

利用 REE 示踪技术研究次降雨坡面侵蚀

薛亚洲, 刘普灵, 杨明义, 琚彤军

(土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室 / 中国科学院水利部水土保持研究所 / 西北农林科技大学, 杨凌 712100)

摘要: 在室内设立坡面小区, 分区布设不同的稀土氧化物, 通过人工模拟降雨, 定量研究次降雨条件下坡面侵蚀的演变过程, 讨论了 REE 示踪技术对研究坡面侵蚀的可行性。结果表明, REE 示踪技术对定量研究土壤侵蚀具有较高的精确度, 其对侵蚀量的监测误差 < 13.5%; 降雨前期, 片蚀与细沟侵蚀发育程度基本相当, 其侵蚀平均加速度、平均侵蚀率之比分别为 1:1.4 和 1:2.4; 后期细沟侵蚀占据坡面侵蚀的主导地位, 其侵蚀平均加速度和平均侵蚀率分别是片蚀的 15 倍和 9 倍; 试验结束, 细沟侵蚀占据坡面总侵蚀的 90%; 坡面下 1/3 区域为侵蚀活跃带。

关键词: 坡面侵蚀; 侵蚀过程; REE 示踪技术

A Study of Slope Land Soil Erosion Process Under One Rainfall Event Using Rare Earth Element Tracers Technology

XUE Ya-zhou, LIU Pu-ling, YANG Ming-yi, JU Tong-jun

(State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau / Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources/Northwestern Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100)

Abstract: A simulated slope plot was set up indoor. By placing different rare earth oxides in different soil depth and different section across the plot, one simulated rainfall event was applied to quantify the erosion process. The feasibility of rare earth elements (REE) tracer technology used in soil erosion study was also discussed. The results indicated that REE tracer technology had high precision and could be used to quantify soil erosion changing with time and space. The error between calculated value and measured value was below 13.5%. Within earlier rainfall course, the development degree of sheet and rill erosion was equal in general. The ratio between average erosion acceleration and average erosion rate in sheet erosion and rill erosion was 1:1.4 and 1:2.4 respectively. In the following rainfall course, rill erosion was dominant in the total erosion. Its average erosion acceleration and average erosion rate was 15 times and 9 times of sheet erosion, respectively. At the end of experiment, rill erosion took up 90% of the total erosion. The section of slope bottom occupying about 1/3 of slope area was an active erosion segment.

Key words: Slope land erosion; Erosion process; REE tracer technology

土壤侵蚀是全球关注的重大而又复杂的环境问题。利用示踪技术, 通过示踪元素含量的分异来定量研究土壤侵蚀发生和分布规律, 对深入研究土壤侵蚀机理提供了有力的技术支持。

利用稀土元素 (rare earth elements, REE) 示踪来定量监测坡面侵蚀的演变过程, 比其它示踪剂具有较大的优越性^[1~3]。自 20 世纪 90 年代开始,

国内外田均良等人^[4~7]利用稳定性稀土元素氧化物 (REE oxide) 示踪技术, 成功地测定了坡面侵蚀垂直分异规律; 宋炜等^[8]则采用分层布设 REE 的方法, 研究了次降雨下坡面片蚀向细沟侵蚀的演变规律。然而坡面侵蚀是一个立体的侵蚀空间, 既有来自坡上、坡中和坡下部的侵蚀, 又有来自坡面不同深度的侵蚀, 因此需要对坡面水平方向和垂直方向

收稿日期: 2003-12-25

基金项目: 国家自然科学基金重点基金资助项目(40335050)、中国科学院知识创新重要方向资助项目(KZCX3-SW-422)和国家“973”计划资助项目(2002CB11502)

作者简介: 薛亚洲(1969-), 男, 陕西华县人, 硕士研究生, 主要从事水土保持新技术、新方法研究。Tel: 029-87018719; E-mail: xueyazhou@163.com

的侵蚀演变过程同时展开研究。

与以往试验相比, 该项研究正是通过沿坡面多层多区段同时布设不同的稀土氧化物, 在同一试验中, 相同人工降雨和立地条件下对坡面水平和垂直高侵蚀的时空演变展开研究, 从而深刻地了解坡面侵蚀发生的动态过程, 为建立侵蚀预报物理模型和计算机模拟提供新的研究手段和科学依据。

