

小流域侵蚀产沙空间分布的模拟试验研究

石 辉 田均良 刘普灵 周佩华

(中国科学院 水土保持研究所 陕西杨陵 712100)
水 利 部

摘 要 小流域是黄土高原水土流失综合治理的基本单元,研究其侵蚀产沙的空间分布,对于水土保持措施的实施,有着重要的意义。通过模拟试验,首次将 REE 示踪法引入到小流域侵蚀产沙的空间分布研究。试验结果表明:小流域侵蚀产沙的空间分布与小流域的沟道发育有着本质的联系。在流域发育的初始阶段,下切侵蚀是一种主要的侵蚀方式,侵蚀强烈部位从沟口向沟内延伸;随后沟道侵蚀量减少,而溯源区和坡面产沙量增高。试验结果同时表明了 REE 多元素示踪法可比较满意地解决小流域侵蚀产沙的空间分布问题,是一种研究小流域泥沙来源的有效方法。

关键词 小流域 空间分布 模拟试验

Study on Spatial Distribution of Erosion Yield in a Small Watershed by Simulation Experiment

Shi Hui Tian Junliang Liu Puling Zhou Peihua

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

Abstract A small watershed is the basic unit of comprehensively controlling soil and water loss in the Loess Plateau. It is very important for designing soil and water conservation measures and preventing soil and water loss to study its spatial distribution of erosion yield. In this paper, the REE tracer method was firstly applied on spatial distribution of erosion yield in a small watershed by simulation experiment. The results showed; there are an essential connection between spatial distribution of erosion and developing of gullies in a small watershed. At the first stage of watershed developing, gully cutting erosion was a main erosive way, and the part of erosive intensity extended from lower course to upper course. Then, with the developing of gullies, there existed a trend that gully erosive intensity gradually decreased and erosive intensity of slope and headward erosion area gradually increased. The results also showed that REE multi-element tracer could perfectly solve the problem of spatial distribution of erosion in a small watershed, and REE tracer method was an effective method for studying sediment source in a small watershed.

Key words small watershed spatial distribution simulation experiment

小流域是黄土高原水土流失综合治理的基本单元,研究其侵蚀产沙的空间分布,对于水土保持措施的实施,有着重要的意义。为了探索研究小流域侵蚀产沙的空间分布方法,同时定性地了解一些有关小流域侵蚀产沙的规律,我们在 REE 示踪法研究坡面土壤垂直分布的基础上^[1,2],通过模拟试验,首次将 REE 示踪法引入到小流域侵蚀产沙的空间分布研究。

1 试验方法

1.1 模拟流域的几何特征及建立小流域模型的方法

1.1.1 模拟流域的选择 利用模型研究小流域泥沙来源,旨在反映小流域原型的某些产沙特征。故所选择的原型小流域必须具有一般小流域的产沙特点,同时必须有丰富的实测资料以供对比。经讨论商定,本试验建立的模型,以安塞试区纸坊沟流域内具有多年观测资料的小范家沟为原型。

小范家沟流域面积为 0.184km^2 ,流域长度为 0.68km ,流域最大宽度 0.43km ,平均宽度 0.27km ,流域形状系数 0.398 ,高差 204.6m ,坡面与沟谷面积分别占总面积的 53.43% , 46.57% 。根据水土保持研究所遥感课题组的资料,纸坊沟流域的坡面与沟谷面积比在 $40\%\sim 45\%$ 和 $55\%\sim 65\%$ 之间,这说明小范家沟属于较年轻的沟道,沟缘线仍不稳定,沟道发育强烈。

1.1.2 模型设计 在室内建立的小流域模型,由于受模拟降雨高度的制约,模型大小必须控制在一定的范围之内。降雨高度为 16m 。为了保证模型降雨的有效性,使雨滴达到终点速度,故模型任何一点的降雨高度必须大于 10m 。由此确定模型最高点距地面高度不超过 6m 。

为了使模型能在一定程度上反映出小流域的侵蚀规律,便于试验观测,在模型设计中,需遵守以下的原则:

- 1、尽量使模型与原型的几何形状相似,能够反应出原型的地貌特点。
- 2、为了便于实验观测,应设计一高度为 80cm 的底座,用于制作径流池。
- 3、在不影响实验的前提下,尽量压低模型的制作成本。
- 4、为了便于观测,在模型周围紧靠模型边界修建步行道。
- 5、为了节省开支,试验用土就近准备。

