

稀土元素示踪法在坡面侵蚀产沙垂直分布研究中的应用

丁文峰¹, 李占斌², 丁登山¹

(1. 南京大学; 2. 中国科学院, 水利部水土保持研究所)

摘要: 简要分析了核示踪法在土壤侵蚀研究中的应用现状, 并以稀土元素(REE)示踪法为例, 结合不同坡度、不同流量的室内放水冲刷模拟试验对坡面侵蚀产沙垂直分布特征进行了研究, 研究结果表明: 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; 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, 坡面各不同坡段的相对侵蚀量呈现出随坡长的增大而减小的趋势。但坡面最下端坡段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。试验结果还表明 REE 示踪法可以比较满意地说明坡面侵蚀过程中的泥沙来源情况, 是一种研究坡面侵蚀产沙特征的有效方法。

关键词: 稀土元素示踪法; 坡面; 侵蚀产沙; 垂直分布

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2003)01-0065-05

1 引言

土壤侵蚀是当今世界普遍关注的重大环境问题之一。由于它严重地影响到人们赖以生存的环境, 为此土壤侵蚀研究已引起社会各界的广泛关注。目前应用于土壤侵蚀的传统研究方法有径流小区观测法、野外调查法以及遥感和立体摄影法等^[1,2], 这些传统研究方法针对大范围内土壤侵蚀的结果研究较为有效, 但对于侵蚀发生过程中坡面上各不同部位的侵蚀产沙及时空变化规律等问题则显得无能为力。随着科技的发展, 分析手段的提高, 核示踪技术在土壤侵蚀研究中表现出巨大的潜力。与传统的研究方法相比, 不仅技术量化程度高, 而且适合各种地貌类型, 特别是能对时空变化两个方面进行监测, 使土壤侵蚀的研究趋于简单、快速、准确, 因此在土壤侵蚀研究中的应用越来越广泛^[4]。

目前土壤侵蚀研究中的核示踪技术应用可分为放射性核素示踪法和稳定性稀土元素示踪法两大类。放射性核素示踪法应用于土壤侵蚀领域始于 20 世纪 60 年代初^[3], 最早是由 Menzel 等人^[3]提出的, 随后, 澳大利亚、加拿大、英国、朝鲜等国相继对此展开了研究^[4]。我国从 20 世纪 80 年代开始利用核素示踪法进行了土壤侵蚀方面的研究, 如张信宝等^[5,6]利用 ¹³⁷Cs 法研究了农耕地的土壤侵蚀, 李小龙等^[7]利用 ²²⁶Ra 分析法研究小流域泥沙来源, 均取得了初步成效。弥补了传统土壤侵蚀研究中难以刻画不同地形部位侵蚀强度及泥沙来源方面的不足, 由于大多数可用的天然放射性元素多分布在土壤表层, 如果在侵蚀严重的地区, 表土被侵蚀殆尽, 天然放射性示踪元素法则无能为力, 而通过人为施放稳定性稀土元素一方面可以加强人为的目的性, 一方面又提高了精确度和可信度, 并且中子活化分析对大多数稀土元素分析灵敏度较高^[4], 所以对于土壤侵蚀研究, 特

别是针对研究次侵蚀过程中泥沙运移和分布规律, REE 示踪法显示了其特有的强大功能^[8~13]。但由于野外地形、地质条件的千变万化以及其自身操作过程的复杂性, 使得野外大范围内开展示踪研究困难重重, 积极探索室内人工模拟坡面、小流域等地形、地貌特征开展示踪研究成为解决这一矛盾的突破口。本文以稀土元素(REE)示踪法为例, 讨论了其在研究坡面土壤侵蚀产沙垂直分布规律方面的应用。

2 试验原理及方法

2.1 试验原理

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, 使之在整个侵蚀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, 从而判断泥沙的来源及不同地形部位土壤侵蚀的差异, 达到监测泥沙来源及不同地形部位土壤侵蚀量的目的^[15]。

