

坡面细沟侵蚀产沙时空分布规律试验研究

丁文峰¹, 李占斌^{2,3}, 丁登山¹, 庄大昌¹

(1. 南京大学城市与资源学系, 江苏 南京 210093; 2. 中国科学院水土保持研究所国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 水利部

3. 西安理工大学水资源研究所, 陕西 西安 710048)

摘要: 利用放水冲刷试验结合稀土元素(REE)示踪技术对坡面侵蚀产沙特征及其时空变化进行了研究。结果表明: 在径流冲刷下, 坡面侵蚀产沙可分为三个不同的阶段并对应不同的产沙特征。其空间变化表现为, 在 6° 、 9° 情况下, 坡面不同坡段的相对侵蚀量沿下坡方向呈现出先减小后增大的趋势; 在 12° 小流量情况下, 坡面各坡段的相对侵蚀量与坡度较小的情况相似, 当流量较大时, 坡面各不同坡段的相对侵蚀量随坡长的增大而减小。但坡面最下端坡段的相对侵蚀量总是随着冲刷历时的延长而减小, 其余各坡段的相对侵蚀量则呈现出缓慢的波动式上升。

关键词: 坡面; 细沟侵蚀; 产沙; 时空变化规律; 稀土元素; 示踪技术

中图分类号: S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-6791(2004)01-0019-05

土壤侵蚀引发的环境问题已经引起各国的广泛关注, 对土壤侵蚀进行合理的预测预报并采取相应措施是解决该类问题的基本出发点。坡面是侵蚀发生的基本单元, 同时也是侵蚀预报的基础。因此, 关于坡面侵蚀产沙问题的研究, 一直是科学家们研究的重要内容之一^[1~5]。由于侵蚀沿坡面垂向的变化非常复杂, 它不仅包含地面径流的形成与汇集、土体被破坏剥蚀、泥沙输移与沉积等过程, 还受到降雨、地形、土质等多种因素的影响, 表现出不确定性等特征, 加之研究手段的限制, 以往大多数研究往往停留在研究坡面或流域的总侵蚀产沙量以及影响产沙的因素等方面, 不能区分坡面上不同部位的侵蚀产沙状况及其随时间的变化。近年来, 随着多元素示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用^[6,7], 使研究坡面土壤侵蚀垂直分布特征成为可能。本文利用稳定性稀土元素(REE)进行了多元素示踪, 研究了坡面侵蚀的时空分布, 以为坡面侵蚀过程的深入开展提供依据。

1 研究方法

本研究采用两种不同的坡长对坡面侵蚀产沙特征及产沙过程进行研究, 一种为长坡长小区(试验小区的面积为 $500\text{ cm} \times 100\text{ cm}$), 主要研究坡面侵蚀产沙的空间和时间变化规律; 另一种为短坡长小区($100\text{ cm} \times 100\text{ cm}$), 主要对坡面侵蚀产沙特征进行研究。

1.1 长坡长小区 REE 示踪法

(1) REE 示踪元素的选择及浓度估算 通过分析, 选择了黄土中背景值含量较低, 具有较高检测灵敏度的元素作为示踪元素, 并按下式估算所需浓度^[7]。

$$C_j = (k B_j \times 10^3) / R_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中 C_j 为第 j 种元素的施放浓度, mg/kg ; B_j 为第 j 种元素的土壤背景值, mg/kg ; R_j 为第 j 种元素施放部位相对侵蚀量的最小期望值; K 为考虑到其它因素的综合保证系数。再根据下式确定示踪元素的需要量^[7]。

收稿日期: 2002-11-18; 修订日期: 2003-03-20

基金项目: 中国科学院知识创新重大资助项目(KZCX1-10-04)

作者简介: 丁文峰(1975-), 男, 河南汝州人, 博士研究生, 主要从事土地资源与环境等研究。E-mail: dingwenfeng@sohu.com

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

式中 A_j 为第 j 种元素的需要量, g; M_j 为第 j 种元素的施放面积, cm^2 ; H_j 为第 j 种元素的施放深度, cm, 该试验取 20 cm; V 为土壤容重, g/cm^3 ; C_j 为第 j 种元素的施放浓度, mg/kg 。

(2) 布设方法 坡面按试验设计要求自下而上等分为 4 段, 分别标记为 A、B、C、D。试验中稀土元素的布设采用段面施放法, 根据刘普灵等^[6-9]提出的选择条件, 筛选出以下 4 种元素作为试验中的示踪元素 Dy、Nd、Sm、Ce。试验开始前将所选择的稀土元素与按稀土元素施放浓度计算得到的土方量充分混合均匀后填入事先标记好的坡段内, 填土过程中边填边用力压实, 并严格避免不同元素间交叉污染, 填土完成后使试验槽内的土壤干容重控制为 $1.25 \sim 1.3 \text{ g}/\text{cm}^3$, 具体布设如图 1 所示。