表1 供试土壤颗粒组成

Table 1 Grain components of soil used in experiment

粒径 Grain size (mm)	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	< 0.001
百分比 Percentage (%)	0.006	4.68	71.39	6.14	7.24	10.54

进行。建立长×宽×深=500 cm×100 cm×20 cm的试验小区。试验坡度为22°, 土壤容重1.32 g·cm⁻³, 均与野外对比研究小区一致。试验布设如图1所示。

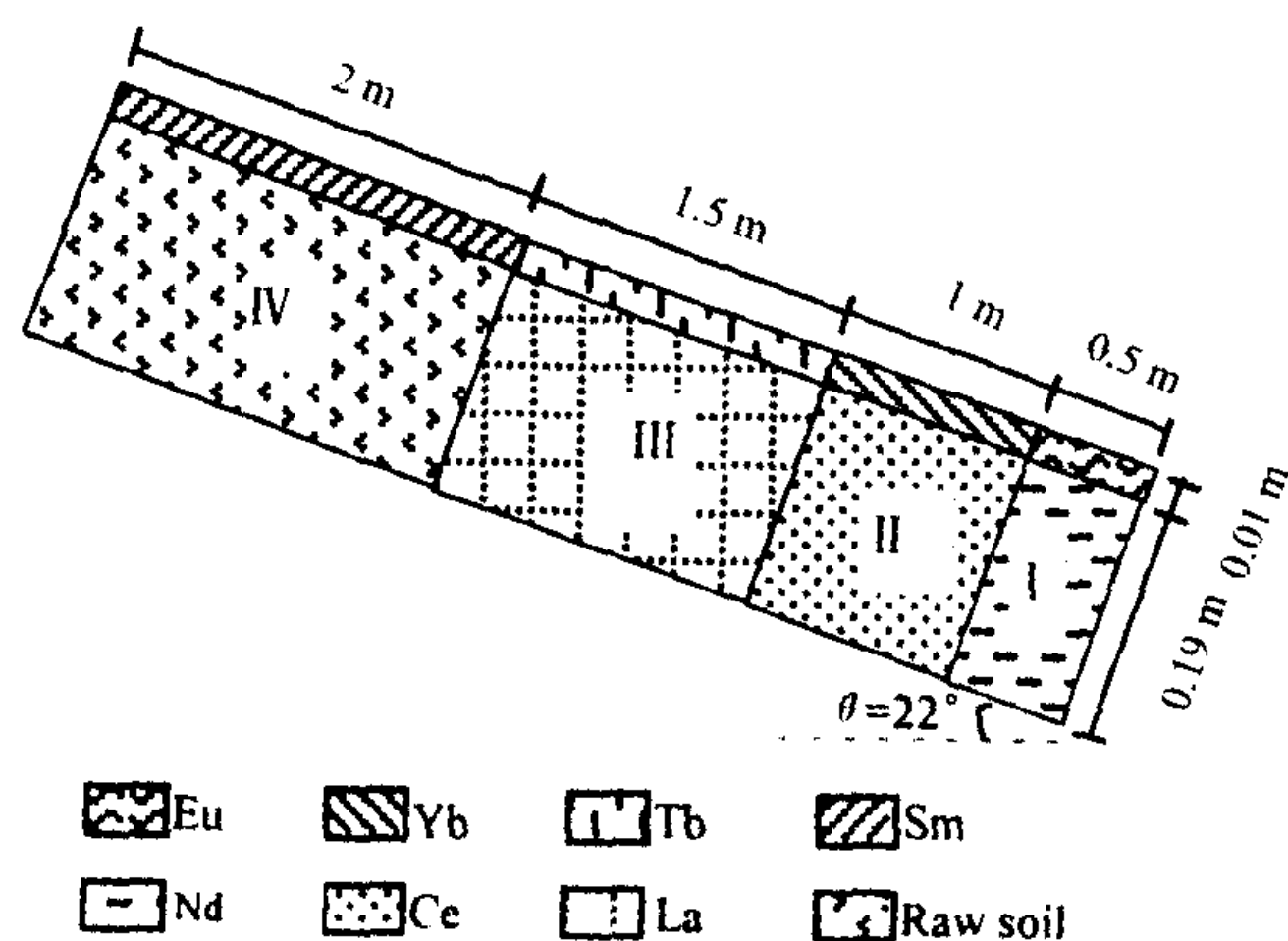


图1 试验设计示意图

Fig.1 Schematic figure of experiment setup

在保证测试精度的前提下, 兼顾试验成本和应用前景, 并依据所选稀土元素不同的检测灵敏度和研究目标区的土壤背景值, 从坡脚起依次选择施放: 上层 Eu₂O₃, Yb₂O₃, Tb₄O₇, Sm₂O₃; 下层 Nd₂O₃, CeO₂, La₂O₃, 下层最后一段为空白土。元素施放浓度和氧化物施放量的计算见参考文献^[9]。

发生细沟侵蚀的临界深度, 即由片蚀到细沟侵蚀的转变深度一般为0.8~1 cm^[10], 细沟深度一般为1~20 cm^[11]。因此, 本试验中小区上、下层厚度分别为1和19 cm, 发生在上层Eu、Yb、Tb、Sm 4种元素示踪区的侵蚀属于片蚀, 而下层示踪区侵蚀为细沟侵蚀。考虑到本试验条件下侵蚀产沙由坡顶一坡脚递增, 以及可供选择的REE数量, 确定将小区分为4段, 长度从坡脚起依次为0.5、1.0、1.5和2.0 m, 用于定量研究溯源侵蚀发育规律。

1 试验方法与分析精度

1.1 供试土壤

试验选取黄土高原侵蚀区黄绵土作为供试土壤。供试土壤的颗粒组成如表1所示。

1.2 试验设计

本试验在土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室

为保证结果的可靠性和精度, 采用全坡面均匀施放稀土氧化物, 并在试验全过程以1 min为时间段接取全部水沙样。为了减少人为扰动因素, 静置30 d后再做降雨试验。

1.3 人工降雨

