

稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀动态过程的降雨模拟试验研究

唐泽军¹, 雷廷武^{1,2*}, 张晴雯², 赵军²

(1. 中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 该文应用稀土元素(REE)示踪法研究土壤侵蚀发生和发展动态过程的方法, 分析了土壤侵蚀沿坡面变化的规律。采用 Dy、La、Sm、Yb、Ce、Eu、Nd、Tb 等 8 个 REE 进行了一系列的人工降雨模拟试验, 并采用 3 个雨强(50, 100 和 150 mm/h)和 5 个坡度(8.74%, 17.63%, 36.4% 和 46.63%), 分 I、II 2 个降雨阶段进行, 定量分析了土壤表面雨水动力特征与土壤侵蚀之间的动态平衡过程, 揭示了土壤侵蚀发生和发展的过程及土壤侵蚀沿坡面分布的规律, 结果表明雨强和坡度越大的条件下, 侵蚀率越大的区段越靠近坡的顶端, 这与细沟发生的部位完全吻合。

关键词: 稀土元素; 模拟降雨; 土壤侵蚀

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2006)03-0032-04

唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀动态过程的降雨模拟试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(3): 32-35.

Tang Zejun, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Rain simulation of dynamic soil erosion processes with rare earth element tracers[J]. Transactions of the CSAE, 2006, 22(3): 32-35. (in Chinese with English abstract)

0 引言

土壤侵蚀是因雨水冲刷而在土壤表层发生的土壤物质位移的作用过程, 它的直接危害是造成土壤生产力的下降、土壤资源的减少、土地荒漠化、直至人类生存环境的恶化。土壤侵蚀是人类面临的日益聚增的威胁之一, 可以说, 人类从开始关注自身生存环境的那一时刻起, 也就开始了对土壤侵蚀的关注。20 世纪 30~40 年代, 早期研究土壤侵蚀的学者之一 Laws 就对降雨的侵蚀作用过程进行了详细的描述^[1], 随后, Ellision 首先完成了降雨及径流对土壤侵蚀的机械作用过程的分析, 建立了土壤侵蚀概念的基本框架, 认为土壤侵蚀由 4 个基本过程构成: (1) 雨滴冲击引起的剥离, (2) 雨滴溅蚀引起的迁移, (3) 土壤表面径流引起的剥离, (4) 土壤表面径流引起的迁移^[2]。Neal 提出了预报土壤侵蚀的多因子的方程式^[3], 这是后来著名的土壤侵蚀模型 USLE 的雏形, 现在许多的土壤侵蚀模型都是在这些概念的基础上发展而来的。土壤模型的合理性与否, 是预测土壤侵蚀的关键, 在美国, 科学家们进行了许多有意义的工作来发展和证实 WEPP 模型, 近些年来, 澳大利亚的科学家 Rose 等人基于土壤侵蚀过程中泥沙的再沉积过程而提出了 ROSE 模型^[4]。然而, 土壤侵蚀包含一系列的连续事件: 土壤颗粒的剥离、携带、运移和沉积, 其机理十分复杂, 由于缺乏适当的试验手段和数据, 要证实

土壤侵蚀的这些模型的概念是十分困难的。大多数的模型都是在土壤表面单位面积上微分的尺度上定义的物质均衡方程, 而土壤侵蚀的数据大都是在集流口处获得的, 这是在整个时间和产流区域积分意义上的量^[5-6]。这意味着是来自不同区域的产沙量数据混合迭加, 而不能从中区分不同区域的产沙及它们之间量的关系, 也不能区分降雨和径流侵蚀之间量的关系, 虽然这些模型都用不同的方程表达了各个不同过程的物理意义, 但剥蚀、迁移和沉积过程之间的定量关系却是不清晰的。也就是说建立土壤侵蚀模型时的物理意义是清晰的, 而用来证实土壤侵蚀模型的实际数据的物理意义却是不明确的。

本文的目的是利用稀土元素(REE)作为示踪剂来研究土壤的降雨侵蚀的基本过程, 通过不同 REE 对土壤物质的标记, 从而揭示土壤物质在剥蚀、携带、迁移和沉积过程中的运动轨迹, 确定不同区域不同地段土壤侵蚀量的大小, 鉴别降雨剥蚀量和径流剥蚀量在土壤侵蚀中的比重关系, 更深入地认识土壤侵蚀的机理, 为更清晰地阐明土壤侵蚀模型的物理意义提供试验依据。

