

REE 示踪法研究土壤侵蚀的室内模拟试验

李雅琦 吴普特 刘普灵 琚彤军

(中国科学院 水土保持研究所 陕西杨陵 712100)
(水利部)

摘 要 通过运用 REE 示踪法对土壤侵蚀垂直分布的模拟试验研究,讨论了 REE 示踪法的基本原理,REE 的选择与施放方法,模拟试验布设技术及示踪法的应用前景。室内试验表明:REE 示踪法不仅可定量测定不同地形部位的相对侵蚀量,而且可揭示降雨过程中各地形部位相对侵蚀量的变化趋势,为野外试验的顺利实施提供了可靠的科学依据。

关键词 REE 示踪法 土壤侵蚀 模拟试验

Simulation Experiments to Study Soil Erosion by REE Tracer Method

Li Yaqi Wu Pute Liu Puling Ju Tongjun

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

Abstract Based on a study of simulation experiments for soil erosion vertical distribution by means of rare earth element(REE) tracer method, basic principles of the tracer method, choice and discharge of REE tracers are discussed in this paper. The technology of experimental design and application future of the method are also presented. Results from the experiments have shown that the REE method is able not only quantitatively to determine relative soil erosion amounts on different topography locations, but also to reveal change tendency of relative erosion amounts on different locations, and to provide reliable scientific bases for the carrying out field experiments successfully.

Key words REE tracer method soil erosion simulation experiment

黄土高原的土壤侵蚀异常强烈,侵蚀类型也十分复杂。由于其内部的土壤侵蚀影响因子与组合的不同,不同地形部位的土壤侵蚀强度和类型都有明显差异。沿垂直方向的土壤侵蚀变化过程,不仅关系到泥沙来源和运移规律的正确分析,而且影响着水土流失的客观评估。因此,分析研究不同地形部位土壤侵蚀的垂直分布,揭示土壤侵蚀的变化规律,对于进行水土保持规划,正确实施水土保持措施,有效地治理水土流失具有重要的意义。

研究土壤侵蚀通常采用的方法有径流小区法、通用流失方程式、遥感、摄影法等,这些研究方法各有其所长和适用性,但因测量精度和适用范围的局限性,对于地形异常复杂的黄土丘陵区进行土壤侵蚀垂直分布定量分析研究则显不足。

研究土壤侵蚀的另一种方法是核技术示踪法,因其定量化程度及可研究的地域范围均优于上述沿用的方法,故受到重视并有较快发展。

国外利用示踪法研究土壤侵蚀已有 20 年的历史。我国从 80 年代开始,利用该方法进行了土壤侵蚀的研究,如张信宝等人利用核爆沉降物 ^{137}Cs 研究小流域泥沙来源,并取得初步成效。但这种方法仅适用于大时间尺度的侵蚀量宏观估算,对于黄土高原陡坡与沟坡的侵蚀分布的现状分析则无能为力。人为施放示踪原子法,由于其可选择的施放地形部位和元素的种类都具有很大的灵活性,适于不同地形部位的土壤侵蚀分布及小流域泥沙来源的定量研究,所以具有实用价值。利用放射性核素示踪法可研究土壤侵蚀,但由于放射性的污染问题,使该方法受到限制。利用稳定性 REE 示踪法研究土壤侵蚀,与上述方法相比,其定量化程度与研究范围更具得天独厚的优越性。

我们借鉴美国 Knaus 等人利用 REE 示踪研究沼泽地的经验^[2],提出了利用 REE 示踪法进行黄土高原土壤侵蚀垂直分布的定量分析研究。为了验证 REE 示踪法研究土壤侵蚀的可行性,并为野外研究工作的顺利实施提供科学依据,首先在室内进行了人工模拟降雨试验,本文就其试验方法及结果作以讨论。

1 试验设计

1.1 试验模型设计

由于黄土高原的地理特征是以坡面与沟坡为基本单元构成了各种复杂的地形区域,为了使我们的试验切合黄土高原土壤侵蚀的实际情况,特设计了两种模拟试验模型,即坡面径流小区及沟坡试验模型。

坡面试验地点选定在水土保持研究所侵蚀实验大厅,试验小区面积为 $6.5\text{m} \times 2.0\text{m}$,坡度控制在 15° ,盛土深度为 50cm ,供试土样采用当地土壤,降雨设备为本所设计的侧喷式降雨设备。选择 Eu、Sm、Ce、La、Nd、Yb6 种 REE 做为示踪元素,分别按段面施放法、条带施放与段面混合施放两种方式进行实验(如图 1)。