本着在实验室控制条件下,用最大比例尺地接近原型且考虑造价的原则,经过4种方案对比,最后确定本实验所选用的比例尺为 $1/75$ 。

1.1.3 模型的建立

1、据 $1/5000$ 的原型流域地形图,确定出小流域的边界和内部重要地貌点的坐标和高差,按比例缩小 $1/75$,即为模型流域的坐标和高差值。

2、在降雨大厅计划建造模型区域确定坐标系,按照模型流域的坐标和高差值确定出流域边界和内部地貌点的位置和高程。

3、将流域边界用砖砌成到它相应的高程。为了有效区分流域内外的降雨,将边界上部砌成内高外低的斜面形状。

4、在砌成边界的流域内部填土,为了保证土壤达到一定的容重,土壤含水量保持在 $16\%\sim 20\%$ 之间。填土至比计划高度少 $10\sim 20\text{cm}$ 时,按地形图进行雕刻,使模型地貌与原型地貌相似。然后上面施放示踪土样。

5、在模型四周修建步行道。

6、在流域口修建一个 $1\text{m}\times 1\text{m}\times 0.8\text{m}$ 的径流池。

1.2 REE 的施放方法

1.2.1 施放区域的划分 根据朱震达的方法^[3]在小流域地形图上画出径流线,按照径流线长度的坡沟比例将小流域划分成3个大区——流域下游、中游、上游,分别以 A、B、C 区表示;A 区的坡沟比例在 0.27~1.25 之间,平均为 0.63;B 区在 0.74~2.38 之间,平均为 1.69,C 区在 2.33~3.27 之间,平均为 3.01。每大区再分别划分成沟(沟缘线以下)和坡(沟缘线以上)两个小部分,即上游坡面和沟道,中游坡面和沟道,下游坡面和沟道,加上溯源侵蚀区共为 7 部分,如图 1。根据前人的研究结果,REE 示踪法在土壤侵蚀研究中具有较高的监测精度,故在上述 7 个地貌单元仅分别施放 6 种元素,留下一个空白单元,其中总侵蚀量减去元素标记部分侵蚀量即为空白部分的侵蚀量。

1.2.2 示踪元素的选择 根据黄土高原土壤地球化学的研究成果^[4]和前人的研究结果,我们选择了在黄土中背景值含量较低,且具有较高检测灵敏度的 La、Ce、Sm、Dy、Eu、Nd 等 6 种 REE 作为示踪元素。

1.2.3 示踪元素的浓度估算 计算示踪元素的浓度除考虑到研究期间可能出现的最大侵蚀深度外,还必须考虑到元素中子活化截面、检测线、核素特征 γ 射线间相互干扰程度等因素。为了保证测量值在统计上的显著性,泥沙中的示踪元素含量应与土壤背景值差异显著。综合考虑上述因素,按式(1)计算各种示踪 REE 的施放浓度。

$$C_j = \frac{kB_j \cdot 10^{-3}}{R_j} \quad (1)$$

式中: C_j ——第 j 种元素的估算浓度(mg/kg); B_j ——第 j 种元素的土壤背景值(mg/kg); R_j ——第 j 种元素布设部位的相对侵蚀量的最小期望值; k ——综合保证系数。

1.2.4 示踪元素的需要量的估算 知道了示踪元素所需浓度、施放面积和施放深度后,可通过式(2)计算出某种元素的需要量。在本实验中,坡面施放深度为 15cm,沟道施放深度为 20~25cm。

$$A_j = M_j \times H_j \times V \times C_j \quad (2)$$

式中: A_j ——第 j 种元素的需要量(g); M_j ——第 j 种元素的施放面积(cm^2); H_j ——第 j 种元素的施放深度(cm); V ——土壤容重(g/cm^3);估算时按 $1.4\text{g}/\text{cm}^3$; C_j ——第 j 种元素的施放浓度。

1.2.5 元素的分布区位 由于 6 种示踪元素具有不同的灵敏度、价格,元素的分布区位应按照准确、易于检测及开支最少的原则施放。在能满足试验要求的条件下,对元素在不同分布区位的成本进行核算,选择出成本最低的元素施放方案。

1.2.6 示踪土样的配制

1、计算某一部位元素的施放量。

2、计算某一部位的总土方量。

3、配制高浓度示踪元素土样。称取元素需要量的 1/8 和 4kg 土样混合,用手揉搓,直至看不到 REE 元素所形成的小球为止。这一工作一般分数次完成,我们的试验是分 8 次进行,每次只混合需要总量的 1/8。