1 试验材料与方法

REE 示踪研究土壤侵蚀是近些年来兴起的方法, 周佩华等在利用 REE 示踪研究黄土高原土壤侵蚀时进行了有益的探索, 提出了一些 REE 示踪法研究土壤侵蚀的操作技术。田君良、吴普特等在野外采用 REE 示踪法进行了全坡面径流小区的土壤侵蚀研究, 深化了对坡面土壤侵蚀垂直分布特征及沙的运移和沉积特点的认识^[7-9]。

REE 的化学性质非常相似, 具有基本相同的表生地球化学行为, 在黄土高原土壤中的背景值比较低而且分布均匀、稳定。REE 难溶于水, 能够被土壤颗粒强烈吸附, 中子活化对其检测灵敏度高, 而且有多种元素可供选择, 便于实现试验的目的, 是较为理想的示踪元素。

收稿日期: 2004-12-21 修订日期: 2005-08-11

基金项目: 教育部科学技术研究重大项目(ZD01-10); 中国科学院“引进国外杰出人才”项目(982602)

作者简介: 唐泽军(1958-), 湖南湘潭人, 博士, 副教授, 主要从事水环境工程研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: tangzejun@sina.com

*通讯作者: 雷廷武(1958-), 湖北红湖市人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境工程及土壤科学研究。北京 中国农业大学水利与土木工程学院, 100083。Email: ddragon@public3.bta.net.cn

1.1 试验装置

试验装置由一液压升降槽和降雨系统组成, 试验槽形状可以任意搭建, 用金属材料构成一个长 8 m×3 m 的试验土槽的框架, 在框架内用 3 mm 厚 PVC 板分隔成 15 个 8 m×0.2 m 的小槽, 每小槽下端连接一集流槽, 供收集径流、采集泥沙样品用。在试验土槽底部顺坡构成相距 0.5 m 的“人”字型排水通道, 以利于渗流的排放。试验土槽如图 1 所示。试验槽坡度变化范围 0~58%。降雨系统由 2 个侧喷系统相互对喷构成, 有效降雨覆盖面积为 13 m×15 m, 雨滴往上侧喷后自由落体降下, 降雨高度 18 m, 雨强变化范围为 20~300 mm/h, 雨滴直径变化范围 0.6~3 mm。

1.2 试验材料

试验土样取自于内蒙古清水河地区耕作表层土, 是典型的黄绵土, 为淡黄色。土壤颗粒以粉沙为主, 粉沙粒占总量的 60% 左右, 黏粒约占 15% 左右, 容重约为 1.2 g/cm³, 土体松软, 有团粒或团块结构。试验前将土样风干并过 1 cm×1 cm 的粗筛, 剔除植物根系等杂物。

试验用的 REE 有 Dy、La、Sm、Yb、Ce、Eu、Nd、Tb 等 8 个元素, 为粉末状的氧化物。采用逐步稀释的方法分别将 8 个 REE 与试验用土混合制成富含 REE 的试验示踪用土, 并取样测定 REE 的含量。

1.3 试验方法

试验由 3 个雨强 (50, 100 和 150 mm/h) 和 4 个坡度 (8.74%, 17.63%, 36.4% 和 46.63%) 相互交叉的 12 个试验构成。每个试验又分 2 个阶段, 在试验的前一阶段的降雨试验完成后, 将试验土样静置 24 h, 再重复前一阶段的降雨试验过程。试验采用 3 次重复。

试验程序如下: 选定试验坡度和雨强。每次降雨试验前进行雨强标定。将试验小槽均匀分成 8 段, 试验槽底部先装 20 cm 厚的细沙, 然后按估计在不同部位的可能侵蚀深度, 在细沙上装 10~12 cm 厚的试验土, 再装 3~5 cm 的 REE 示踪土, 使试验土和 REE 示踪土的厚度正好为 15 cm 厚 (图 1)。细沙与土之间用细纱布隔开 (纱布的作用是下次试验只须换黄土)。装土的容重约为 1.2 g/cm³, 保持与野外耕作土基本相同, 试验土层的结构也与耕作土上部土层结构大致相同。装土完毕后, 将试验槽调整到选定的坡度。开始连续不断的降雨, 一旦开始产流, 立即按 2、3、5、5、5 和 5 min 的时间间隔测定径流量, 同时采取泥沙样并测定产沙量。降雨时间取决于产流时间, 一般在最后一个试验小槽产流 30 min 后停止降雨, 完成第 I 阶段降雨试验。试验土样静置 24 h 后, 重复第 I 阶段降雨试验过程, 实现第 II 阶段降雨试验过程, 完成一组试验。