2.2 试验方法

2.2.1 示踪元素的选择及施放浓度估算

根据已有的研究结果^[14,15], 我们选择了在黄土中背景值较低, 且具有较高检测灵敏度的 Ce、Sm、Nd、Dy 四种稀土元素作为示踪元素。

REE 施放浓度的估算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, 可按下列公式计算各种示踪 REE 的施放浓度^[15]:

$$C_j = K \cdot B_j \cdot 10^{-3} / R_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式中 n ——被研究坡面划分的段数; C_j ——第 j 种示踪元素的施放浓度, mg/kg; B_j ——第 j 种示踪元素的土壤背景值, mg/kg; R_j ——第 j 种示踪元素施放部位相对侵蚀量的最小期望值; K ——考虑到其它因素的综合保证系数。

收稿日期: 2002-08-26 修订日期: 2002-10-20

基金项目: 国家自然科学基金委员会重大项目“江河泥沙灾害形成机理及其防治”(59890200-5)

作者简介: 丁文峰(1975-), 男, 博士生, 主要从事土地资源与环境方面的研究。南京大学城市与资源学系, 210093

2.2.2 示踪元素的需要量的估算

根据前面(1)式计算知道了示踪元素所需浓度后,只要根据试验要求确定了施放面积和施放深度后,则可以通过下式(2)计算出某种元素的需要量。在本次试验中,坡面REE的施放深度都定位20 cm。

$Q_j = K \cdot B_j \cdot W_j \cdot 10^{-6} / R_j \quad j = 1, 2, 3, \dots, n$ (2)

式中 n ——被研究坡面划分的段数; Q_j ——第 j 种示踪元素的总施放量, mg; B_j ——第 j 种示踪元素的土壤背景值, mg/kg; R_j ——第 j 种侵蚀类型区最可几侵蚀率 ($0 < R_j < 1$); W_j ——第 j 种示踪元素所代表的总土方量, kg。

2.2.3 示踪土样的配制及布设

配制高浓度的示踪元素土样时,首先称取元素需要量的1/8和2 kg土样混合,用手揉搓、搅拌,直至基本均匀,然后将1/8混合好的高浓度示踪元素土样过筛,使其更加均匀,重复上述步骤8次,配足所需的示踪土样,最后将配制的8份土样混合搅拌过筛,以确保完全均匀并称取一定量的混合好的示踪土样以备中子活化(NAA)分析确定准确的施放浓度。

本次试验稀土元素在坡面上的布设采用段面施放法。首先将供试坡面分为若干坡段,然后将配置的高浓度示踪土样与各坡段内的全部土量充分混合均匀后将其依次布设在坡面上,布设过程中要严格防止土样的混合而造成交叉污染,具体的试验布设如下图1所示。

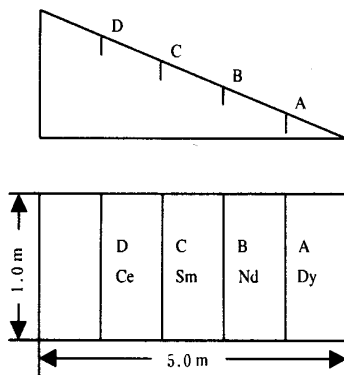


图1 冲刷试验REE布设示意图

Fig 1 Sketch map of REE distribution on the slope

2.3 冲刷试验

本试验供试坡面的面积为500 cm × 100 cm。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五级变化进行组合试验。供试土样采用杨凌当地的壤土,其粒径组成如下表1所示。试验开始前将所选择的稀土元素Dy、Nd、Sm、Ce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,填土完成后使试验槽内的土壤干容重控制在1.25~1.3 g/cm³之间。试验中供水设备采用定水头供水控制流量。试验开始后,当坡面上开始产流后采集坡面出口的径流泥沙样,产流初期每一分钟取一次径流泥沙样,3 min后每2 min取一次径流泥沙样。整个试验过程持续15 min。每个放水流量值连续重复试验2次。

2.4 样品的采集与制备

将试验过程中采集到的径流泥沙样品在室温下风干,均匀混合后利用网格法取100 g左右研磨后过100目筛,最后取其中50~100 mg样品,封装于1 cm × 1 cm左右的高纯铝箔袋内,再利用铝箔包好作活化靶用,样品照射在中国原子能科学研究所的核反应堆内进行,最后利用各元素的含量根据物质守恒原理计算出坡面不同部位的侵蚀产沙量。