4、将 1/8 混合好的高浓度示踪元素土样搅拌,过 1mm 的筛 4 次,使土样均匀。

5、将步骤(3)、(4)重复8次,配足所需的示踪土样。

6、将配制的8份土样混合,过1mm的筛两次,确保混合均匀。

7、称取一定量混合好的示踪土样,以备 INAA 分析确定准确的施放浓度。

1.2.7 示踪土样的施放

1、根据元素的分布区位,在每个区位四周插上铁皮,内部插上铁丝控制施放深度。

2、每次施放土样之前,先将原地表喷湿,用小锄使其粗糙,以便使施放土样与底层土之间能紧密结合。

3、施放示踪土样,每隔2~3cm 用水喷湿,以便使上下层完全接合。

4、施放完示踪土样后,表层喷水固定,以防土粒滚动,污染别的区域。

1.3 地形图的测定与面积的计算

1.3.1 地形图的测定 在小流域模型建造和施放示踪元素的过程中,会和实际地形产生差异,因此在流域模型建成之后,实地划出元素施放的范围,采用视距法测绘模型的地形图,以此作为我们研究小流域的实际地形。

1.3.2 流域及分区面积的计算 在实际测量的地形图上,划出各个施放部位,用称重法计算模型小流域的实际面积和分区面积。

1.4 降雨试验

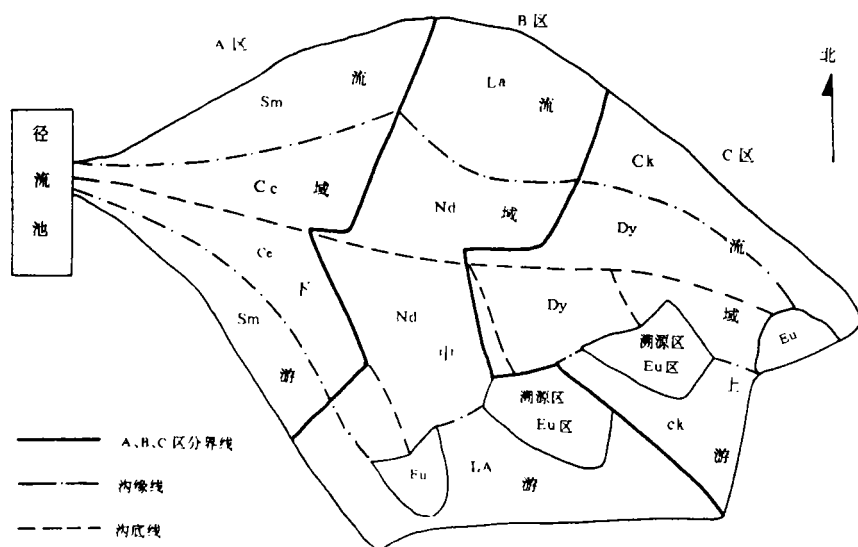


图1 小流域元素分布区位图

1.4.1 模型预处理 在正式降雨试验进行以前,先降几场小雨,使模型内部由于土壤水分的再分配达到应力均匀。降雨强度以模型表面不出现径流为限。

1.4.2 篷布遮盖 在降雨开始和结束时,由于降雨设备的汇流,致使开始和结束时降雨不均匀,有较大的雨滴产生,为了防止由此产生的试验误差,我们在模型上空用8m×12m的篷布将模型遮盖,降雨均匀后撤去篷布开始试验,降雨结束盖上篷布。

1.4.3 径流池的率定 在建成的径流池某一部位放置一根直尺,称取一定量的水倒入径

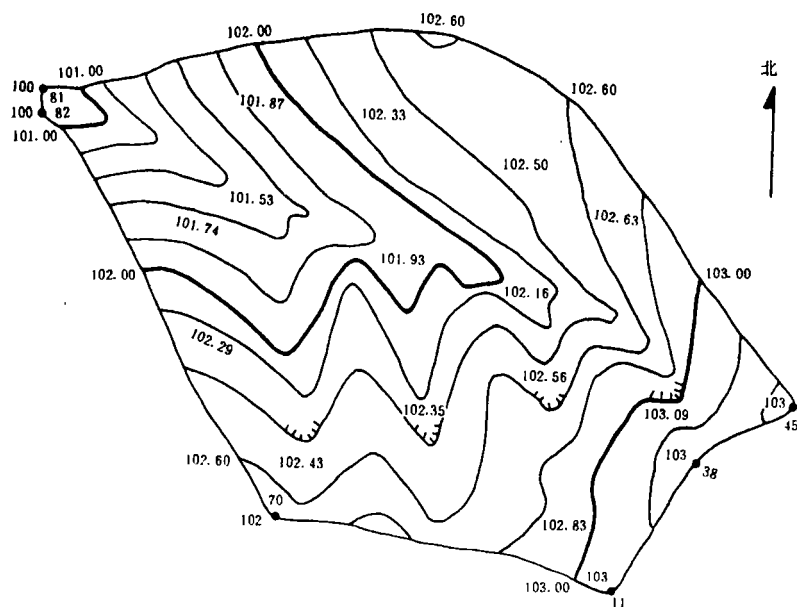


图2 小流域地形图

流池中,确定径流池容积和直尺读数的关系。

1.4.4 雨强的确定 由于强烈的侵蚀大都是暴雨引起,因此根据降雨大厅设备的具体情况和试验的要求,试验采用大于20mm/h的雨强降雨。为了观测每次降雨的实际情况,沿模型一周放置6个雨量筒实测降雨强度。