1.4 REE 样品的分析

REE 样品的分析是在中国原子能科学研究院原型微反应堆上采用中子活化分析方法进行的。中子活化分析是以核反应为基础的核分析方法, 待测样品在反应堆中受一定能量和强流的中子轰击后, 测定由堆反应生成的放射形核素衰变时放出的射线能量和射线强度, 完成 REE 的定性和定量分析。采集的泥沙样经烘干称重后,

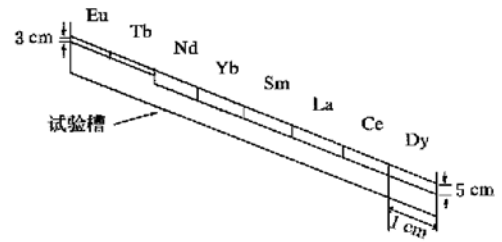


图 1 稀土元素布置示意图

Fig. 1 Disposal of rare earth elements

称取约 60 mg 的样品封装于 1:1 硫酸浸泡处理后的高压聚乙烯薄膜内, 然后热封于同样 1:1 硝酸浸泡处理后的高压聚乙烯辐照管内, 使用多功能气动传输系统送入微型反应堆中辐照。

2 结果与分析

试验土样 REE 背景值及 REE 土壤浓度的测定见表 1, 表明试验土样 REE 背景值低而且分布均匀稳定; 添加了 REE 的土壤的 REE 浓度是均匀稳定的, 与经过计算按比例添加 REE 后所期望的 REE 施放浓度是相吻合的, 说明在试验土壤中加入 REE 的方法和措施是合适的。

表 1 试验土样 REE 背景值和土壤浓度

Table 1 Background value and concentration of REE of experimental soil mg/kg

试验土样	Eu	Tb	Nd	Yb	Sm	La	Ce	Dy
土样 1	1.20	0.68	27.0	2.97	8.88	35.7	63.2	4.62
土样 2	1.13	0.74	27.8	3.32	5.85	32.6	60.3	4.49
土样 3	1.27	0.51	24.1	2.80	5.78	30.3	60.2	4.10
REE 土样 1	27.2	37.7	154.7	13.0	171.4	219.2	240.0	329.0
REE 土样 2	23.0	44.3	194.4	14.3	123.5	235.5	266.5	310.0
REE 土样 3	22.0	42.3	171.5	15.1	166.8	237.5	278.5	290.0

土壤的侵蚀率是土壤侵蚀研究中的核心问题, 可以表述为单位流域面积上单位时间内的土壤侵蚀量 (g/(m·min)), 通常是由越过流域下游边界总的土壤侵蚀量除以流域面积而获得的。显然, 这个单位面积上的土壤侵蚀量是整个坡长从上到下各处侵蚀量之和。现据 REE 示踪土壤侵蚀的试验, 将土壤侵蚀率重新定义为:

$$q_s = \sum Q_{c_j} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中 q_s ——土壤侵蚀率, 单位径流量的沙重, g/(m·min); Q ——径流量, 单位时间单位面积上的水体积, mL/(m·min); c_j ——第 j 种 REE 示踪区段径流中沙的含量, g/mL。

在土壤侵蚀模拟降雨试验中, 通过在坡面从上到下不同部位施放不同的 REE 可以示踪土壤侵蚀的过程, 从而研究坡面不同部位土壤侵蚀的分布规律, 定量地确定坡面从上到下不同部位土壤的侵蚀量。试验措施保证试验土样是均质同性的, REE 标记的土壤厚度大于侵蚀的最大深度, 各个 REE 标记的土壤表面积也是相同的, 同时由于 REE 能够被土壤颗粒均匀地吸附, 所