沟坡试验选定在水土保持研究所露天试验场,两个试验小区的面积均为 $3\text{m} \times 0.5\text{m}$,小区上半部坡面坡度为 20° ,下半部沟坡坡度为 50° ,选取 La、Ce、Nd、Sm4 种示踪元素,以沟缘线做为沟坡分界线,坡面布设 La、Ce 两种元素,沟坡布设 Nd、Sm 两种元素。元素施放方法按条带施放与点穴施放两种结合进行(如图 2)。

1.2 REE 的示踪方法

利用稳定性稀土元素示踪法研究土壤侵蚀分布,其基本原理是将示踪元素化合物与土壤均匀混合后布设于被研究地区的不同地形部位,使之在整个降雨过程中随径流泥沙一起迁移,尔后采集径流池中的泥沙样品,利用中子活化分析方法测定示踪元素的含量,从而判测泥沙的来源及不同地形部位土壤侵蚀的差异。

1.3 示踪元素选择与施放量

用于土壤侵蚀研究的示踪元素,应具有和土壤有较好的结合能力、不溶于水、不易被植物吸收及不损害生态环境等基本特征,以保证其土壤侵蚀过程中对泥沙的示踪作用。此外,从方

法的精度及实验成本和推广应用前景等方面综合考虑,示踪元素还应具有土壤含量甚微、施加量少且易于识别、探测等特征。鉴此,我们选用了 La、Ce、Nd、Sm、Eu 和 Yb6 种稀土元素作为室内模拟试验示踪元素。

示踪元素的施放量,除考虑研究期间最大可能的侵蚀深度外,泥沙中示踪元素含量应与土壤背景值差异显著。然后根据不同地貌单元、不同侵蚀类型及侵蚀部位计算 REE 施放量^[3]。

1.4 示踪元素的布设方法

1.4.1 段面布设法 首先将坡面沿坡长自上而下等分为 A、B、C 三段,在测定供试土壤 Eu、Sm、Ce 背景值的基础上,按照 REE 浓度估算公式计算不同段 REE 的施放浓度,分别称取相应元素化合物的量,均匀搅拌在供试土壤之中,加入试验小区相应段位,整平,即可开始降雨,进行试验。

1.4.2 条带布设法 条带布设法是基于在某一侵蚀小区的段面之内,总能找到段面内的一个条带,该条带的侵蚀强度接近于该段面的平均侵蚀强度所提出的。

条带布设在原小区,不破坏已有段面布设的元素分布状况,只在原段面内分别加一条带。该条带元素不同于原断面中布设的元素,即可实施段面施放与条带施法混合试验。仍将整个小区自上而下等分为 A、B、C、三段,在模拟试验中,将利用试验结果来确定代表段面内平均侵蚀强度的条带位置。在此之前,首先将其条带分别布设在断面的中线,选取条带宽度为 20cm,分别施放 Yb、Nd、La 三种元素,施放浓度仍按 REE 浓度估算公式计算,其余操作与段面施放法相同。

段面法、条带法示踪元素布设如图 1 所示。

1.4.3 点穴布设法 点穴法是在一类型区寻找若干个能代表该类型区平均侵蚀强度的点,确定最佳布设部位的。点穴法布设在沟坡的试验小区内,布设位置沿其区域的对角线排列,选取的示踪元素为 Ce、Sm,布设方位如图 2 所示。在本试验中,点穴法与条带法结合施用于坡面与沟坡试验模型内。

2 人工降雨模拟试验

坡面试验首先实施段面施放法,示踪元素布设结束后,用小雨喷洒小区,使其沉陷均匀,尽量接近天然状况,静放 1~2 天即开始实验。段面施放法实验结束后,间隔两周,仍在原小区采用条带施放法布设 REE,布设结束后采取同样方法使土壤均匀沉陷、静置,再实施试验。两次实验雨强均控制在 1.61mm/min,第一场降雨历时 40min,第二场降雨历时 30min,在每次实验过程中开始产流后,收集全部泥沙及过程样。沟坡试验首先选定两个大小相同的试验模型,即为 1[#]、2[#],两个模型并行排列,相距一定距离,试验时保证一次降雨同步受雨。按照条带法和点穴法布设好示踪元素,降雨试验仍按上述程序进行,共实施两场降雨,雨强分别为 1.14mm/min、1.56mm/min,降雨历时为 30min。

