

侵蚀泥沙研究的<sup>137</sup>Cs 核示踪技术

张信宝<sup>1,3</sup>, 贺秀斌<sup>1</sup>, 文安邦<sup>1</sup>, 郑进军<sup>1</sup>

(1. 中科院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;

2. 中科院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 10075;

3. 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:** <sup>137</sup>Cs 是上世纪 50– 70 年代大气核试验产生的核尘埃, 1963 年产出量最大, 半衰期 30.1a。<sup>137</sup>Cs 主要伴随降水降落到地表, 随即被土壤颗粒吸附, <sup>137</sup>Cs 以后的迁移主要伴随被吸附土壤颗粒的运移。上世纪 80 年代以来, <sup>137</sup>Cs 示踪技术已广泛应用于侵蚀泥沙研究中。简要介绍了<sup>137</sup>Cs 示踪技术的基本原理, 和在黄土高原、长江上游等地侵蚀速率测定, 泥沙来源调查, 塘库沉积物断代等研究中的一些应用实例。  
**关键词:** <sup>137</sup>Cs; 侵蚀泥沙; 黄土高原; 长江上游  
**中图分类号:** S157; TL99      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1005-3409(2007)02-0152-03

The <sup>137</sup>Cs Nuclear Tracing Technique for  
Soil Erosion and Sedimentation Studies

ZHANG Xin-bao<sup>1,3</sup>, HE Xiu-bin<sup>1</sup>, WEN An-bang<sup>1</sup>, ZHENG Jin-jun<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China;

2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, CAS, Xi'an 710075, China;

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** <sup>137</sup>Cs is an artificial radionuclide with a half-life of 30.1 years which released into the environment as a result of atmospheric testing of nuclear weapons during the period of 1950s to 1970s with a peak deposition in 1963. <sup>137</sup>Cs fallout was strongly and rapidly adsorbed by soil particles when it deposited on the ground mostly with precipitation. Its following movements will associate with the adsorbed particles. <sup>137</sup>Cs tracing technique has been widely used in soil erosion and sedimentation studies since 1980s. The authors introduce the bases of the technique and show several case studies of assessment of soil erosion rates, investigation of sediment sources and dating of reservoir deposits by using the technique in the loess Plateau and the Upper Yangtze River Basin.  
**Key words:** <sup>137</sup>Cs; soil and sedimentation; the Loess Plateau; the upper Yangtze River Basin

上世纪 60 年代以来, <sup>137</sup>Cs 等核示踪技术在侵蚀泥沙研究中得到了越来越广泛的应用, 技术也日趋成熟。本文简要介绍<sup>137</sup>Cs 核示踪技术的基本原理, 和在我国黄土高原、长江上游等地侵蚀泥沙研究中的一些应用实例。

1 基本原理

地表环境中的<sup>137</sup>Cs 核尘埃, 主要来源于 20 世纪 50~ 70 年代期间的大气核试验, 半衰期 30.1 a。1954~ 1970 年是<sup>137</sup>Cs 核尘埃的主要沉降期, 其中 1963 年沉降量最大; 1970 年后的沉降量极微<sup>[1]</sup>。1986 年前苏联切尔诺贝利核事故对欧洲影响较大, 对东亚影响甚微(图 1)<sup>[2]</sup>。<sup>137</sup>Cs 核尘埃主要伴随降水降落到地表, 随即被土壤颗粒吸附, <sup>137</sup>Cs 以后的迁移主要伴随被吸附土壤颗粒的运移。非农耕地土壤剖面中, 0~ 5 cm 表层土壤的<sup>137</sup>Cs 含量最高, 向下呈指数衰减, 20 cm 深度以下土层基本不含<sup>137</sup>Cs; 农耕地土壤剖面中, <sup>137</sup>Cs 基本均匀分布于犁耕层深度内(图 2)<sup>[3]</sup>。<sup>137</sup>Cs 在地表环境中的迁移见图 3。侵蚀泥沙研究中, <sup>137</sup>Cs 主要用于测定 1963 年以来的侵蚀速率, 调查流域泥沙来源, 湖库沉积物断代和侵蚀