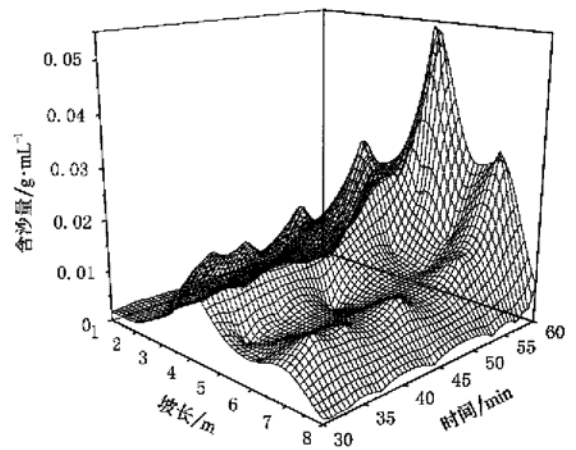
以, REE 是按施放时的浓度均匀地随同剥蚀的土壤进入水中, 由于弥散或扩散等作用, 吸附 REE 的土壤颗粒在水中均匀分布, 最终收集的侵蚀泥沙样中的 REE 也是均匀分布的。另外, REE 的绝对量在剥蚀、迁移和沉积的过程中是不变的, 据平衡的原理, 可求得不同部位土壤的侵蚀量:

$$c_j = e_j \times E_j / C \quad (2)$$

式中 c_j ——第 j 种 REE 示踪区段径流中沙的含量, g/mL; e_j ——第 j 种 REE 示踪区段中第 j 种 REE 的浓度; E_j ——总侵蚀泥沙中第 j 种 REE 的浓度; C ——径流中实测总侵蚀泥沙量, g/mL。

利用上式可以分别求得各示踪区段径流中的含沙量和土壤侵蚀率, 建立不同时刻土壤侵蚀率随斜坡坡长变化的相互关系, 动态地描述土壤侵蚀的时空分布规律。通常, 影响土壤侵蚀的因素有许多, 但最重要的因素有 2 个: 土壤的可蚀性和土壤表面雨水的侵蚀性, 即决定于土壤对侵蚀的敏感性和降雨对土壤侵蚀的能力(雨滴的动能和降雨强度的综合作用), 坡度、坡长和其他一些因素只是改变土壤表面雨水的侵蚀性和土壤的可蚀性, 进而影响土壤侵蚀。对均质土壤来说, 土壤的可蚀性在坡面各处是相同的, 也就是说对土壤侵蚀的影响在坡面各处是相同的, 它只是对土壤侵蚀量的大小有决定作用, 而这个决定因素在坡面各处是一致的, 所以, 土壤的可蚀性对土壤侵蚀沿坡面的变化规律不会产生附加的影响。最终影响土壤侵蚀变化规律的是土壤表面雨水的动力特征, 雨水的动力特征包括降雨的强度、雨滴的大小和动能及径流的运动要素等, 是时间和位置的函数, 它在坡面各处的变化必然引起土壤侵蚀的变化, 而土壤侵蚀沿坡面的变化过程也必然反映雨水的动力特征, 这为研究土壤侵蚀的机理提供了一个很好的切入点。通常情况下, 从集流口或流域沙沉积区获得的土壤侵蚀率是由坡面各处的侵蚀率构成的, 已经模糊了沿坡面土壤侵蚀的变化规律, 不能反映土壤表面的雨水动力特征, 而 REE 示踪能很好地恢复隐含在土壤侵蚀率中的土壤侵蚀沿坡面变化的信息, 把沿坡面各处混合在一起的土壤侵蚀沙区分开来, 清晰地反映土壤侵蚀沿坡面变化趋势, 与雨水动力之间的关系。

图 2 是在雨强 100 mm/h、坡度 36.4% 条件下, REE 示踪土壤侵蚀沿坡面变化及随时间变化趋势图。坡长轴上 1 至 8 依次对应的是 Eu、Tb、Nd、Yb、Sm、La、Ce 和 Dy 的示踪区段。从图 2 可以看出, 土壤侵蚀率随坡长有规律地起伏变化, 产流开始后, 在最初的土壤侵蚀率的构成中, 在坡上部的 1、2 区段的径流中的含沙量很小, 在 0.0015 g/mL 左右; 到 3 区段时, 含沙量开始增大; 在 4 区段达到最大, 为 0.016 g/mL, 随后逐渐减小, 含沙量经过 6 区段 0.004 g/mL 的低值后, 又增大; 在 7 区段达到一个次高点 0.008 g/mL 后再次减小; 最后在 8 区段达到最小值, 为 0.0004 g/mL 左右, 完成一个产沙的过程。在随后的产沙过程中, 这种土壤侵蚀率随坡长变化的趋势没有变化, 只是相应区段径流中的含沙量相应增大。