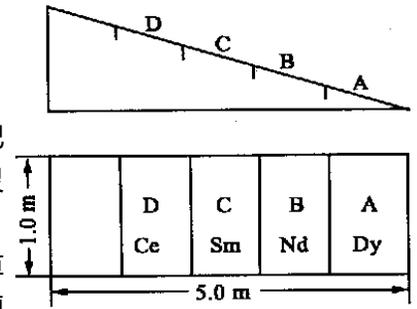


图 1 冲刷试验 REE 布设示意图
Fig 1 Sketch map of REE scouring experiment

1.2 试验方法

试验采用放水冲刷法。试验坡度选择 6° 、 9° 、 12° 三级变化, 放水流量采用 2.5、3.5、4.5、5.5、6.5 L/min 五级进行组合试验。供试土样采用杨凌的娄土, 其粒径组成如表 1 所示。试验中供水设备采用定水头供水控制流量。试验开始后, 采集坡面出口的径流泥沙样, 产流初期每 1 min 取 1 次径流泥沙样, 3 min 后每 2 min 取样 1 次。整个试验过程持续 15 min。每个放水流量值连续重复试验两次。每次试验后, 用量筒测定各个样品的体积, 待径流泥沙样充分澄清后, 将上层清液倒去, 剩下的泥沙样风干后将其充分混合均匀, 取其中 20 g 样品过 100 目筛。再称取其中 50~100 mg 样品, 用纯铝箔包装, 放入原子反应堆中照射, 利用 γ 能谱仪在各特征能量处测定分析 4 种元素的含量。

表 1 试验土壤的粒径组成

Table 1 Percentage of the different particle size of the experimental soil

粒径/mm	百分比/%
1~0.25	0.12
0.25~0.05	2.70
0.05~0.01	41.13
0.01~0.005	6.88
0.005~0.001	12.89
<0.001	36.28

2 结果与分析

2.1 坡面径流冲刷侵蚀产沙特征

(1) 坡面侵蚀产沙过程 不同坡长、不同放水流量、不同坡度的冲刷试验结果表明, 径流冲刷侵蚀产沙过程及坡面时段产沙量具有明显的阶段性, 径流冲刷条件下坡面侵蚀产沙过程可分为 3 个阶段: ①片蚀向沟蚀转化阶段: 由于在试验过程之初, 侵蚀方式主要以片蚀为主, 产沙量的大小取决于放水流量、坡度、坡面径流流态以及坡面土壤的抗侵蚀能力, 随着冲刷历时的延长, 坡面上已经开始有细沟初步形成, 细沟在形成初期由于沟头不稳定而发生溯源侵蚀, 表现为产沙量激增的趋势。②细沟侵蚀阶段: 一方面, 随着试验过程的持续, 坡面入渗减少, 相应径流量增大, 径流冲刷力增强; 另一方面, 坡面上出现的细沟使径流更为集中, 径流侵蚀力相应增强, 细沟侵蚀得以充分发展, 坡面侵蚀产沙量基本稳定, 并维持在一个较高的水平, 此阶段的出现与坡度、流量及土壤质地有关。且最大侵蚀强度随坡长不同而不同。③细沟侵蚀衰退阶段: 在细沟形成后的发展过程中, 由于侵蚀沟形态基本稳定, 侵蚀产沙量显著减少。

(2) 坡面侵蚀过程中产沙分布 表 2 为 5 m 长坡面条件下不同时段产沙量所占总产沙量的比例。

由表 2 可见, 在不同的试验流量和坡度下, 各时段的产沙量所占总产沙量的比例都呈随时间的延长先增大后减小的趋势, 在相同的试验流量下, 随坡度的增大不同时段产沙比例中的最大值有提前趋势。这可能与坡面细沟侵蚀的发生发展过程有关。且试验开始后的 3~7 min 和 7~11 min 是侵蚀产沙的主要时段。例如, 在坡度为 12° 时, 当流量分别为 3.5 L/min 和 5.5 L/min 时, 3~7 min 的侵蚀产沙量便占整个试验过程侵蚀产沙量的 43.29% 和 36.27%。结合试验实际观察, 产沙量主要集中在这两个时段的根本原因是试验开始后的 3~11 min 正是细沟形成并活跃发展阶段, 此时细沟沟槽变化剧烈, 相应的侵蚀产沙率也大。在试验开始后的 11~15 min 时, 细沟形态已经基本稳定, 逐渐形成一条或几条上下贯通的细沟, 侵蚀产沙率明显减小。