泥沙规律的研究<sup>[1, 3- 10]</sup>。

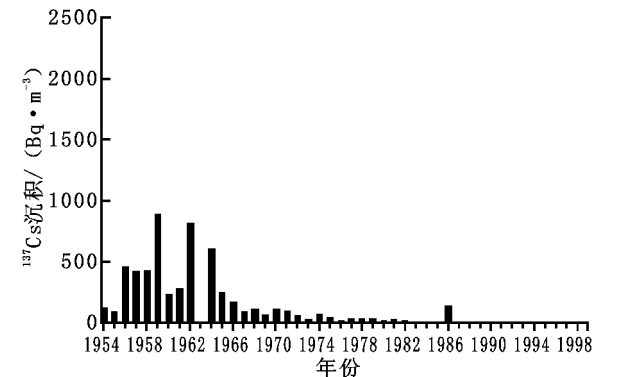


图 1 日本东京 1954~ 1999 年期间<sup>137</sup>Cs 年沉降量

2 测定侵蚀速率

侵蚀土壤剖面的<sup>137</sup>Cs 面积活度往往低于当地的<sup>137</sup>Cs 本底值, 利用相关公式可以求算侵蚀土壤剖面的侵蚀速率<sup>[5]</sup>。

\* 收稿日期: 2006-06-20  
基金项目: 国家自然科学基金项目(批准号: 40271015); 国际原子能机构(12300/RO)资助  
作者简介: 张信宝(1946–), 男, 江苏镇江市人, 研究员, 博士生导师, 四川省学术与技术带头人, 中国水土保持学会小流域治理专业委员会委员, 中国土壤学会土壤侵蚀专业委员会委员, 长期从事水土保持和生态环境整治的研究。

农耕地侵蚀速率计算多采用质量平衡模型(mass balance model):

$$A = A_{ref} \left( 1 - \frac{h}{H} \right)^{t-1963}$$

(1)

式中:  $A$ ——侵蚀土壤剖面的<sup>137</sup>Cs 面积活度 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ ),  $A_{ref}$ ——<sup>137</sup>Cs 本底值 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ ),  $h$ ——年土壤流失厚度 (cm),  $H$ ——犁耕层深度 (cm),  $t$ ——取样年份。

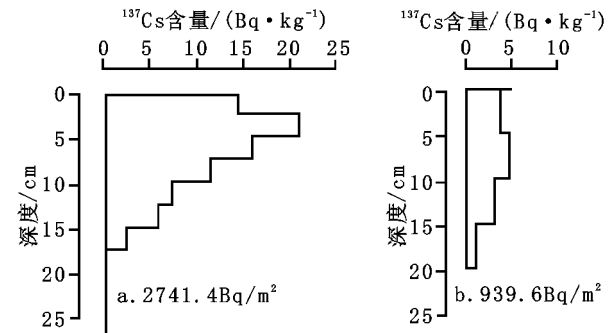


图2 无侵蚀非农耕地(a)与侵蚀农耕地土壤剖面(b)的<sup>137</sup>Cs 深度分布  
非农耕地多采用剖面模型(profile model):

$$A(x) = A_{ref} (1 - e^{-ax})$$

(2)

式中:  $A(x)$ ——土壤剖面中某一深度( $x$ )以上的<sup>137</sup>Cs 面积活度 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ ),  $A_{ref}$ ——<sup>137</sup>Cs 本底值 ( $\text{Bq}/\text{m}^2$ ),  $a$ ——<sup>137</sup>Cs 深度分布系数。