本试验设计3种雨强: 1.0、1.5、2.0 mm·min⁻¹。降雨历时以小区坡脚处侵蚀到示踪下界面为止。试验小区静置期间, 每隔10 d微喷1次, 保证土壤降雨前期含水量与研究目标区雨季前15%的含水量基本一致。

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^[12]。表2列出了本次试验中子活化分析(INAA)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: INAA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

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(kg·min⁻¹)按下式^[13]计算:

$$L_j^i = \frac{(M_j^i - B^i) O_j}{E^i} \quad (1)$$

其中, j 表示取样时刻, i 表示第 i 种稀土元素示踪区。 M_j^i 表示 j 时刻第 i 种示踪稀土元素的测试浓度(mg·kg⁻¹), B^i 为 i 元素背景值(mg·kg⁻¹), O_j 为 j 时刻侵蚀率(kg·min⁻¹), E^i 为 i 元素施放浓度

表2 质控样品的中子活化分析结果

Table 2 Results of analysis of INAA (mg·kg⁻¹)

元素 REE	GSS-2			GSS-7			GSS-8		
	检测值 Measured value	标准值 Standard value	误差 Error (%)	检测值 Measured value	标准值 Standard value	误差 Error (%)	检测值 Measured value	标准值 Standard value	误差 Error (%)
Eu	2.98	3	4.1	3.42	3.4	3.8	1.15	1.2	4.17
Yb	2.23	1.97	4.7	2.08	2.4	5.1	2.75	2.8	1.79
Tb	0.863	1	11.3	1.48	1.3	12.4	0.684	0.89	23.15
Sm	17.4	17.7	0.4	10.4	10.3	0.5	6.34	5.9	7.46
Nd	208	210	9.6	45.5	45	13.2	28.4	32	11.25
Ce	400	400	1.3	106	97	1.5	68.9	66	4.39
La	165	164	0.8	46.8	45	1	35	35.5	1.41