3 试验结果与讨论

3.1 REE 段面施放法

坡面小区试验分别利用烘干法测定出两次降雨试验的泥沙总量,以及利用活化分析测定各示踪元素的外加浓度均列在表 1 中。

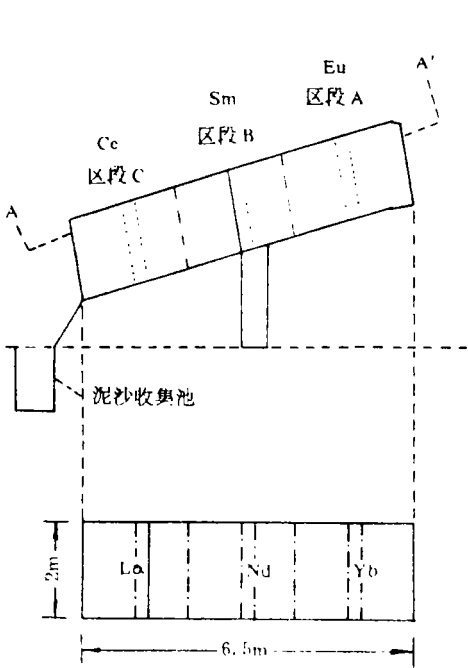


图 1 坡面试验小区示踪元素布设示意图

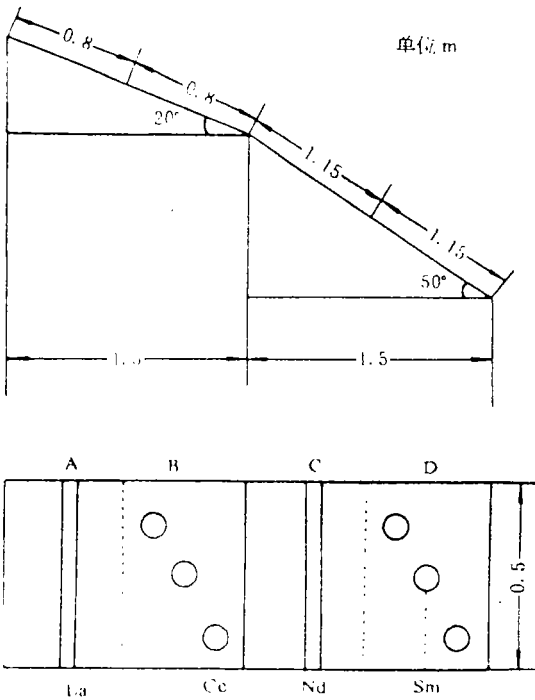


图 2 沟坡试验点穴法与条带法布设示意图

表 1 降雨试验泥沙中 REE 示踪元素含量

试验 序号	雨强 (mm/min)	侵蚀总 量(kg)	泥沙示踪元素平均含量 * (mg/kg)					
			Eu	Sm	Ce	Yb	Nd	La
1	1.61	114.6	5.31±0.36	10.1±0.88	106±7			
2	1.61	106.6	4.79±0.31	4.05±0.78	127±10	4.85±1.18	82±15	98.7±6

* 表中 Yb、Nd、La 为条带施放元素进入泥沙中的平均含量。

利用示踪元素在坡面不同部位的施加浓度及其泥沙中的平均含量，即可分别计算出不同地形部位的侵蚀量及相对侵蚀量，并可进行精度计算。其计算方法如下：

$$W_j = \frac{R_j - B_j}{C_j} \cdot W = \frac{R'_j}{C_j} \cdot W \tag{1}$$

$$r_j = \frac{W_j}{W} = \frac{R_j - B_j}{C_j} = \frac{R'_j}{C_j} \tag{2}$$

$$\delta = \frac{\sum_{j=1}^n W_j}{W} - 1 \tag{3}$$

式中： W_j ——第 j 个地形部位的侵蚀量； R_j ——侵蚀泥沙中第 j 种元素的实测浓度； R'_j ——小区侵蚀中元素的浓度增加量； B_j ——第 j 种元素背景值； C_j ——第 j 种元素施放浓度； W ——示踪小区的总侵蚀量； r_j ——第 j 区段的相对侵蚀量； δ ——侵蚀量的监测精度； n ——地形部位的划分段数，即示踪元素的种类。

