

# 可活化稳定核素示踪法在土壤 侵蚀研究中的应用

李雅琦 田均良 刘普灵 石 辉

(中国科学院  
水 利 部 水土保持研究所 杨陵 712100)

**摘要** 简要介绍了核示踪法在土壤侵蚀研究中的应用现状,并以稀土元素示踪法为例,重点讨论了可活化稳定核素示踪法在土壤侵蚀研究中的应用与进展。试验结果展示了可活化稳定核素示踪技术在研究土壤侵蚀时空分布、泥沙运移、沉积过程及小流域泥沙来源等方面有着广阔的应用前景。

**关键词** 核示踪法, 土壤侵蚀, 稀土元素

土壤侵蚀是关系到人类生存和工农业持续发展的环境问题。利用先进的科学技术和研究方法可为侵蚀区综合治理提供可靠的科学依据。目前研究土壤侵蚀的方法<sup>[1]</sup>如径流小区法、通用流失方程式、遥感、摄影法等各有其特色及适用性,但它们多用于监测土壤侵蚀作用的后果,况且有的观测方法费工、费时,代表性尚不尽人意。

国外在示踪技术应用于土壤侵蚀研究方面已有 30 多年的历史。早在 60 年代初, Menzel<sup>[2]</sup>运用放射性核素沉降研究土壤侵蚀,为土壤侵蚀研究的新技术应用开辟了一条新路,同时也为示踪技术的蓬勃发展开拓了新的应用领域。70 年代初,美国、瑞士、朝鲜等国的科学家们相继利用大气沉积的放射性核素研究农林系统的土壤侵蚀及沉积分布;80 年代,美国 Knaus<sup>[3]</sup>利用稳定性同位素示踪研究沼泽地的土壤侵蚀沉积速率;90 年代以来,澳大利亚开展了同时利用<sup>7</sup>Be、<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb 及<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th 等多种土壤核素示踪法研究小流域泥沙来源<sup>[4]</sup>。我国从 80 年代开始,利用核示踪法进行了土壤侵蚀研究,如张信宝等<sup>[5]</sup>利用<sup>137</sup>Cs 法研究了农耕地的土壤侵蚀,李小龙等<sup>[6]</sup>利用<sup>226</sup>Ra 分析法研究小流域泥沙来源,马建国等<sup>[7]</sup>利用土壤特征元素(核素)法研究土壤中的泥沙运移轨迹,均取得了初步成效。核示踪技术的利用与开发,促进了土壤侵蚀的量化研究进入新的阶段。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可活化稳定性核素示踪法两大类。放射性核素示踪法包括:<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb、<sup>226</sup>Ra、<sup>232</sup>Th、<sup>56</sup>Mn 和<sup>134</sup>Cs 核素示踪等。可活化稳定核素示踪法包括:(1)利用不同部位或不同地段土壤中的元素丰度分布特征及含量差异,通过中子活化分析等分析技术,判测泥沙来源与侵蚀强度分布<sup>[7]</sup>;(2)将人工施放的具有可活化的稳定性核素的元素化合物作为示踪剂,利用 INAA 分析方法,研究侵蚀泥沙分布运动变化规律<sup>[8]</sup>。

本文仅以稀土元素(REE)示踪法为例,讨论可活化核素示踪法在土壤侵蚀研究中的应用前景。

## 1 实验方法

### 1.1 示踪元素的选择与施放

用于土壤侵蚀研究的示踪元素必须具备以下条件:(1)元素(核素)应与土壤有较好的

结合能力; (2) 土壤中该元素含量甚微; (3) 植物富集有限, 淋溶迁移不明显; (9) 无环境危害。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, 示踪元素还应具有施加量少、易于识别和探测的特征。稀土元素具有上述基本特征, 而且稀土元素之间化学性质及表生地球化学行为非常相似, 选用 REE 为示踪元素, 还可克服多种元素之间的理化特性差异而产生的误差。为此, 我们在进行黄土高原土壤侵蚀垂直分布定量分析研究中, 选用了 La、Ce、Nd、Sm、Eu、Dy 六种元素的氧化物进行示踪试验。