表1 试验土壤的粒径组成

Table 1 Particle composition of experimental soil

土壤粒径 /mm	1~0.25	0.25~0.05	0.05~0.01	0.01~0.005	0.005~0.001	<0.001
百分含量 /%	0.12	2.70	41.13	6.88	12.89	36.28

3 结果与分析

3.1 精度分析

根据各泥沙过程样品中各元素的含量,可用式(3)计算坡面上各段面在不同时间段内的侵蚀量

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

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, mg/kg; B_i ——第 i 种元素的背景值, mg/kg; C_i ——泥沙中第 i 种元素的浓度, mg/kg; W ——每个样品的总泥沙量, kg。

表2 坡面不同坡段的侵蚀量及相对侵蚀量

Table 2 Erosion mass and relative erosion mass of the different sections of slope

坡度 / (°)	流量 / L · 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

注: A、B、C、D 为自坡底向坡顶依次均分的坡段标号。

从上表中可以看出,试验大部分误差均在15%以内,满足土壤侵蚀研究中的精度要求,说明利用稀土元素示踪法来研究坡面土壤侵蚀规律是可行的。

3.2 坡面土壤侵蚀产沙的垂直分布

通过对表2中的数据分析,我们可以得出在放水冲刷侵蚀试验过程中坡面不同坡段相对侵蚀量的变化规律。图2a、b、c分别为以全坡长径流小区斜坡长为横坐标,以所对应的相对侵蚀量为纵坐标,以各种不同放水流量为研究单元的研究结果。由图2可以看出,在坡度

较小的情况下(6 和 9)不受产流过程及时间变化的制约,坡面各不同坡段的相对侵蚀量随坡长的变化趋势基本相似,近似于向下凹的抛物线型;即基本上在坡面中部的坡段侵蚀强度为最小,坡面最上端和最下端坡段的相对侵蚀量较大并呈现出有规律的变化趋势,坡面最下端坡段的相对侵蚀量随放水流量的增大而依次减小,坡

面最上端坡段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 2.5 L/min 和 3.5 L/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。

