚀—相对稳定状态的动态演化过程, 每个阶段中相应侵蚀形态占据主导地位。降雨初期, 片蚀和近坡角部位的纹沟发育, 径流汇集形成主细沟后, 溯源侵蚀成为侵蚀加剧的关键因素, 这一阶段片蚀和细沟侵蚀的增加与减少一直同步进行, 证明片蚀促使细沟发育, 细沟的溯源侵蚀又增加了片蚀量, 反之亦然。

[参 考 文 献]

- [1] Menzel, R G. Transport of ^{90}Sr in runoff[J]. Science, 1960, 131: 499—500
- [2] Simpson H J, et al. Man-made radionuclides and sedimentations in the Hudson River estuary[J]. Sciences, 1976, 194
- [3] Zhang X C, Nearing M A, et al. Using rare-earth oxide tracers for studying soil erosion dynamics[J]. Soil Sci Soc Am. J, 2003, 67: 279—288
- [4] Knaus R W, VanGent D L. Accretion and channel impacts in a rapidly eroding accretion [J]. Estuaries 1989, 12(4): 269—283
- [5] Tian Junliang, Zhou Peihua, Liu Puling. REE tracer method for studies on soil erosion[J]. Intern. Journal of Sediment Research, 1994, 9(2).
- [6] Shi Hui, Tian Junliang, et al. A Study on sediment sources in a small watershed by using REE tracer method[J]. Science in China (Series E), 1997, 40(1).
- [7] Song Wei, Liu Puling, et al. Use of rare earth element method to study erosion in sloping land [J]. J. Rare Earths, 2003, 21(5).
- [8] 刘普灵, 田均良, 周佩华, 等. 土壤侵蚀稀土元素示踪法操作技术研究[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 10—16
- [9] 张科利. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 41—45
- [10] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀的发生、发展和防治途径的探讨[J]. 水土保持学报, 1987, 1(1): 36—48
- [11] Sun Jingxin, Jervis R E. Multi-element NAA of Chinese standard rocks and soils, and NBS standards[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Nuclear Methods in Environmental and Energy Research, Puerto Rico, U. S. A., 1984, 394—405