### REE 示踪元素施放浓度计算<sup>[9]</sup>

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

式中,  $n$  为小区划分的总区段 (或条带) 数,  $C_j$  为小区第  $j$  段示踪元素施放浓度,  $B_j$  为第  $j$  段示踪元素的土壤背景值,  $R_j$  为第  $j$  段坡面相对侵蚀量最小期望值,  $K$  为考虑到影响示踪元素探测极限等某些因素的综合保证系数。

示踪试验在水土保持研究所安塞生态试验站进行, 全坡长小区面积为  $100\text{m} \times 5\text{m}$ , 平均坡度  $25^\circ$ 。示踪元素的布设小区从上至下划分为六段, 在每一段接近下沿  $1/3$  处设置示踪条带, La、Ce、Nd、Sm、Eu、Dy 六种元素的氧化物分别和条带土壤均匀混合后, 在小区自上而下依次布设。

### 1.2 样品采集、制备与测量

在施放示踪元素前, 在试验小区采集土壤背景样; 在降雨试验期间, 采集径流浑水样; 降雨后, 在小区下部沉积池, 利用网格法取样, 以保证样品的代表性。

全部样品在室温下风干, 均匀混合后, 利用网格法取  $100\text{g}$  左右, 研磨后过  $100$  目筛, 最后取  $50\text{--}100\text{mg}$  左右的样品, 封装于  $1\text{cm} \times 1\text{cm}$  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院的核反应堆内进行, 每  $50$  个样品 (包括标准样品和质控样品) 组成一活化靶, 照射中子积分通量为  $10^{13}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$ 。

活化后的样品按照土壤元素活化分析程序, 在配有 Ortec 高纯锗探测器的多道- 计算机系统上测定, 该系统对  $^{60}\text{Co}$  的  $1332\text{keV}$  处的  $\gamma$  射线能量分辨率为  $2.0\text{keV}$ 。示踪元素的放射化学特征如表 1 所示。

表 1 某些 REE 放射性核素的基本特征

Table 1 Basic characteristics of some rare- earth radionuclides

元素 Ele- ment	黄土高原 REE 含量 REE content in Loess Plateau / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	稳定性 核素 Stable nuclide	中子活化截面 Activation cross- section / $\times 10^{-24}\text{cm}^2$	活化后放 射性核素 Radionu- clide	特征 $\gamma$ 射线能量 Energy of characteristic gamma ray / $\text{keV}$	$T_{1/2}$	INAA 检测限 INAA detection limit / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
La	34.3	$^{139}\text{La}$	9.0	$^{140}\text{La}$	1596.5	40.27h	< 0.1
Ce	63.2	$^{140}\text{Ce}$	0.57	$^{141}\text{Ce}$	145.4	32.5d	< 0.1
Nd	31.2	$^{144}\text{Nd}$	1.4	$^{145}\text{Nd}$	91.1	11.0d	1
Sm	5.47	$^{152}\text{Sm}$	206	$^{153}\text{Sm}$	103.2	46.8h	0.01
Eu	1.15	$^{151}\text{Eu}$	9200	$^{152}\text{Eu}$	1408.0	13.33a	0.001
Yb	2.74	$^{168}\text{Yb}$	3470	$^{169}\text{Yb}$	177.2	32d	< 0.01
Dy	4.00	$^{164}\text{Dy}$	2700	$^{165}\text{Dy}$	94.7	2.33h	< 0.01

## 2 结果与讨论

### 2.1 示踪法定量监测土壤侵蚀的精度评价

示踪法的监测精度可用下式表示

$$E = \frac{\sum_{j=1}^n W_j}{W} - 1$$

式中,  $W_j$  为第  $j$  个地形部位的侵蚀量;  $W$  为示踪小区的总侵蚀量;  $E$  为侵蚀量的监测精度;  $n$  为地形部位的划分段数, 即示踪元素的种类。