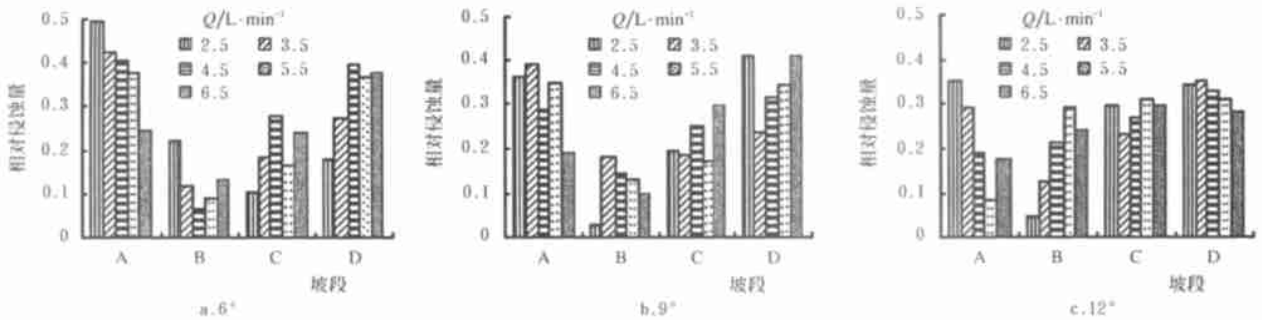


图 2 不同坡度不同流量下各坡段相对侵蚀量变化图

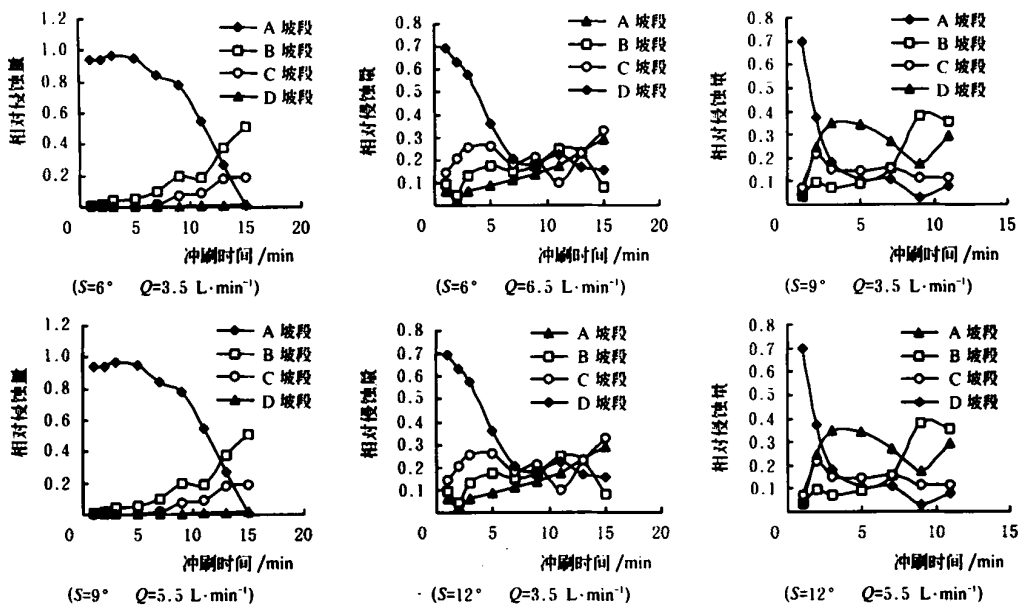
Fig. 2 Relative erosion mass variation of the different sections of slope under the different flow discharges and slope gradient

3.3 次侵蚀过程中坡面侵蚀产沙过程

由于单次放水冲刷试验产生的泥沙基本上都被冲刷移出坡面,没有沉积,因此一次试验过程中的数据可以反映出冲刷侵蚀的产沙状况。通过对侵蚀过程 REE 示踪元素的含量分析,可以得出在放水冲刷侵蚀试验过程中坡面不同坡段相对侵蚀量随时间的变化规律。

图 3 显示了坡面小区在所进行的试验中各部位的

相对侵蚀量的变化趋势。从图中可以看出,试验坡面在不同放水流量、不同坡度的组合试验中其各个坡段的相对侵蚀量有着不同的变化趋势,但也存在着某些共同的变化特点,在所有的试验过程中,离坡面出口最近的坡面最下端坡段(即图中的 A 坡段)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是缓慢波动式上升。



注: A 坡段指试验坡面的最下端坡段; B 坡段指试验坡面的从下端数第二坡段; C 坡段指试验坡面的从下端数第三坡段; D 坡段指试验坡面的最上端坡段

图 3 不同流量不同坡度下各坡段所占总侵蚀量的比例时间变化图

Fig. 3 Relative erosion of the different section erosion mass to the total erosion mass under the different flow discharges and slope gradients

并且我们还可以从图中看出, 坡面最下端坡段的相对侵蚀量在相同坡度、不同流量情况下在冲刷初期所占总侵蚀量的比例随着放水流量的增大而呈现出下降的趋势。分析出现这种现象的原因, 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。对于这种现象的出现还有一种解释就是, 在离坡面出口最近的 A 坡段, 当径流流出坡面时, 由于土槽的出水口最容易发生溯源侵蚀, 因此该坡段在冲刷初期的相对侵蚀量占有较大的比重。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, 其侵蚀量出现增长的趋势, 这样当含有较多泥沙的径流流动到坡面下游坡段时, 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(A 坡段)的相对侵蚀量出现随冲刷时间的延长而出现出递减的趋势是合理的。

从相同坡度、不同流量情况下的试验结果的分析可以看出, 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所占比例呈现出增大的现象, 这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, 如图 3 中所示(坡度 $12^\circ = 3.5 \text{ L/m in}$), 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(65% ~ 70%), 而位于坡面最下端坡段的相对侵蚀量只有 15% 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, 自该坡段向下的坡段随即出现相对侵蚀量增加的趋势。

4 结 论

本文通过一系列的室内模拟试验将 REE 引入坡面泥沙来源研究, 得到以下试验结果。

1) 通过试验研究表明 REE 多元素示踪法是土壤侵蚀垂直分布定量分析研究中比较理想的分析方法。该方法不仅可以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规律, 是一种研究坡面侵蚀发生发展规律的有效方法。

2) 径流冲刷条件下, 坡面侵蚀产沙的空间变化规律为: 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; 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, 坡面各不同坡段的相对侵蚀量呈现出随坡长的增大而减小的趋势。但坡面最下端坡段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。