1.4.5 径流过程样的收集 在径流产生过程中,根据侵蚀状况,每隔一定时间用1 000ml的塑料瓶收集径流过程样。试验结束后,量算径流池中的径流总样。

1.4.6 流域土壤容重及前期含水量的测定 根据刘昌明的研究结果^[5],在黄土区表层5~10cm的含水量是影响径流产生的一个因素。为此,用容积为100cm³的环刀在模型上多点采样,在105℃下烘干8h,称重,计算土壤容重及含水量。流域土壤干容重为1.22g/cm³。

1.4.7 试验进度 第1次降雨在1994年9月10日,表层土壤(5cm)含水量为17.4%;第2次降雨在1994年10月5日,表层土壤含水量为饱和含水量29.1%;第3次降雨在1994年10月8日,表层含水量为25.3%;第4次降雨在1994年11月13日,含水量为19.2%。为了研究径流量改变对流域产沙的影响,第4次降雨时,在流域边缘外增加20cm宽的汇水区。

1.5 径流泥沙样品处理

将径流池中的径流样品静置,采用虹吸法吸去上部清水,称重;将底部泥沙挖出称重,风干。将风干泥沙样称重,即为总侵蚀量;根据径流量和总侵蚀量可以计算出泥沙含量。同样,用量筒量取各塑料瓶中的泥水样,然后取出瓶中样品,风干,称重。确定冲刷和径流过程。将风干泥沙粉碎,搅拌均匀,取样以备 INAA 分析用。

1.6 INAA 分析

1.6.1 样品准备 称取风干搅拌均匀的侵蚀泥沙样200g研磨,用四分法逐步缩减样品,保证有20g样品全部过100目筛。

1.6.2 标准选择 根据对样品中的元素含量的估算,选国际通用标准物质美国

NBS1633A 作为分析标准,MAG-1和 BCR-1作为质控样品。

1.6.3 样品制备 用锡箔纸制成1.5cm×1cm 左右的小锡箔袋,然后称取50mg 的土样装入袋中,进行中子照射。为了增加样品分析的精度,减少分析误差,每50个样品中加入一个标准控制样同时进行分析。在样品制备和分析过程中必须严格防止样品污染。

1.6.4 计数分析 采用多道 γ 射线分析仪分析在91.1keV、103.2keV、145.4keV、1408.0keV、1596.5keV 能量处中测定 Nd、Sm、Ce、Eu、La 元素的计数(Dy 元素由中国原子能科学研究院分析)。

1.6.5 浓度计算 在中子照射过程中,标准和样品接受相同的中子通量。故对某一种元素来说,利用标准物质的含量及经过时间校正后的单位重量标准计数和单位重量样品中的计数,通过一定的计算程序,可计算出样品中各元素的浓度。

2 结果与分析

2.1 小流域上中下游的侵蚀量、相对侵蚀量

各部位的侵蚀量、相对侵蚀量、侵蚀模数、相对侵蚀模数见表1。从表1和图3中可以看出,按坡沟径流长度之比划分的流域上、中、下游的侵蚀强度与它们的坡沟比关系不明显。这可能是由于小流域按比例尺缩小后,坡沟比例虽然不变,然而坡沟的实际长度缩小,致使径流不能充分发育,改变了实际流域的土壤侵蚀方式。例如,在野外调查中发现,细沟一般出现在距分水岭25~55m 的部位,而在我们的模型中,从沟底线到分水岭的距离在2~3m。在我们的小流域模型中,侵蚀强度的变化主要随流域沟道的发育而变化。第一次降雨,沟口急剧下切,使得下游区的侵蚀量最大,而上中游相对较小;随着降雨侵蚀,沟口下游区的下切减弱,逐渐形成一个新的基准面,进而中上游区以下游区的基准面为基础,下切到平衡为止(图4),整个沟道的下切与基准面达平衡以后,侵蚀主要成为沟岸扩张和坡面来水侵蚀。随着整个小流域沟道的发育,溯源区的侵蚀成为一个重要的产沙部。这与蒋定生等人的研究结果相符^[6]。