利用公式(1)、(2)、(3)计算不同部位的侵蚀量及相对侵蚀量，及精度检验结果如表 2、3 所示。

表 2 小区不同地形部位相对侵蚀量及监测误差结果

试验 序号	地形部位			各部位相对 侵蚀量总和	相对误差 (%)
	上部	中部	下部		
1	0.183	0.166	0.657	1.006	0.6
2	0.165	0.103	0.667	0.935	-6.5

表 3 不同地形部位侵蚀量及计算结果

试验 序号	侵蚀量 W (kg)	不同地形部位侵蚀量 W _i		
		上部	中部	下部
1	114.6	21.0	19.0	75.3
2	106.6	17.6	11.0	71.0

计算结果表明,采用段面施放法具有很高的精度,两次试验其误差均小于 10%,说明利用 REE 段面施放法计算坡面侵蚀量及相对侵蚀量是可行的。

对计算结果进一步分析可知,两次降雨试验上、中、下段面相对侵蚀量的比值分别为(1 : 0.917 : 3.59), (1 : 0.63 : 4.04);结合降雨结束后坡面侵蚀形态观测分析,可知上述垂直分布趋势与实际侵蚀状况相符,这亦从侧面证明了 REE 段面施放法的可靠性。

3.2 REE 条带施放法

利用表 1 条带施放元素 Yb、Nd、La 的测定结果,同样可计算出第二场降雨不同地形部位侵蚀量,相对侵蚀量及其监测精度。

表 4 条带施放法不同地形部位侵蚀量及相对侵蚀量

	地形部位			合计
	上部	中部	下部	
条带相对侵蚀量	0.012	0.0119	0.0508	
条带侵蚀量	1.28	1.27	5.42	
段面相对侵蚀量	0.1302	0.1289	0.5503	0.8094
段面侵蚀量	13.89	13.74	58.66	86.29

由表 4 可知,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的段面侵蚀量及相对侵蚀量误差均较大,误差为 19.06%,产生误差的原因主要与条带布设位置有关,正确的布设位置应设在研究段面内,其侵蚀强度与段面平均侵蚀强度相等的位置上。但不管条带布设在什么位置,都可用此法测算出该条带的侵蚀强度,这一点毋庸置疑,这亦是条带施放法的可行性所在。

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),这与相应的上、中、下段面相对量的比值(1 : 0.99 : 4.22)有类似的土壤侵蚀垂直分布趋势,由此可以推断,由条带施放法所推算出的侵蚀量虽然小于段面施放法,与实际侵蚀量相比误差较大,但从理论上可以讲通,因为所有条带均位于段面的几何中部。由于汇流的作用,中部的侵蚀强度显然要小于段面的平均侵蚀强度。且这种计算结果与降雨结束后坡面侵蚀形态亦是相符的。

根据上述模拟试验,我们在野外试验中采取了条带示踪法,研究结果表明,恰当地选取条带示踪的位置,条带法同样可以满意的精确测定试验小区的相对侵蚀量分布。

3.3 降雨过程中坡面不同部位相对侵蚀量的变化趋势

通过对侵蚀过程样示踪 REE 的含量分析,尚可研究在降雨过程中不同地形部位侵蚀量的

变化趋势。图 3 显示了坡面小区在第三次降雨试验中各地形部位相对侵蚀量的变化趋势。

坡面上部土壤(A 段),在降雨 9min 以前,相对侵蚀量呈减少趋势,其后渐趋增加;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,且在降雨结束前略有回升;在中段(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。由图 3 还可以看出,在降雨开始的一段时间内,土壤侵蚀的垂直分异现象相对显著,在十几分钟后,各部位相对侵蚀量间差异明显减少并渐趋相对稳定。

上述试验结果,表现出在我们的人工降雨小区上,各段位侵蚀量分布呈 $C>A>B$ 的总趋势,这种趋势虽可能是受段位土体容重,降雨均匀度等多种因素的影响结果,但确与小区细沟侵蚀形态的分布趋势($C>A>B$)相似,如小区的中部(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),表明了该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。

3.4 坡面细沟侵蚀垂直分布趋势

图 4 为两次降雨坡面细沟侵蚀强度垂直分布曲线,由图 4 可以看出,细沟侵蚀强度基本上随坡长的递增而递增,其递增速率除在回流区外,基本上为线性递增关系,进入回流区后,递增速率突然增大。

第一场降雨曲线出现了异常点,产生的原因除了坡面不同段面上土壤紧实的差异外,高值点的产生主要是由于其上部降雨在降雨大厅钢梁上汇集后形成线流降落到坡面,产生径流集中的原因所致;而低值点则主要是由于在其对应的坡面部位,土壤过于紧实,以致形成硬梁所致。除此之外,两条曲线的变化趋势基本相似,由于第二场降雨克服了上述缺陷,曲线的变化趋势与实际情况接近。