根据试验数据又计算了短坡长情况下不同时间段的产沙量所占总产沙量的比例(表3)。

由表3可见,其变化趋势与长坡长条件下各时段产沙量占总产沙量的比例变化相似。但是,不同时间段的产沙比例中的最大值比长坡长条件下提前出现,主要侵蚀产沙时段也由长坡长情况下的3~7min和7~11min变化为0~3min和3~7min。并有随流量和坡度的增大这两个时间段的产沙比例有增大的趋势。由此可见,放水冲刷试验条件下,坡面侵蚀产沙强度不仅与坡度、流量以及下垫面条件有关,而且与试验的坡长也有关。

表2 径流侵蚀过程中不同时段侵蚀产沙分配(5m长坡面)

Table 2 Sediment distribution of different experiment time in the process of runoff erosion (5 m long slope)

流量 $/(L \cdot \min^{-1})$	坡度 $/(^{\circ})$	试验不同时间段的产沙比例/%			
		0~3 min	3~7 min	7~11 min	11~15 min
2.5	6	13.12	22.55	32.61	31.71
	9	16.36	30.42	30.57	21.27
	12	17.73	29.68	26.39	27.56
3.5	6	7.35	23.34	34.56	34.75
	9	10.20	24.12	28.23	27.41
	12	24.65	43.29	32.05	-
4.5	6	13.96	26.34	33.13	26.56
	9	19.47	33.30	31.69	15.55
	12	18.34	32.72	29.16	19.78
5.5	6	18.02	30.80	31.09	20.10
	9	4.01	17.30	33.16	30.12
	12	16.96	36.27	31.69	15.06
6.5	6	10.10	20.84	29.17	39.88
	9	14.14	35.92	32.31	17.63
	12	21.86	25.93	31.58	20.63

表3 坡面侵蚀过程中不同时段侵蚀产沙分配(1m长坡面)

Table 3 Sediment distribution of different experiment time in the process of runoff erosion (1 m long slope)

流量 $/(L \cdot \min^{-1})$	坡度 $/(^{\circ})$	试验不同时间段的产沙比例/%			
		0~3 min	3~7 min	7~11 min	11~15 min
2.5	6	11.71	39.20	29.36	19.72
	9	25.42	44.99	29.59	-
	12	24.11	46.56	19.99	9.33
3.5	6	19.38	47.86	23.77	8.98
	9	24.12	45.26	23.98	6.63
	12	24.55	57.80	11.18	4.38
4.5	6	29.19	40.59	17.01	13.21
	9	22.74	40.54	18.22	18.51
	12	30.62	56.73	11.61	1.04
5.5	6	28.26	47.15	22.61	1.68
	9	34.02	16.16	17.62	6.89
	12	33.41	30.33	15.75	20.51
6.5	6	35.54	39.42	25.04	-
	9	39.54	51.49	6.03	2.93
	12	41.86	35.69	16.02	6.43

2.2 坡面土壤侵蚀产沙的空间变化

通过分析各个泥沙过程样品中各元素的含量,可用下式计算坡面上各段面在不同时间段内的侵蚀量^[7]:

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

式中 E_i 为第 i 种元素施放区的侵蚀量, kg; A_i 为第 i 种元素的施放浓度, mg/kg; B_i 为第 i 种元素的背景值, mg/kg; C_i 为泥沙中第 i 种元素的浓度, mg/kg; W 为每个样品的总泥沙量, kg。

将计算出的各坡段的侵蚀量转化为相对侵蚀量,列于表4。通过对表4中的数据分析可以看出,在坡度较小的情况下(6° 和 9°),坡面不同坡段的相对侵蚀量随坡长的变化趋势基本相似,即基本上在坡面中部的坡段侵蚀强度最小,坡面最上端和最下端坡段的相对侵蚀量较大,坡面最下端段面的相对侵蚀量随放水流量的增大而依次减小,坡面最上端段面的相对侵蚀量随放水流量的增大而依次增大。在坡度较大而流量较小的情况下(坡度为 12° ,流量为 $2.5L/\min$ 和 $3.5L/\min$),坡面各坡段的相对侵蚀量随坡长的变化趋势与坡度较小的情况相似,当流量较大时,坡面相对侵蚀量随坡长的增大而减小。