我们利用段面法及条带法进行的 REE 示踪法室内模拟试验结果, 说明 REE 示踪法测定土壤侵蚀分布状况具有令人满意的精度 ( $E$  值小于 15%)<sup>[9]</sup>, 且条带施放法分析结果 (包括侵蚀分布模式及精度) 与面施法非常吻合, 表明条带示踪法可用于野外土壤侵蚀垂直分布研究。和段面施放法相比, 条带施放法更简单易行。据此, 我们利用条带法进行了野外试验研究。连续四年的野外 REE 试验结果表明, 该方法对全坡长小区不同部位的相对侵蚀量的监测精度好于 15%。

### 2.2 不同地形部位的相对侵蚀量分布模式

根据各条带的 REE 施放浓度和集水池中的示踪元素含量即可计算出各坡段相对侵蚀量。表 2 给出了几年来在野外试验小区中所出现的几种降雨侵蚀分布模式。表中括号内数据表示次降雨平均雨强 ( $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$ )。

表 2 野外小区不同区段的相对侵蚀量分布模式

Table 2 Relative soil erosion distribution model in different sections along a field plot

区段 Section	示踪带距坡顶距离 Traced belt distance from the top/m	次降雨相对侵蚀量 Individual rainfall relative erosion amount/%				
		1993- 07- 26 (15.07)	1994- 07- 07 (10.21)	1994- 07- 19 (21.4)	1994- 08- 03 (3.83)	1995- 07- 14 (67.4)
La	16	0.114	0.025	0.033	0.021	0.179
Ce	37	0.193	0.126	0.110	0.090	0.169
Nd	54.5	0.103	0.062	0.149	0.224	0.194
Sm	72	0.091	0.147	0.217	0.257	0.198
Eu	89.5	0.210	0.139	0.236	0.167	0.098
Dy	107	0.296	0.498	0.251	0.258	0.167
合计 Total		1.01	0.997	0.996	1.017	1.005

由表 2 可以看出, 在不同次降雨中, 侵蚀泥沙沿野外小区的分布模式不尽相同。除 1995 年 7 月 14 日小区各段的产沙量变化不大外, 其它次降雨的侵蚀泥沙分布总体上随坡长的长度增加而呈上升趋势, 反映了侵蚀量随坡面汇流面积增大而径流量增加、侵蚀力增强的坡面土壤侵蚀特征。但在这种总趋势下, 分布特征也表现出了某些局部的分异现象。如 1993 年 7 月 26 日, 在坡面中部, 距坡顶 50—70m 段处出现了侵蚀量下降的现象, 而 1994 年 8 月 3 日的降雨侵蚀在该部却呈增强趋势。

不同的侵蚀分布模式, 反映了坡面侵蚀的复杂性。由于侵蚀量的分布受到坡面微地貌、容重等土壤特性及雨型和降雨强度多种因素的影响, 因此 REE 示踪法测得的土壤侵蚀分布的量化结果将有助于深入研究这些因素的影响程度。

### 2.3 侵蚀泥沙在坡面沉积中的分布

图 1 给出了 1993 年沿野外径流小区泥沙沉积的变化趋势。由图 1 可看出，侵蚀泥沙的沉积主要沿径流方向，发生在邻近的径流区内，随着距离的增加，沉积量急剧减少。来自坡面上部的泥沙在坡面上部的沉积比下部更显著。这种现象与侵蚀的种类和坡面径流特征相符合。在坡面上部以面蚀和轻微的细沟侵蚀为主，汇流现象不明显，径流运载泥沙能力较弱，所以泥沙的沉积现象相对显著。而坡面中下部位，由于汇流作用，细沟、浅沟侵蚀较多，集中于细沟浅沟的流量大，使对侵蚀泥沙在坡面的中下部运移能力增强，沉积作用相对较弱。