测试值(mg·kg⁻¹)。

j 时刻坡面侵蚀率 L_j (kg·min⁻¹) 为 i 个元素示踪区侵蚀率 L_j^i 对 i 加和, $i=1\cdots\cdots 7$ 。即:

$$L_j = \sum L_j^i \quad (2)$$

2.2 平均侵蚀加速度

平均侵蚀加速度定义为: 在侵蚀速率曲线近似沿直线变动的区间, 末侵蚀速率(L_2^i)与初侵蚀速率(L_1^i)的差值与相应时间段($T_2 - T_1$)的比值, 单位为 kg·min⁻²。根据定义, i 示踪区的平均侵蚀加速度 a^i 用下式计算:

$$a^i = \frac{L_2^i - L_1^i}{T_2 - T_1} \quad (3)$$

2.3 侵蚀贡献率

j 时刻, i 示踪区侵蚀贡献率 D_j^i (%) 为 j 时刻 i 元素示踪区的侵蚀率 L_j^i 占该时刻坡面侵蚀率 L_j 的百分率:

$$D_j^i = \frac{100 L_j^i}{L_j} \quad (4)$$

各符号含义同公式(1)和(2)。

2.4 REE 示踪计算值和实测值的误差

试验中IV区只有少量片蚀, 几乎不出现跌坎, 在次降雨条件下可忽略IV区下层空白土的侵蚀量来评估REE计算值与实际测量值之间的最大误差。从表3可以看出, 利用公式(2)计算所得的侵蚀率和实际观测值之间都能够较好地吻合。说明REE示踪技术对研究土壤侵蚀具有较高的准确度。

2.5 次降雨条件下坡面侵蚀的空间演变过程

以雨强 1.0 mm·min⁻¹, 降雨历时 90 min 试验为例, 其片蚀、细沟侵蚀和各区侵蚀率如图2所示。

降雨 10~63 min 期间, 细沟侵蚀平均加速度达到 0.06 kg·min⁻², 而此阶段前后均只有 0.01 kg·min⁻²; 片蚀平均侵蚀加速度在前 10 min 为 0.007 kg·min⁻², 此后处于 0.004 kg·min⁻² 左右, 变化不

表3 侵蚀率计算值与实测值比较

Table 3 Comparison of calculated value to measured value of erosion rate

	时间 Time (min)				
	8	18.5	27	41	7
计算值 Calculated value(kg)	1.23	6.36	11.83	31.65	11
实测值 Measured value(kg)	1.21	7.09	12.46	31.32	9.7
误差 Error (%)	2.13	-10.19	-5.04	1.05	13.40