陕北安塞梁峁坡地( $L = 88.82 \text{ m}$ ,  $\alpha = 11.2^\circ$ ) <sup>137</sup>Cs 面积活度的空间分布(1992)见图4。由图可见, 坡顶的<sup>137</sup>Cs 面积活度大于  $2000 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 略低于本底值  $2540 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 侵蚀轻微; 随着坡长的增加, <sup>137</sup>Cs 面积活度迅速降低至不足  $700 \text{ Bq}/\text{m}^2$ ; 坡脚处, <sup>137</sup>Cs 面积活度有所增加, 土壤堆积发生的部位, <sup>137</sup>Cs 面积活度高于  $2500 \text{ Bq}/\text{m}^2$ 。地块的平均<sup>137</sup>Cs 面积活度  $1106.3 \text{ Bq}/\text{m}^2$  ( $n = 112$ ), 为本底值的  $43.53\%$ , 用式(1)求得的侵蚀速率的加权平均值为  $4858.6 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$  [3]。

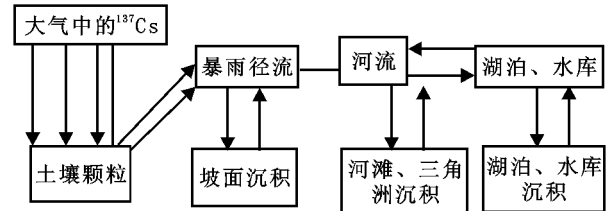


图3 地表环境中<sup>137</sup>Cs 的迁移  
长江上游云南元谋和陕西镇巴耕地<sup>137</sup>Cs 面积活度的

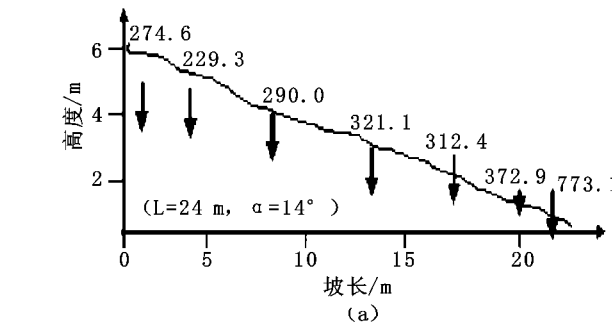


图5 云南元谋(a)和陕南镇巴(b)坡耕地<sup>137</sup>Cs 面积活度( $\text{Bq}/\text{m}^2$ )的顺坡分布  
黄河中游大、中河流洪水悬移质泥沙和小流域坝库沉积泥沙的<sup>137</sup>Cs 平均含量分别为  $0.74 \text{ Bq}/\text{kg}$  和  $0.90 \text{ Bq}/\text{kg}$ , 远低于丘陵区沟间地坡耕地耕作土的<sup>137</sup>Cs 含量平均值  $3.41 \text{ Bq}/\text{kg}$ , 显然沟谷地是河流泥沙的主要来源。根据干支流 7

顺坡分布(1997)见图4。坡长较短的元谋燥红土坡地( $L = 24 \text{ m}$ ,  $\alpha = 14^\circ$ ), <sup>137</sup>Cs 面积活度顺坡基本呈增加的趋势, 平均值  $367.6 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 为本底值  $620 \text{ Bq}/\text{m}^2$  的  $59.3\%$ ; 坡长较长的镇巴砾质土地地( $L = 54 \text{ m}$ ,  $\alpha = 31^\circ$ ), <sup>137</sup>Cs 面积活度从坡顶向下, 先略有降低, 然后基本呈增加的趋势, 平均值  $1847.7 \text{ Bq}/\text{m}^2$ , 为本底值  $2375 \text{ Bq}/\text{m}^2$  的  $77.8\%$ 。元谋和镇巴坡地用式(1)求得的侵蚀速率的加权平均值为分别为  $985 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^1)$  和  $2740 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}^1)$ 。镇巴坡地虽然坡度大, 但砾质土抗蚀性好, 侵蚀模数反而低于元谋坡地[8,9]。