表1 次降雨下流域不同部位的侵蚀量、相对侵蚀量、侵蚀模数、相对侵蚀模数

降雨场次		1	2	3	4
侵蚀量 (kg)	流域下游	257.22	122.25	114.65	48.25
	流域中游	118.52	162.42	123.31	88.98
	流域上游	9.70	124.59	68.17	21.09
	溯源区	5.12	0.00	24.44	79.32
相对 侵蚀 量 (%)	流域下游	65.85	31.32	34.68	20.19
	流域中游	30.34	41.62	37.30	37.23
	流域上游	2.48	27.04	20.61	8.8
	溯源区	1.31	0.00	7.39	33.36
侵蚀 模数 [t/(km ² ·a)]	流域下游	30332.5	14416.3	13520.0	5689.9
	流域中游	9706.8	13302.2	10099.1	7222.8
	流域上游	1226.3	15750.9	8618.2	1112.5
	溯源区	1771.6	0.0	8456.7	27584.8
相对 侵蚀 模数	流域下游	1.0	1.0	1.0	1.0
	流域中游	0.32	0.92	0.75	1.27
	流域上游	0.04	1.09	0.64	0.20
	溯源区	0.15	0.0	0.81	3.63

2.2 不同地貌部位的侵蚀量和相对侵蚀量

通过分析径流池中泥沙各元素含量,可用式(3)计算小流域上中下游坡面和沟道与沟头溯源区7个部位的侵蚀量

$$E_i = W \times \frac{C_i - B_i}{A_i}$$
(3)

式中: E_i ——第 i 种元素施放区的侵蚀量(kg); A_i ——第 i 种元素的施放浓度; B_i ——第 i 种元素的背景值; C_i ——泥沙中第 i 种元素的浓度, W 为单次降雨总泥沙量。各元素施放部位的侵蚀量和相对侵蚀量见表2。

表2 单次降雨下各施放元素部位的侵蚀量和相对侵蚀量

降雨场次			1	2	3	4
侵蚀量 (kg)	下游坡面	Sm	14.37	20.06	44.02	30.79
	下游沟道	Ce	242.85	102.19	70.63	17.46
	中游坡面	La	18.22	11.93	22.64	35.61
	中游沟道	Nd	100.30	150.49	100.67	53.37
	上游坡面	CK	0.00	60.59	20.87	0.00
	上游沟道	Dy	9.73	64.01	47.32	21.09
	溯源区	Eu	5.12	0.00	24.44	79.32
相 对 侵蚀量 (%)	下游坡面	Sm	3.68	5.14	13.31	12.88
	下游沟道	Ce	62.15	26.18	21.37	7.31
	中游坡面	La	4.66	3.06	6.85	14.90
	中游沟道	Nd	25.67	38.56	30.45	22.33
	上游坡面	CK	0.00	11.54	6.31	0.00
	上游沟道	Dy	2.53	15.54	14.32	8.82
	溯源区	Eu	1.31	0.00	7.39	33.36

从表2和图5中均可看出,无论侵蚀量还是相对侵蚀量,中下游沟道 Ce、Nd 施放区都较高。由于流域侵蚀是在连续降雨情况下发生的,随着流域沟道的发育,各部位的侵蚀量也发生了变化。例如下游沟道 Ce 区的4次侵蚀量分别为242.85kg、102.19kg、70.63kg、17.46kg,呈下降的趋势;而中游沟道 Nd 区从100.30kg、150.49kg、100.67kg 变为53.37kg,以第2次降雨侵蚀量最大。同样下游和中游沟道 Ce 区与 Nd 区的相对侵蚀量分别为62.15%,26.18%,21.37%,7.31%和25.67%,38.56%,30.45%,22.33%,与绝对侵蚀量趋势相同。上述趋势表明,当开始发生侵蚀时,主要是下切溯源,故开始下游沟道 Ce 区的侵蚀量最高,当下切溯源作用通过 Ce 区而进入中游沟道 Nd 区,则 Ce 区侵蚀量下降,Nd 区升高;同样可以推知,在沟道侵蚀过了 Nd 区进入上游沟道 Dy 区,应在一段时间内表现为 Nd 区下降,Dy 区升高。在坡面上的情况如何呢?下游坡面的相对侵蚀量分别为3.68%,5.14%,13.31%,12.88%,中游坡面为4.66%,3.06%,6.85%,14.90%,上游坡面为0,11.54%,6.31%,0;总的来说,坡面侵蚀随降雨的次数增加所占的份额逐渐增加。从上述结果来看,在小流域中,泥沙的主要来源区是随流域沟道的发育在变化。在我们试验中,第1次降雨泥沙主要来源区是下游沟道 Ce 区,占总侵蚀量的62.15%;第2次是中下游沟道,分别占38.56%和26.18%,合计为64.74%;第3次中、下游沟道泥沙总共占59.13%;第4次整个沟道泥沙只占38.46%;坡面泥沙占的比例从10.31%,19.74%上升到33.86%。在前3次降雨中,主沟道比降较大,侵蚀主要表现在主沟道的下切侵蚀,沟头溯源区的相对侵蚀量较小;而在第4次时,沟头溯源区已成为一个主要的侵蚀产沙区,相对侵蚀量骤增至33.36%。