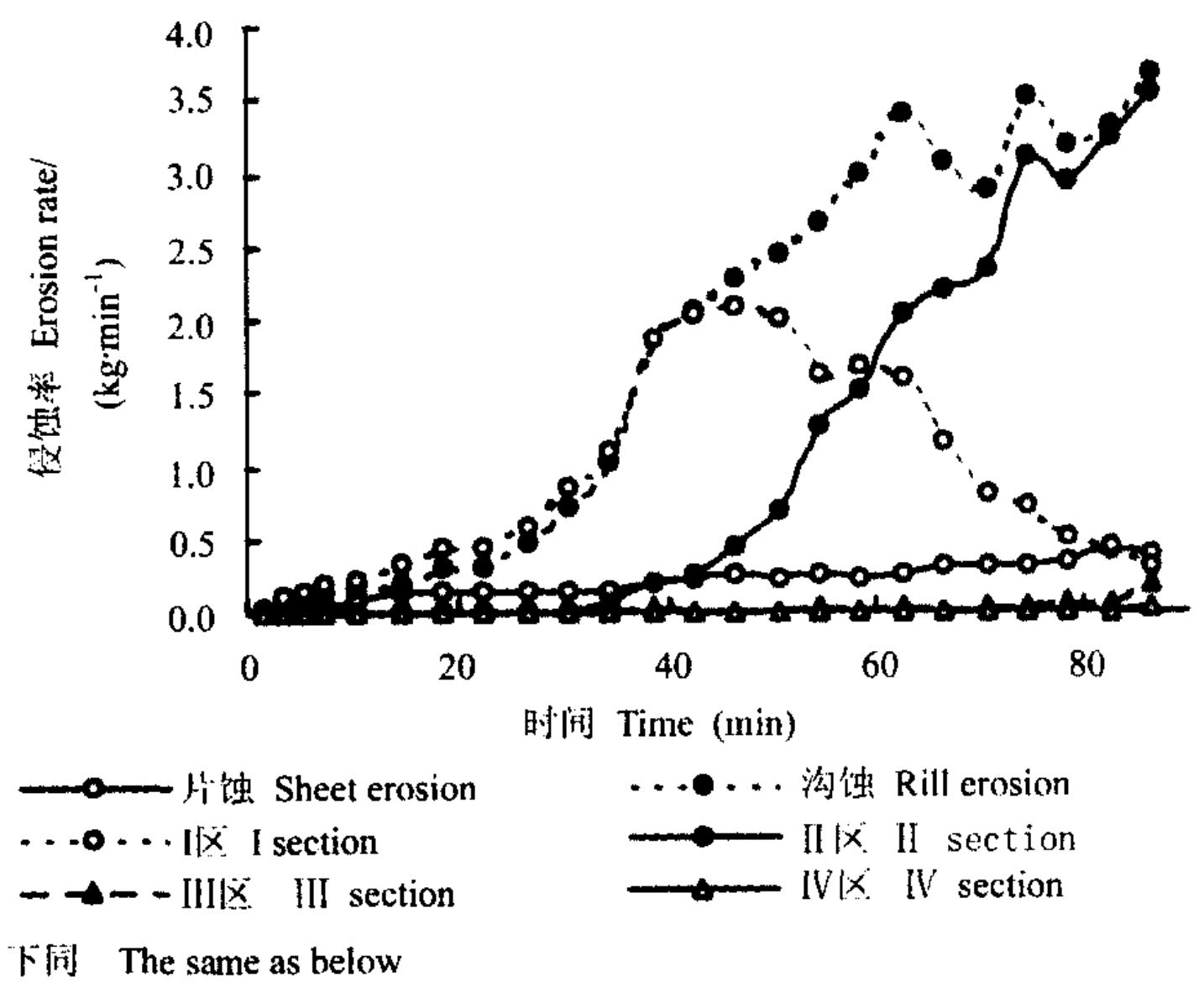


图2 侵蚀率曲线

Fig.2 Erosion rate

大。表明降雨 10 min 后细沟侵蚀一直处于主导地位。降雨 35 min 内, 片蚀和细沟侵蚀几乎全部来源于 I 区; 35 min 后, 沟头进入 II 区, 随着溯源侵蚀和坡面上部跌坎的产生, II 区侵蚀率开始以 0.07 kg·min⁻² 的平均加速度递增, 与细沟侵蚀的平均加速度 (0.06 kg·min⁻²) 基本相当。表明占据坡面侵蚀主导地位的细沟侵蚀在 35 min 后至降雨结束期间, 主要在距坡脚 50~150 cm 区域发育。与此同时, I 区侵蚀率则开始趋缓并减少。从演变趋势看, 继续降雨, III 区和 II 区将出现以上类似迭代。

各示踪区侵蚀贡献率曲线(图3)中, 试验小区坡面底部存在一个陡坎, 使得产流一开始坡脚就被径流冲出沟槽, 因而细沟侵蚀贡献率在产流开始高达85%, 坡脚沟槽出现后, 坡面暂时稳定, 雨滴击溅使片蚀贡献率在15 min时升至34%, 此时细沟侵蚀贡献率则下降到66%。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。15 min后沟头开始上溯, 细沟侵蚀开始占据坡面侵蚀的主导地位, 片蚀贡献率相应下降, 试验结束时, 细沟侵蚀和片蚀的贡献率分别为90%和10%。