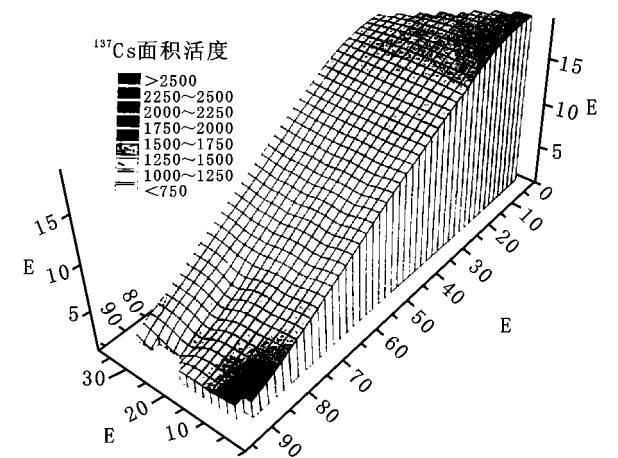


图4 陕北安塞梁峁坡地<sup>137</sup>Cs 面积活度的空间分布(1992)

3 调查泥沙来源

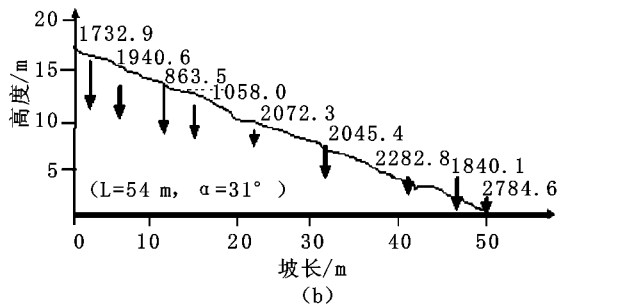
根据流域内源土地壤和产出泥沙的<sup>137</sup>Cs 等示踪物含量的对比, 可以求算不同源地的相对来沙量[1]; 根据流域内源土地壤和产出泥沙的<sup>137</sup>Cs 等示踪物含量的对比, 可以求算不同源地的相对来沙量[1]:

$$\begin{cases} S_k = \sum_{i=1}^n S_{ki} b_i \quad (k = 1 \dots n-1) \\ \sum_{i=1}^n b_i = 1 \end{cases}$$

(3)

式中:  $S_k$ ——泥沙中 $k$ 种示踪物的含量,  $S_{ki}$ —— $i$ 类源土地壤中 $k$ 种示踪物的含量,  $b_i$ —— $i$ 类源土地壤的相对来沙量。

黄土高原沟间地侵蚀以坡耕地面蚀和细沟侵蚀为主, 产出泥沙含<sup>137</sup>Cs; 沟谷地侵蚀以冲沟侵蚀和重力侵蚀为主, 产出泥沙基本不含<sup>137</sup>Cs。通过沟间地土壤和坝库沉积泥沙(或河流泥沙) <sup>137</sup>Cs 含量的对比, 可以求算出流域内沟间地、沟谷地的相对产沙量。





理系统中最重要的一个功能模块,它提供操作简单、功能强大,包括可视查询和 SQL 查询,利用多媒体手段多角度、多层次地将宁南山区退耕还林还草管理生动直观地表示出来。

(1) 地图查询。通过鼠标,用弹出工具对退耕还林还草相关图件进行直接的查询,查询方式为点查询,矩形查询,圆查询等,点取各种对象(点、线、面),就可获得与查询范围内的信息。

(2) 一般条件查询。用户自定义查询,设计对话框,可以把需要查询的地名等输入,进行查询,查询完毕,满足条件的图元及其相关的信息就被检索并显示出来。查询条件可按类型、按名称、按河流、按距离、按区域等,包括条件查询和模糊查询。

(3) 高级查询。根据系统中图层已建好的拓扑关系,利用空间分析功能,可实现 SQL 查询,利用现有数据库模拟出退耕信息,同时能够自动探测相关要素周边信息并报告,例如,可以选择条件为“海拔 800 m 以上,坡度 15~ 25°,面积大于 24 hm<sup>2</sup> 的地区”,查询完毕,满足条件的图元及其相关的信息就被检索并显示出来。