进一步分析可知,细沟侵蚀强度的垂直分布变化趋势与细沟的平均深度及平面密度分布状况密切相关,在回流区之外,平面密度或平均深度随坡长呈线性递增趋势,很显然侵蚀强度也将随坡长呈递增趋势;回流区之内平均深度、平面密度均呈突然增长趋势,侵蚀强度势必在该区域内呈突然增长趋势。

坡面细沟侵蚀的上述观测结果,和 REE 法的坡面侵蚀分布趋势相吻合,进一步证明了 REE 法在研究土壤侵蚀坡面分布中应用的可行性。

3.5 沟坡试验结果分析

两次降雨产沙总量及各种 REE 浓度的实测结果如表 5 所示。
点穴布设位置沿其布设区域的对角线排列,由于点穴布设密度较大,表 6 中所计算出的侵蚀强度实际上是上述斜线方向上的平均侵蚀强度,条带布设位置在其所代表区域的中点,实际上它仅仅是该位置的侵蚀强度。据此我们可以分别做出两场降雨沟坡模型侵蚀强度垂直分布曲线

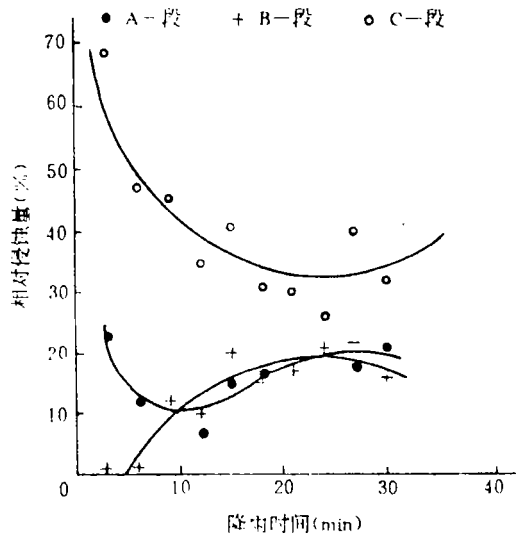


图 3 降雨过程坡面不同部位相对侵蚀量变化趋势

图,以第二次降雨为例,图 5、6 显示了侵蚀强度随汇流长度的增加而递增,这与坡沟侵蚀实际

表 5 产沙总量及泥沙 REE 含量

雨强 (mm/min)	模型	REE 浓度(mg/kg)				产沙总量 (kg)
		La	Ce	Nd	Sm	
1.14	1 [#]	29.72	0	125.73	344.44	0.55
	2 [#]	36.17	151.28	121.98	183.43	3.80
1.58	1 [#]	36.33	4.33	61.09	169.27	9.00
	2 [#]	44.14	270.74	52.74	200.51	14.95

依据表 5 即可计算出坡面与沟坡元素施放处的侵蚀强度,计算结果如表 6 所示。

表 6 沟坡模型元素施放位置处侵蚀强度(kg/m²)

雨强 (mm/min)	模型	坡沟位置			
		A(La)	B(Ce)	C(Nd)	D(Sm)
1.14	1 [#]	0.044	0	0.40	3.51
	2 [#]	0.36	0.85	2.65	6.16
1.58	1 [#]	0.88	0.057	3.14	28.21
	2 [#]	1.78	5.96	4.51	55.51