表4 坡面不同坡段的相对侵蚀量

Table 4 Relative erosion mass in the different section on slope

坡度 $/(^{\circ})$	流量 $/(L \cdot \min^{-1})$	各坡段的相对侵蚀量				总相对侵蚀量
		A	B	C	D	
6	2.5	0.48	0.09	0.26	0.14	0.97
	3.5	0.45	0.12	0.20	0.29	1.06
	4.5	0.21	0.20	0.22	0.21	0.84
	6.5	0.38	0.18	0.15	0.21	0.92
9	2.5	0.39	0.02	0.15	0.32	0.88
	3.5	0.38	0.18	0.18	0.23	0.97
	4.5	0.21	0.19	0.25	0.24	0.89
	5.5	0.53	0.24	0.09	0.01	0.87
12	6.5	0.25	0.22	0.22	0.19	0.88
	2.5	0.32	0.01	0.28	0.32	0.93
	4.5	0.14	0.26	0.21	0.26	0.87
	5.5	0.10	0.22	0.21	0.38	0.91
	6.5	0.15	0.21	0.26	0.25	0.87

2.3 坡面土壤侵蚀产沙的时间变化

图2显示了坡面各坡段的相对侵蚀量随时间的变化趋势,并结合对表4的分析可以看出,坡面最下端坡段的相对侵蚀量总是随冲刷历时的延长而下降,随放水流量的增大而下降,其余各坡段的相对侵蚀量则呈缓慢的波动式上升。分析其原因,主要是在同一坡度情况下,在较小流量时径流从坡面顶端向下流动过程中由于其冲刷侵蚀动力较小,不足以起动较多的泥沙颗粒,而随着径流的流动其流速越来越大,积聚的能量也越来越多,当其到达坡面最下端坡段时,能量足以起动较多的泥沙颗粒,因此,在冲刷试验初期往往出现坡面最下端坡段的相对侵蚀量较大的现象。但是随着冲刷时间的延长,坡面上游坡段相继出现冲刷侵蚀,其侵蚀量逐渐增加,这样当含有较多泥沙的径流流动到坡面下游坡段时,由于其挟沙能力减小,相应地含沙水流的剥蚀能力降低,故其在下游坡段的侵蚀量也就相应减小。因此对于坡面最下端坡段的相对侵蚀量会出现随冲刷时间的延长而出现递减的趋势。

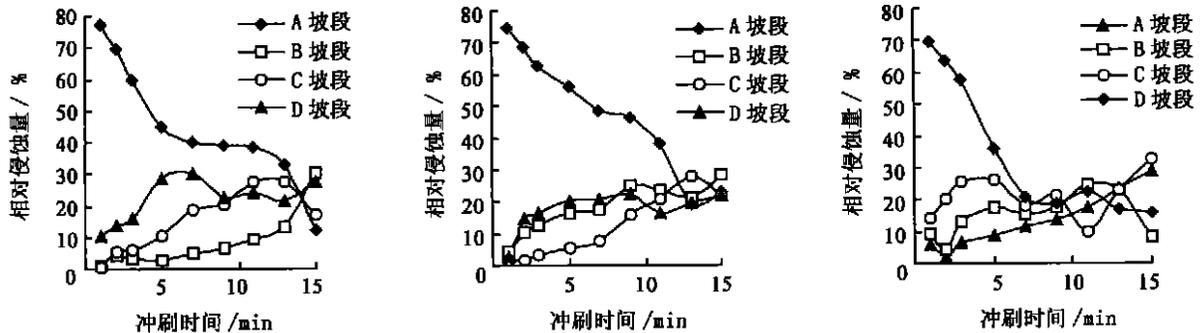


图2 各段面所占总侵蚀量的比例时间变化

Fig. 2 Variation of the percentage in the different section erosion mass account for the total erosion mass

对相同坡度、不同流量的试验结果分析可以看出,随着放水流量的增大,在冲刷初期最下端坡段的相对侵蚀量呈下降趋势,而最上端坡段的相对侵蚀量则呈增大趋势,主要是因为流量较大的情况下,径流从一出口处就具有较大的能量,因此其起动泥沙颗粒的数量也较径流量较小时为多。因此,一开始最上端坡段的相对侵蚀量便较大。当坡度较大、流量较大时,这种现象尤为明显,如坡度 12° , $Q=4.5\text{ L/min}$ 和 $Q=5.5\text{ L/min}$ 时,在试验开始的最初阶段,坡面最上端坡段的相对侵蚀量便达到近70%,而位于坡面最下端坡段的相对侵蚀量只有11%左右。随着冲刷历时的延长,坡面最上端坡段的相对侵蚀量出现下降趋势,自该坡段向下的段面随即出现相对侵蚀量增加的趋势。

3 结 论

(1) 研究表明REE多元示踪法是土壤侵蚀垂直分布定量研究中比较理想的分析方法。该法不仅可准确地测定坡面不同地形部位的相对侵蚀量,还可客观地描述坡面在侵蚀发生过程中各坡位相对侵蚀量的时空分布。