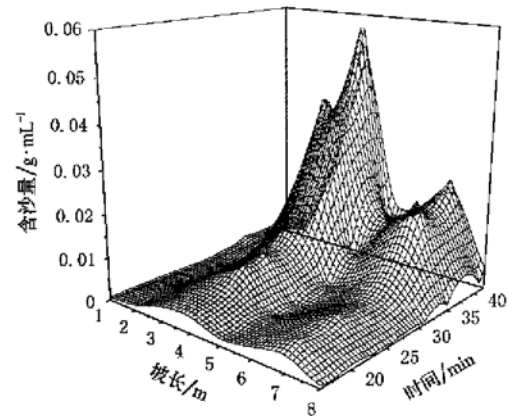


雨强: 100 mm/h; 坡度: 36.4%

图 2 土壤侵蚀沿坡面随时间的变化

Fig. 2 Change of soil erosion along slope with time

从试验后土壤表面的形态特征来看, 细沟的形成部位与坡面土壤侵蚀率分布规律是十分吻合的, 细沟起始于 3 区段中部, 在 4 区段充分发育, 形成两条深约 3~4 cm 的细沟, 在 5 区段细沟深度逐渐变浅, 宽度增大, 6 区段细沟发育很弱, 到 7 区段细沟发育又增强, 但细沟的规模远小于 4 区段的细沟, 在 8 区段, 细沟停止发育。



雨强: 100 mm/h; 坡度: 46.63%

图 3 土壤侵蚀沿坡面随时间的变化

Fig. 3 Change of soil erosion along slope with time

坡面土壤侵蚀率的变化与土壤表面雨水动力特征有着十分密切的关系。一般认为, 在土壤均质、坡面平整的条件下, 土壤表面的径流的厚度和强度从坡面的上端到下部是逐渐增大的, 似乎随着坡面的沿长, 其径流的动能即径流对土壤的侵蚀能力也相应增大, 所以, 土壤侵蚀率从上到下也应该是相应增大的, 然而, 这与本试验所观察到的现象是相矛盾的。显然, 这一般的常识没有深入地认识到土壤表面雨水在侵蚀土壤的过程中其动力特征已经发生了变化。现仍以图 2 为例来说明其动力特征的变化过程, 当降雨达到一定量后, 土壤表面开始形成径流, 在坡面的上部 1、2 区段, 径流的强度和厚度都很小, 不足以对土壤产生侵蚀, 这一区段的土壤侵蚀以雨滴的溅蚀为主; 在 3 区段径流的强度和厚度逐渐增大, 相应聚集了更多的能量, 对土壤的侵蚀力迅速增

大,开始产生细沟侵蚀,在细沟中集中了一部分径流,进一步加大对土壤的侵蚀力,径流中沙的浓度亦迅速增大;在4区段,径流的侵蚀力达到最大,沙的浓度达到了径流此时动能所具有的相应浓度;在5区段,虽然径流量仍然在增加,但径流中沙的浓度减弱了径流的输沙能力,降低了径流的侵蚀力,于是细沟发育减弱,细沟集中和约束的径流开始发散漫流,其动能减小,对土壤的侵蚀力进一步下降;在6区段,在径流量及动能增加的同时,径流中沙的浓度也在增加,增加的能和量更多的是消耗于径流的输沙过程,因此侵蚀力再一次减少;径流的侵蚀力经过5、6区段的连续减少后,进入径流中的沙量减少,所以7区段径流的侵蚀力获得了一定程度的恢复,土壤侵蚀率有所增加,但这个过程很短,随后继续降低。随降雨时间的延长,土壤侵蚀率将增大,并且大侵蚀率对应的区段将会上下扩展。实际上,在土壤侵蚀沿坡面的变化过程中,雨水、沙、土壤这一多相体系中始终存在着能和量相互作用的平衡过程,土壤侵蚀正是这一平衡过程的结果。