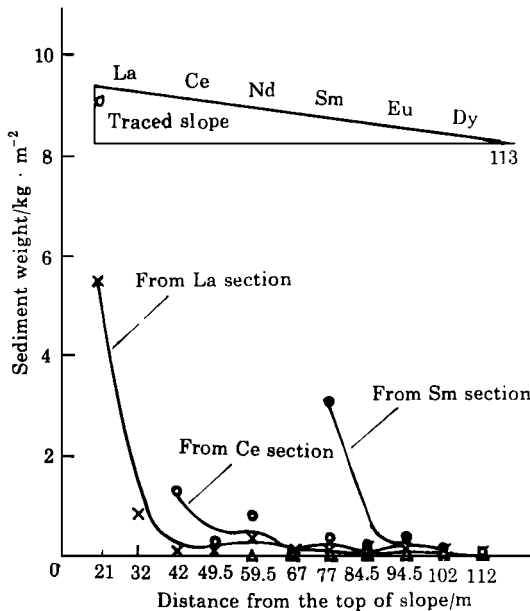


图 1 野外径流小区泥沙沉积分布趋势

g. 1 Eroded silt deposition patterns along a field run- off plot

### 2.4 REE 示踪法研究小流域泥沙来源

通过室内小流域模型，已将 REE 示踪法应用于定性研究小流域侵蚀产沙过程及产沙部位<sup>[10]</sup>。实验结果表明，小流域侵蚀产沙的主要源区随流域沟道的侵蚀发育在不断变化。在流域发育的初级阶段，沟道下切侵蚀是一种主要的侵蚀方式。沟坡侵蚀的比例与小流域发育状况密切相关。虽然利用室内模型模拟研究小流域泥沙来源尚存在一些局限性，但表明了 REE 示踪法可望用于研究小流域各地形部位的侵蚀过程和产沙特征，反映小流域泥沙来源的时空变化规律，因此具有广阔的应用前景。

## 3 结 语

以我们建立的 REE 示踪法为例，简述了可活化核素示踪法在土壤侵蚀中的应用效果。应用结果表明，可活化核素示踪法在土壤侵蚀过程、土壤侵蚀预报预测、小流域泥沙来源及水土保持措施效益评价等方面有着广阔的应用前景。随着土壤侵蚀量化研究的不断深入，核示踪法的应用也将会更广泛、更完善。

## 参 考 文 献

- 1 王礼先. 水土保持通报, 1981; (3): 17
- 2 Menzel R G. Science (Washington), 1960; **131**: 499
- 3 Knaus R M. Estuaries, 1989; **12** (4): 269
- 4 Murray J M O. Water Resources Res, 1993; **26** (4): 1037
- 5 张信宝, 李沙龙, 王成华, 等. 科学通报, 1989; (3): 210
- 6 李小龙, 苏春江, 白立新, 等. 山地研究, 1995; **13** (3): 199
- 7 马建国, 柴之芳, 毛雪瑛, 等. 核技术, 1990; **13** (10): 612
- 8 田均良, 李雅琦, 黄义端, 等. 水土保持学报, 1992; **6** (1): 77
- 9 田均良, 周佩华, 刘普灵, 等. 水土保持学报, 1992; **6** (4): 23
- 10 石辉. 利用 REE 示踪法研究小流域泥沙来源, 中国科学院、水利部水土保持研究所, 1995 届硕士论文, 1995

**Application of activable stable nuclide tracers to the soil erosion study**

Li Yaqi Tian Junliang Liu Puling Shi Hui

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

**Abstract**

The present application of activable stable nuclide tracers to the study of soil erosion is discussed. The rare earth element tracers are taken as an example and the emphasis is placed on the application and prospect of the activable nuclide tracer method. Experiment results have shown that the method has a great future in the studies on spatial and temporal distributions of soil erosion, sediment movement and deposition process as well as the sediment origin in small watershed.

**Key words** Nuclear tracer, Soil erosion, Rare earth elements