(2) 径流冲刷条件下,坡面侵蚀产沙过程可分为三个阶段,即片蚀向沟蚀转化阶段、细沟侵蚀阶段、细沟侵蚀衰退阶段,并对应不同的产沙特征。

(3) 在坡度较小的情况下,坡面各不同部位的相对侵蚀量沿下坡方向呈现出先减小后增大的趋势,这与坡面径流流速的变化相一致,径流流速大,其对应的侵蚀量也大,在坡度较大而流量较小的情况下,坡面各坡段的相对侵蚀量与坡度较小的情况相似,当流量较大时,坡面各不同段面的相对侵蚀量呈现出随坡长的增大而减小的趋势。但坡面最下端段面的相对侵蚀量总是随着冲刷历时的延长而呈现出下降趋势,而其余各坡段的相对侵蚀量则呈现出缓慢的波动式上升。

参考文献:

[1] 王贵平,张治国.黄土坡面上细沟发生及其侵蚀,晋西土壤侵蚀管理与地理信息系统应用研究[M].北京:科学出版社,

1992 234- 239.

- [2] 王贵平, 曾伯庆, 蔡强国, 等. 晋西黄土丘陵沟壑区坡面土壤侵蚀及其预报研究[J]. 中国水土保持, 1992, 11: 22- 24.
- [3] 郑粉莉. 黄土高原坡耕地的细沟侵蚀及防治途径[J]. 中国科学院西北水土保持研究所集刊, 1988, 19- 25.
- [4] 郑粉莉, 唐克丽, 周佩华. 坡耕地细沟侵蚀影响因素的研究[J], 土壤学报, 1989, 26(2): 109- 116.
- [5] Horton R E. Erosion development of streams and their drainage basins; Hydrophysical approach to quantitative morphology [J]. Bull Geol Soc Am, 1945, 56: 275- 370.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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(1): 41- 46.
- [9] Knaus R M, Vangent D L. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland. III A new soil horizon marker method for measuring recent accretion [J]. Estuaries, 1989, 12(4): 269- 283.
- [10] Tian Junliang, Zhou Peihua, Liu Puling, et al. REE tracer method for studies on soil erosion [J]. International Journal of Sediment Research, 1994, 9(2): 39- 43.
- [11] 石 辉, 田均良, 刘普灵, 等. 利用 REE 示踪法研究小流域泥沙来源[J]. 中国科学(E 辑), 1996, 26(5): 474- 480.
- [12] 李雅琦, 田均良, 刘普灵, 等. 可活化稳定核素示踪法在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 核技术, 1997, 20(7): 418- 422.
- [13] 睦国平, 徐 镨, 陈宝林, 等. 中子活化分析技术在野外红壤侵蚀研究中的应用[J]. 核技术, 2000, 23(4): 285- 288.
- [14] 丁文峰. 黄土区坡面径流侵蚀的动力过程试验研究[D]. 中国科学院/水利部水土保持研究所, 2001.

Study on spatial and temporal characters of rill erosion on slope

DING Wen feng¹, LI Zhar bin^{2,3}, DING Deng shan¹, ZHUANG Da chang¹

(1. Department of Urban and Resources Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 2. Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. Institute of Water Resources, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Combined with the runoff scouring method and the rare earth element (REE) technology, the temporal and spatial variation laws of the sediment yield on slope are studied in this paper. The results show that the process of sediment yield on slope can be divided into the following three stages, interrill erosion stage, intensive rill erosion stage and rill erosion declining stage. The results indicated that the ratio of the amount of sediment yield in the various period to the amount of total sediment yield augments at the beginning and decreases at last during the runoff scouring experiment under the different flow discharge and the different slope gradients. Under the same flow discharge, the maximum value of the ratio shows a tendency of appearing in advance with the slope gradient increasing. The intensive rill erosion stage accounts for the main sediment yield, which contribute 52%~ 75% to the total sediment yield in the whole experiment. The relative erosion mass of the different section along the slope decreases at first and increases at last during the runoff scouring experiment. Experiment on the steeper slope with smaller flow discharge indicates that the relative erosion mass of the different section along the slope is similar to that on the gentle slope. When the flow discharges is larger, the relative erosion mass decreases with the length of slope increasing. The temporal variation of sediment yield on slope is that the relative erosion mass at the bottom section of the slope decreases with experimental time length of the experiment, while the relative erosion mass on other section increases fluctuantly.

Key words: slope; rill erosion, sediment yield, spatial and temporal variation; rare earth element; tracer technique