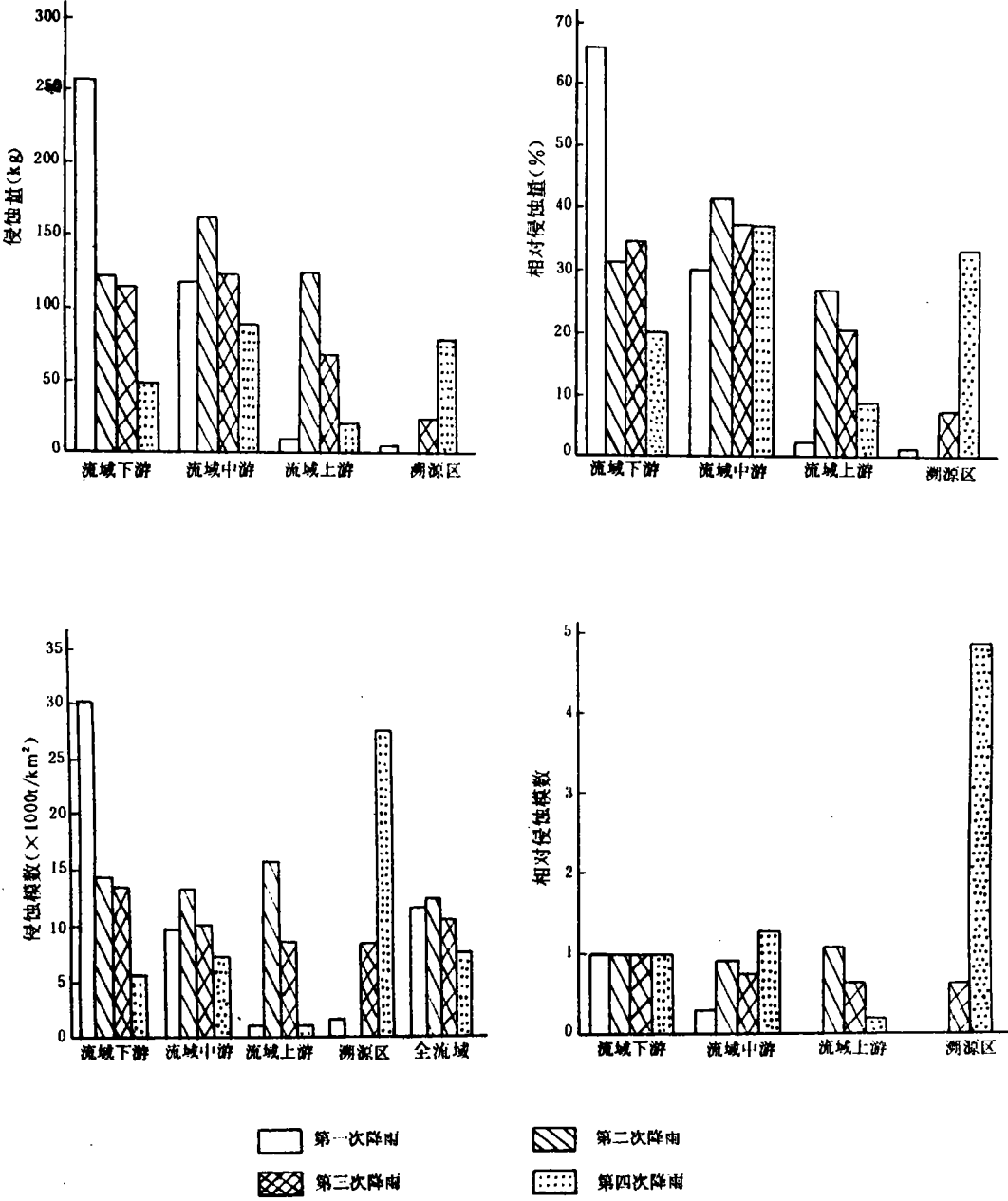


图3 小流域不同部位的侵蚀量、相对侵蚀量和侵蚀模数、相对侵蚀模数直方图

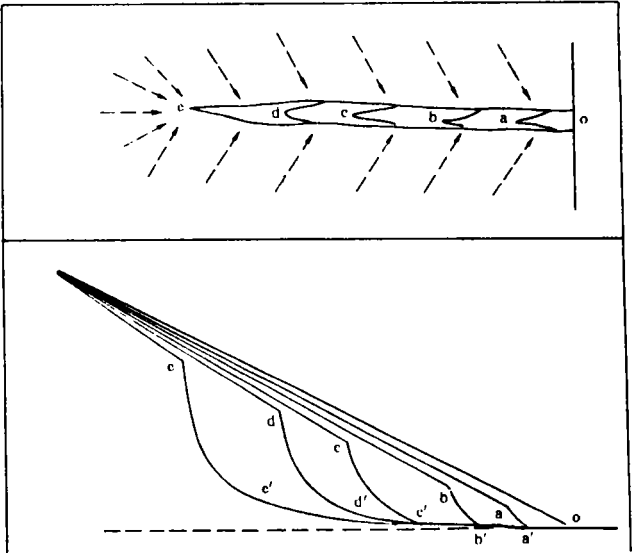


图4 沟道侵蚀下切示意图^[7]

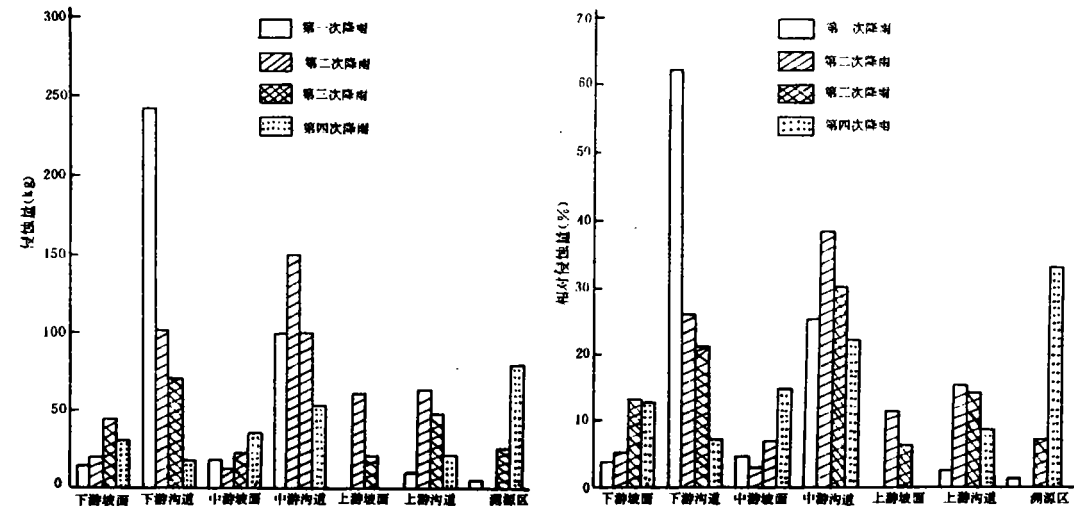


图5 小流域不同地貌部位的侵蚀量、相对侵蚀量直方图

2.3 侵蚀模数和相对侵蚀模数

由于施放区的面积不同,用各区域的侵蚀量和相对侵蚀量不能反映该区域单位面积上土

壤侵蚀强度。为了消除面积的影响,采用侵蚀模数和相对侵蚀模数来说明某个区域的侵蚀强弱。各区域的面积和相对面积与侵蚀模数和相对侵蚀模数分别见表3、表4。

表3 各部位的施放面积和相对面积

	下游坡面 Sm	下游沟道 Ce	中游坡面 La	中游沟道 Nd	上游坡面 CK	上游沟道 Dy	溯源区 Eu	全流域 Σ
施放 面积(m ²)	4. 92	3. 56	6. 80	5. 41	3. 27	4. 64	2. 89	31. 49
相对 面积(%)	15. 6	11. 3	21. 6	17. 2	10. 4	14. 7	9. 2	100