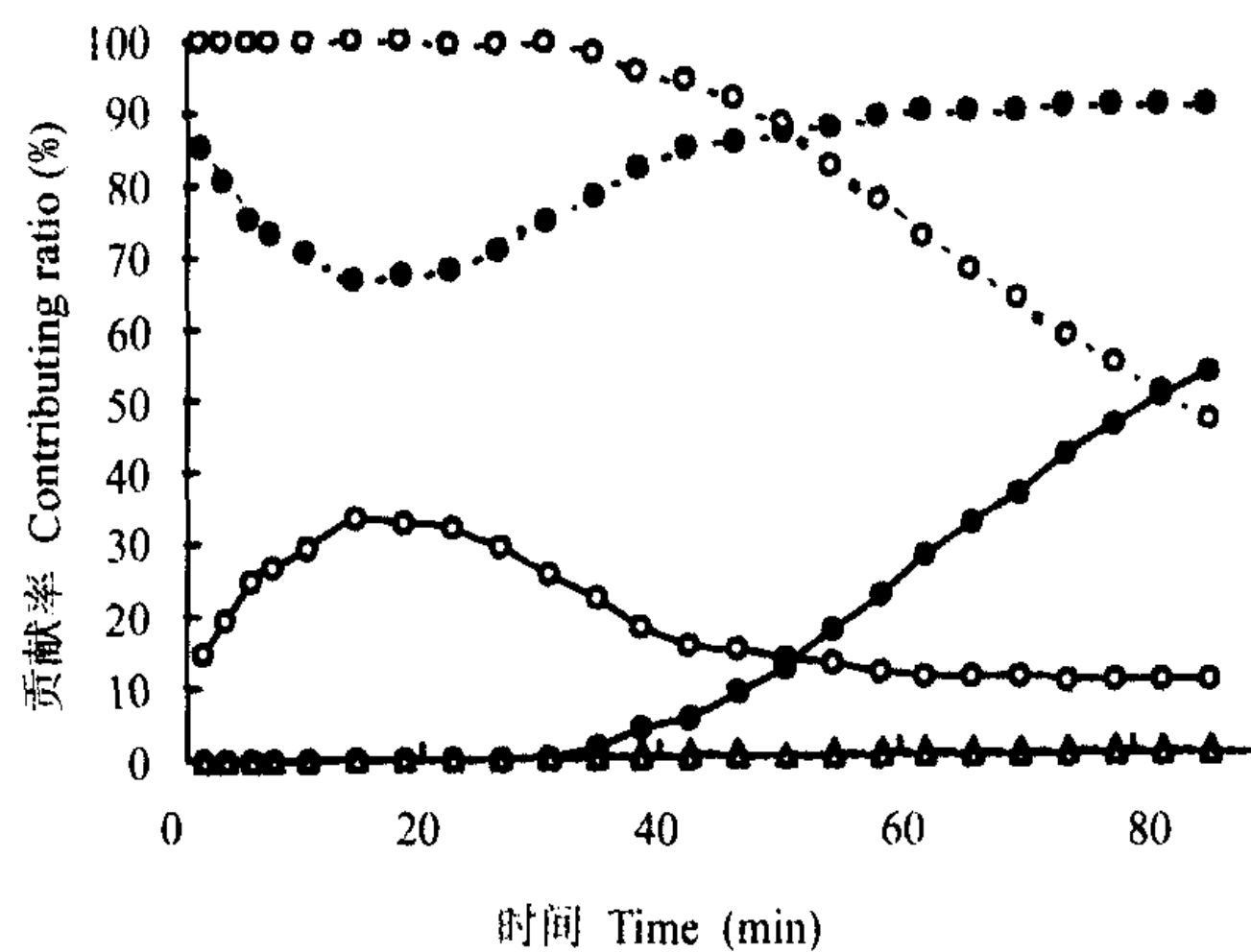


图3 侵蚀贡献率曲线

Fig.3 Contributing ratio of each section erosion

显而易见, 由于坡面侵蚀最初起源于I区, 因此在前35 min内, I区的侵蚀量约占坡面总侵蚀量的100%; 35 min后, 随着细沟的溯源侵蚀, I区的侵蚀贡献率开始下降, 而II区的侵蚀贡献率则开始上升, 试验结束时, I、II区的侵蚀贡献率分别达到46%和53%, III区占1%, IV区处于稳定带。