(4) 空间分析。本菜单功能主要是提供相关人员 GIS 空间分析中最常用的叠加分析、缓冲区等操作。通过该菜单可以选择调用土地利用现状图与研究区的地形坡度图、土壤侵蚀强度图和土壤侵蚀潜在危险度图等退耕相关多元信息的叠加,通过多因子分析或其它模型的计算,自动统计出符合这些条件的土地面积,并指出这些地块的分布情况,同时生成退耕还林还草的专题图、统计表等。缓冲区分析对退耕还林还草规划有辅助作用,例如对沿河、湖泊等地区地建立缓冲区实行退耕还林还草规划。

(5) 三维视景。本菜单的功能主要包括退耕还林还草数据的三维可视化以及交互操作功能,利用宁南山区 DEM 叠加不同时期影像、退耕还林专题图生成直观的宁南山区三维视景,可以清楚、直观地看到退耕还林还草地成果等。

2.3.3 专题图模块

此模块主要以图表数据的形式对宁南山区退耕还林还参考文献:

[ 1 ] 石云,米文宝,刘万青. 3S 技术在宁夏南部山区退耕还林还草中的应用[J]. 水土保持研究,2006,13 ( 1 ) :109– 111.  
[ 2 ] 孙希华,姚孝友,周虹,等. 基于 GIS 的青岛市山丘区退耕还林还草决策方案分析[J]. 水土保持研究,2004,11 ( 3 ) :109– 111.  
[ 3 ] 汪福学,史明昌,周心澄,等. 退耕还林还草管理信息系统的建设[J]. 中国水土保持科学,2004,2(2): 93– 97.  
[ 4 ] 罗启运,曾琨,罗毅,等. 数字化地理信息系统建设与 Mapinfo 高级应用[M]. 北京:清华大学出版社,2003. 446– 448.  
[ 5 ] 杨永崇. 基于“3S”技术建立退耕还林还草监测系统的研究[J]. 西南农业大学学报,2002,24(5): 474– 475.  
[ 6 ] 汪福学,史明昌,周心澄,等. 退耕还林管理信息系统的建设[J]. 中国水土保持科学,2004,2(2): 93– 97.

(上接第 154 页)

Middle Yellow River, China in Foster[A]. I D L, Gurnell A M, Webb B W (Eds). Sediment and Water Quality in River Catchments, John Wiley & Sons Ltd, 1995. 353– 362.  
[ 4 ] Walling, D E, He, Q, Quine, T A. Use of caesium– 137 and lead– 210 as tracers in soil erosion investigations, Tracer Technologies for Hydrological Systems[M]. IAHS Publ., 1995, 229: 163– 172.  
[ 5 ] Zhang XB, Higgitt DL, Walling DE. A preliminary assessment of potential for using Caesium– 137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. Hydrological Sciences, 1990, 35(3): 243– 252.  
[ 6 ] Zhang XB, Quine TA, Walling DE. Soil erosion rates on sloping cultivated land on the Loess Plateau near Ansai, Shaanxi Province, China: An investigation using <sup>137</sup>Cs and rill measurements[J]. Hydro. Processes, 1998, 12: 171– 189.  
[ 7 ] 景可,卢金发,梁季阳,等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势[M]. 郑州:黄河水利出版社,1997. 109– 137.  
[ 8 ] Zhang Xinbao Yiyun Zhang Anbang Wen & Mingyi Feng, Assessment of soil losses on cultivated land by using the <sup>137</sup>Cs technique in the Upper Yangtze River Basin of China[J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 99– 106.  
[ 9 ] 文安邦,张信宝,王玉宽,等. 长江上游紫色土坡耕地土壤侵蚀<sup>137</sup>Cs 示踪法研究[J]. 山地学报,2001, 19(增刊): 56– 59.  
[ 10 ] 张信宝,贺秀斌,文安邦,等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb 双同位素法研究[J]. 科学通报,2004, 49 ( 15 ): 1537– 1541.