3) 该方法较好的解决了坡面土壤侵蚀垂直分布特征, 但是由于其本身操作上的复杂性以及野外条件的千差万别, 使得广泛应用于野外还有一定的难度, 本文只是通过室内模拟研究了坡面侵蚀的垂直分布特征, 积极探索如何在野外研究中广泛应用将是今后研究要解决的关键问题。

[参 考 文 献]

- [1] 王礼先 关于土壤侵蚀规律研究的目的与方法[J]. 水土保持通报, 1981, 3, 17~ 21.
- [2] Loughran R. J. The measurement of soil erosion [J]. Progress in Physical Geography, 1989, 13: 216~ 233
- [3] Menzel R. G. Transport of ^{90}Sr in runoff [J]. Science (Washington), 1960, 131: 499~ 500
- [4] 杨明义, 田均良, 石 辉 核分析技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2): 100~ 112
- [5] 张信宝, 汪阳春, 李少龙等 蒋家沟流域土壤侵蚀及泥石流细粒物质来源的 ^{137}Cs 法初步研究[J]. 中国水土保持, 1992, 2: 28~ 31
- [6] 张信宝, 李少龙, 王成华等 黄土高原小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究[J]. 科学通报, 1989, 3: 210~ 213
- [7] 李少龙, 苏春江, 白立新等 小流域泥沙来源的 ^{226}Ra 法研究[J]. 山地研究, 1995, 13(3): 199~ 202
- [8] Knaus R. W., Vangent D. L. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding wetland III A new soil horizon marker for measuring recent accretion [J]. Estuaries 1989, 12(4): 269~ 283
- [9] 田均良, 彭祥林等 黄土高原土壤地球化学[M]. 科学出版社, 1994, 169~ 178
- [10] 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~ 62
- [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 锴, 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] 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
- [15] 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

Application of REE trace method to vertical erosion on land slope

Ding Wenfeng¹, Li Zhanbin², Ding Dengshan¹

(1. *Urban and Resources Science Department of Nanjing University, Nanjing 210093, China;* 2. *Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China*)

Abstract Rare earth element (REE) tracing method is a new method to study soil erosions. It is widely used in the studying of the laws of erosion vertical distribution on land slope due to its accuracy. Based on the reviewing of the REE (Rare Earth Element) trace method and the present application of the method to the study of soil erosion. The tracing and NAA technology, the calculation of the erosion results, as well as its application in the soil erosion on slope were introduced. Combined with the runoff scouring method under the different slope gradients, different flow discharges and REE (Rare Earth Element) technology, the temporal and spatial variation rules of the sediment yield on the land slope were studied in this paper. The results showed that the relative erosion mass of the different section along the slope decreases at the beginning and increases at the later period. Experiments on the steeper slope with a smaller flow discharge indicated that the relative erosion mass of the different section along the slope is similar to that on the gentle slope. With the larger flow discharge, the relative erosion mass decreases with an increase in the length of slope. The temporal variation of sediment yield on the slope is that the relative erosion mass at the bottom section of the slope decreases with experimental time increase, while the relative erosion mass on other section increases fluctuantly.

Key words: REE trace method; vertical soil erosion; land slope

《农业工程学报》编辑部提请作者提高论文英文摘要的写作质量

编辑部为积极配合科协“提高学术期刊论文英文摘要写作质量及开展英文摘要达标荐优活动”(见 114 页“通知”), 请作者进一步提高论文摘要的写作质量。编辑部已于 2002 年 10 月聘请一在京加拿大籍老师, 审查修改拟发表论文的英文摘要。每期出刊后编辑部将向《中国学术期刊文摘》选送一篇优秀英文摘要。择优标准主要有: (1) 论文优秀; (2) 摘要包含目

的、方法、结果和结论四要素, 内容独立完整, 符合摘要写作的形式要求, 每篇要有 10 个左右完整句子组成; (3) 语句简练符合英文的表达习惯等。编辑部将综合审稿人意见、标准衡量及外教审查意见等遴选。选出的优秀英文摘要将在上报的同时, 也将在《农业工程学报》上公布, 供广大作者学习参考。

(本 刊)