3 结论

REE示踪技术对定量研究土壤侵蚀具有较高的精确度。

降雨前期, 片蚀与细沟侵蚀发育程度基本相当, 其侵蚀平均加速度、平均侵蚀率之比分别为1:1.4和1:2.4; 后期细沟侵蚀占据坡面侵蚀的主导地位, 其侵蚀平均加速度和平均侵蚀率分别是片蚀的15倍和9倍; 坡脚沟槽出现后, 细沟侵蚀贡献率由66%上升至90%, 而片蚀贡献率由34%下降至10%。

坡面下1/3区域为侵蚀活跃带。本试验结束, I、II区的侵蚀量占到坡面总侵蚀量的99%。

References

- [1] Zhang X C, Friedrich J M, Nearing M A. Potential use of rear earth oxides as tracers for soil erosion and aggregation studies. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65:1508-1515.
- [2] 冉勇. 土壤中稀土元素的化学行为和可给性. 中国科学院南京土壤研究所博士学位论文, 1991.
Ran Y. Chemical behaviors and availability to plants of rare earths in soil. Dissertation for Doctor's Degree. Nanjing: Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, 1991. (in Chinese)
- [3] Liu P L, Tian J L, Li Y Q, Ju T J. REE contents in topsoil on the Loess Plateau and effects REE applying on crops. *Journal of Rare Earths*, 1995, 13(3):221-224.
- [4] Tian J L, Zhou P H, Liu P L. REE tracer method for studies on soil erosion. *Internal Journal of Sediment Research*, 1994, 9(2):101-106.
- [5] Shi H, Tian J L, Liu P L, Zhou P H. A study on sediment sources in a small watershed by using REE tracer method. *Science in China(Series E)*, 1997, 40(1):12-20.
- [6] 刘普灵, 武春龙, 琚彤军, 杨明义. 稀土元素示踪法在坡面土壤侵蚀垂直分布研究中的应用. *水科学进展*, 2001, 12(3): 331-335.
Liu P L, Wu C L, Ju T J, Yang M Y. Study on vertical distribution of soil erosion on Loess slope. *Advances in Water Science*, 2001, 12(3): 331-335. (in Chinese)
- [7] Zhang X C, Nearing M A, Polyakov V O, Friedrich J M. Using rear-earth oxide tracers for studying soil erosion dynamics. *Soil Science Society of America Journal*, 2003, 67:279-288.
- [8] Song W, Liu P L, Yang M Y, Xue Y Z. Use of rare earth element method to study erosion in sloping land. *Journal of Rare Earths*, 2003, 21(5): 587.
- [9] 刘普灵, 田均良, 周佩华. 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):10-16.
Liu P L, Tian J L, Zhou P H. A study for operation technology of using rare earth element to study soil erosion. *Research Soil and Water Conservation*, 1997, 4(2):10-16. (in Chinese)
- [10] 张科利. 坡面细沟侵蚀发生的临界水力条件研究. *土壤侵蚀与水土保持学报*, 1998, 4(1):23-28.
Zhang K L. Study on the critical hydraulics of rill erosion on slope land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1998, 4(1): 23-28. (in Chinese)
- [11] 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. *水土保持学报*, 1987, 1(1):36-48.
Zheng F L, Tang K L, Zhou P H. Discuss to occurrence, process and prevention of rill erosion on slope plantation, *Journal of Soil and Water Conservation*, 1987, 1(1):36-48. (in Chinese)
- [12] 中国科学院高能物理研究所中子活化分析实验室. 中子活化分析在环境学、生物学和地学中的应用. 北京: 原子能出版社, 1992: 51-88.
Neutron Activation Analysis Laboratory Institute of High Energy Physics, Academia Sinica. *Applications of neutron activation analysis in environmental science, biology and geoscience*. Beijing: Atomic Energy Press, 1992: 51-88. (in Chinese)
- [13] 吴普特, 刘普灵. 沟坡侵蚀REE示踪法试验研究初探. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 69-74.
Wu P T, Liu P L. Research on the rear earth element(REE) tracer method of slope-gully erosion. *Research of Soil and Water Conservation*, 1997, 4(2): 69-74.

(责任编辑 李云霞)