从表4中可以看出,侵蚀模数、相对侵蚀模数与侵蚀量、相对侵蚀量有相同的趋势。下游沟道 Ce 区面积仅占总面积的11. 3%,而它在前3次降雨中的侵蚀模数为流域平均侵蚀模数的5. 87,2. 32和1. 88倍。在前3次降雨中,总的来说,以下游中游沟道的 Ce 区、Nd 区侵蚀最为强烈;中游坡面 La 区、溯源 Eu 区和上游沟道 Dy 区、上游坡面 CK 区相对较小;在第4次降雨中,沟头溯源区的侵蚀模数为全流域平均侵蚀模数的3. 63倍,已成为侵蚀最强烈区。随着小流域沟道的发育,侵蚀强烈区在不断转换。随中、下游沟道产沙量减小,而溯源 Eu 区在第4次降雨中却成为最主要的产沙区。在进行水土保持规划中,应根据小流域的发育阶段,确定出侵蚀最强烈的区域作为治理的重点和难点,这样才能使有限的资金产生出较大的效益。

表4 各部位的侵蚀模数和相对侵蚀模数

降雨场次			1	2	3	4
侵蚀 模数 [t/(km ²)]	全流域		11616. 4	12394. 4	10498. 6	7589. 7
	下游坡面	Sm	2920. 7	4077. 2	8947. 2	5236. 8
	下游沟道	Ce	68216. 3	28705. 1	19764. 0	6258. 1
	中游坡面	La	2679. 4	1754. 4	3329. 4	3227. 4
	中游沟道	Nd	18539. 7	27817. 0	18608. 1	9865. 1
	上游坡面	CK	0. 0	18529. 1	6382. 3	0. 0
	上游沟道	Dy	2090. 5	13793. 1	10194. 0	4545. 3
	溯源区	Eu	1771. 6	0. 0	8456. 7	27584. 8
相对 侵蚀 模数 (%)	全流域		1. 00	1. 00	1. 00	1. 00
	下游坡面	Sm	0. 25	0. 33	0. 85	0. 69
	下游沟道	Ce	5. 87	2. 32	1. 88	0. 82
	中游坡面	La	0. 23	0. 14	0. 32	0. 43
	中游沟道	Nd	1. 60	2. 24	1. 77	1. 30
	上游坡面	CK	0. 0	1. 49	0. 61	0. 0
	上游沟道	Dy	0. 18	1. 11	0. 97	0. 60
	溯源区	Eu	0. 15	0. 0	0. 81	3. 63

3 结 论

通过模拟试验发现小流域侵蚀产沙的空间分布与小流域的沟道发育有着本质的联系。在流域发育的初始阶段,下切侵蚀是一种主要的侵蚀方式,侵蚀强烈部位从沟口向沟内延伸;随后沟道侵蚀量减少,而溯源区和坡面产沙量增高。模拟试验同时也表明了 REE 多元素示踪法可比较细致地研究小流域各种地貌部位的侵蚀特点,能够较真实地反映出小流域侵蚀产沙的空间分布规律,是一种研究小流域泥沙来源的有效方法。

(下转第95页)

2. 由上述讨论可知,每人每天以食物中摄取 REE 的日容量以氧化物计6~60mg,由表6~2可知,无论是按单一稀土浓度还是总稀土计,如果每人每日饮水量按2L 计,饮用水摄入的稀土总量最大也不过0.3mg,其值远远小于日容许摄入量。说明示踪 REE 不会因水迁移而影响地下水和地表水的水质。

4 结 论

通过示踪区植物对 REE 的吸收和分布研究,以及对径流池中清水的稀土元素含量分析,证明在黄土高原氧化环境弱碱性土壤介质中,示踪 REE 的生物地球化学行为较为稳定,不易被植物吸收,也不会因水迁移而影响地下水和地表水的水质,因而利用 REE 示踪法研究土壤侵蚀对生态环境不会形成不利影响。

参考文献

1 高粱等. 稀土的农用原理及其对农业环境影响的研究. 农业环境保护,1988,7(4) 7~11
2 宁加贲. 稀土在农业上的利用. 长沙:湖南科学技术出版社,1988
3 Tian Junliang et al. J. Radioanal Chem., Vol. 110, No. 1, (198)261

(上接第84页)

参考文献

1 Tian Junliang, Zhou Peihua, Liu Puling etc. REE tracer method for studies on soil erosion. International Journal of Sediment Research, 1994, 9(2)
2 田均良,周佩华,刘普灵等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. 水土保持学报,1992,6(4)
3 朱震达. 应用数量方法来研究黄土丘陵地区的侵蚀地貌. 地理学报,1958, No. 3
4 田均良,彭祥林等著. 黄土高原土壤地球化学. 科学出版社,1994
5 刘昌明. 黄土区土壤水分动态及其与降雨产流的关系. 地理集刊, No. 12, 水文分析与实验, 科学出版社, 1980
6 蒋定生,周清,范兴科等,小流域水沙调控正态整体模型模拟试验,水土保持学报,1994,8(2)