坡面土壤侵蚀率的变化是土壤表面雨水与土壤相互作用的结果,客观地反映了雨水动力特征的变化过程。在其他降雨强度和坡度的条件下,试验也表明了坡面土壤侵蚀率类似的变化趋势,一般情况下,坡面土壤侵蚀的变化规律不会改变,但对小雨强小坡度来说,第一个大土壤侵蚀率的峰值会沿坡下移,大雨强大坡度,则会上升。如图3是在雨强100 mm/h和坡度46.63%条件下,REE示踪土壤侵蚀沿坡面变化及随时间变化的趋势,对比图2,虽然降雨强度相同,但坡度增大,土壤表面径流可以在较短的距离获得相对较大的速度,增加径流的动能,所以大侵蚀率对应的区段相应上移。

3 结论

实验室模拟降雨条件下多种REE示踪研究土壤侵蚀过程的方法能够很好地揭示了土壤侵蚀发生和发展

的过程,为深入理解土壤侵蚀的机理提供了一个直观有效的方法。通过REE示踪,清晰地展示了土壤侵蚀沿坡面分布的规律:雨强和坡度越大的条件下,大侵蚀率的区段就越靠近坡的顶端,与细沟发生的部位完全吻合,而且,土壤侵蚀率沿坡面会出现波动。

土壤侵蚀沿坡面的变化过程是土壤表面雨水动力特征随坡面变化的客观反映。同时,土壤表面雨水动力特征沿坡面的变化也改变着土壤侵蚀沿坡面的变化,两者相辅相成,共同演绎着土壤侵蚀的内在物理意义。

[参 考 文 献]

- [1] Laws J O. Recent studies in raindrops and erosion[J]. *Agr Eng*, 1940(21): 431- 433.
- [2] Ellison W D. Studies of raindrop erosion[J]. *Agr Eng*, 1944(25): 131- 136, 181- 182.
- [3] Neal J H. Effect of degree of slope and rainfall characteristics on runoff and soil erosion[J]. *Agr Eng*, 1938(19): 213- 217.
- [4] Proffitt A P B, Rose C W, Hairsine P B. Rainfall detachment and deposition: experiments with low slopes and significant water depths[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1991(55): 325- 332.
- [5] Hairsine P B, Rose C W. Rainfall detachment and deposition: sediment transport in the absence of flow-driven processes[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1991(55): 320- 324.
- [6] Huang C, Wells L K, Norton L D. Sediment transport capacity and erosion processes: model concepts and reality [J]. *Earth Surf Process Landforms*, 1999(24): 503- 516.
- [7] 周佩华, 田均良, 刘普灵, 等. 黄土高原土壤侵蚀与稀土元素示踪研究[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 2- 9.
- [8] 吴普特, 刘普灵, 吴春龙, 等. 坡面侵蚀垂直分布特征动态变化过程初步研究[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 41- 46.
- [9] 田均良. 侵蚀泥沙坡面沉积研究初报[J]. *水土保持研究*, 1997, 4(2): 57- 63.

Rain simulation of dynamic soil erosion processes with rare earth element tracers

Tang Zejun¹, Lei Tingwu^{1,2}, Zhang Qingwen², Zhao Jun²

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, China Agriculture University, Beijing 100083, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: A new idea was advanced to identify the initiation and the development of the dynamic soil erosion processes with the rare earth elements(REE) method under simulated rainfall conditions. A series of experiments were conducted with Dy, La, Sm, Yb, Ce, Eu, Nd and Tb under laboratory rainfall simulator conditions at three different rainfall intensity (50, 100 and 150 mm/h) and four slope gradients (8.74%, 17.63%, 36.4% and 46.63%). Two consecutive rainstorms were applied with a 24 hours interval. The initiation and development of soil erosion along slope was studied. And the dynamic equilibrium of runoff and soil erosion along slope was quantitatively analyzed. This paper revealed clearly the occurrence and development processes of soil erosion, and showed the development of the rill and soil erosion along slope. The results show that soil erosion mainly occurs the upper slope with the bigger rain intensity and slope, which is consistent with the gully erosion.

Key words: rare earth element; rainfall simulation; soil erosion