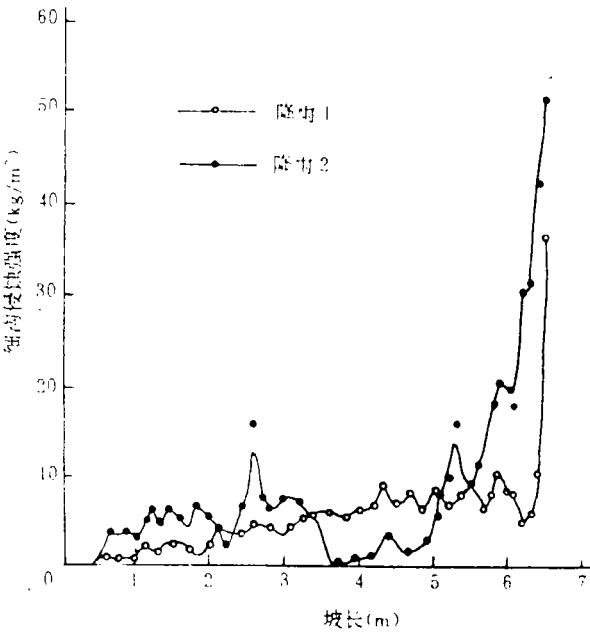


图 4 细沟侵蚀强度垂直分布趋势

状况是相符的。汇流长度增加,上部来水量增加,径流强度增加,相应径流侵蚀动力亦就增加,势必引起侵蚀强度增加。这也表明了 REE 示踪法的确可用于坡沟连续体中,坡度较陡部位侵蚀量的观测,可望利用点穴法施放 REE 解决小流域土壤侵蚀观测中沟坡侵蚀定量监测的难题。

上述点穴施放 REE 法进行土壤侵蚀观测,仅仅代表施放点位的侵蚀强度。如果我们能够在选定的研究对象中(小流域),布放若干个点,即可分别求出各个点的侵蚀强度,通过这若干个点的侵蚀强度与其对应点的平面位置,可做出小流域的侵蚀趋势曲线图,对该曲线进行积分即可求出小流域的侵蚀产沙量。当然布设的点越多,其精度愈高,点无限多时,其精度为 1,事实上就变成段面施放法。具体实施方法,可采

取网格法。由此可见,该方法用以小流域的侵蚀产沙研究也可能有广阔的应用前景。

4 结 语

模拟试验结果表明,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径;对侵蚀过程样品的分析,揭示了降雨过程各地形部位相对侵蚀量的变化趋势;不同 REE 施放方法的对比,为 REE 示踪法在野外应用的可行性提供了证据。试验

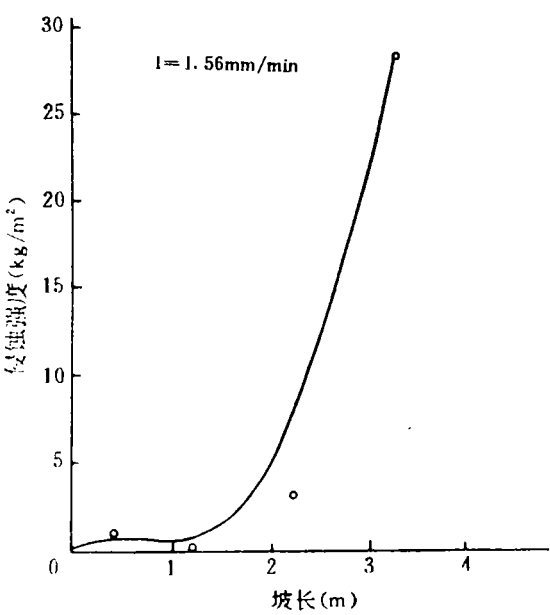


图 5 1[#]模型侵蚀强度分布趋势

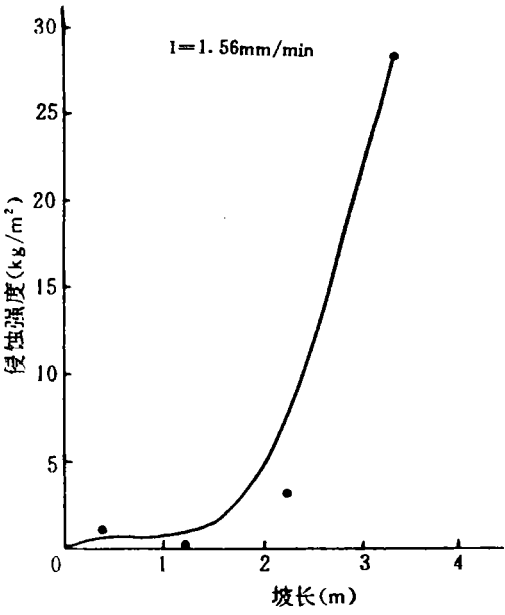


图 6 2[#]模型侵蚀强度分布趋势

结果证明了 REE 示踪法可望为研究工作者开展土壤侵蚀、泥沙运移和沉积等研究提供行之有效的研究方法。

参考文献

- 1 张信宝等. 黄土高原小流域泥沙来源的 ¹³⁷Cs 法研究. 科学通报, 1989(3)
- 2 Knaus, R. M. et al. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland. ■ A new soil horizon marker method for measuring recent accretion. Estuaries; 1989, 12(4)
- 3 田均良等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. 水土保持学报, 1992, 6(4)