

水土保持减沙效益监测中的多核素联合示踪技术

贺秀斌, 韦杰, 张信宝

(中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041)

摘要: 水土保持效益评价是提升水土保持技术和水土保持生态建设科学决策的前提。核素示踪技术能够直接测定特定时间段的土壤净侵蚀量, 提供独立的土壤侵蚀和堆积数据以及空间分布的信息, 是评价土壤侵蚀和泥沙来源的简便、快捷和高效的技术方法。利用环境核素²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs 和⁷Be 示踪技术测定不同时间尺度的土壤侵蚀强度, 探讨了在无常规水文泥沙监测资料情况下, 水土保持效益多核素联合示踪评价的方法和计算模型。

关键词: 水土保持; 效益评价; 核素联合示踪; 计算模型

文献标识码: B

文章编号: 1000—288X(2007)04—0001—04

中图分类号: S157, X830.2

Combining ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb and ⁷Be to Monitor Benefits from Sediment Reduction by Soil and Water Conservation

HE Xiubin, WEI Jie, ZHANG Xinbao

(Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: Assessing the benefits of soil and water conservation aims at promoting conservation technology and providing a decision-making basis for eco-construction. Tracing technique by environmental radionuclide can directly determine the net soil erosion within a certain period, and provide information on soil erosion and sedimentation and thire distribution. Therefore, it is a good way for soil erosion assessment. This study tries to use ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb and ⁷Be to trace soil erosion at different time scales, and proposes corresponding calculating formulas.

Keywords: soil and water conservation; benefit evaluation; multi-radionuclide tracing technique; calculating model

选择或提出合理的计算方法是水土保持减沙效益评价研究的关键^[1]。目前水土保持减沙效益的计算方法主要有水文法、水保法、模型法^[1-6]。这 3 种方法在水保措施减水减沙效益评价中发挥了重要作用, 但是都需要相关监测资料或比较深入的前期研究, 而很多情况下缺乏监测数据, 水土保持减沙效益评价主要依靠直观定性描述或间接推理, 不能为水土保持决策提供可靠的数据和确切的效益评价。20 世纪 70 年代以来, 核素示踪技术(¹³⁷Cs, ²¹⁰Pbex 和⁷Be) 用于侵蚀泥沙的研究取得了突破性进展, 核素示踪侵蚀技术不同于传统的径流小区、简易观测场等监测方法, 只通过一次或多次采样可测定特定时间内或场次降雨的土壤侵蚀量, 具有快速、可靠和节省人力物力等特点, 从而在一定程度上弥补了传统地面观测站点少, 微观观测与宏观观测不能有效地相互支持、补充

的缺陷。本文利用环境核素²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs 和⁷Be 示踪技术测定不同时间尺度的土壤侵蚀强度, 探讨了在无常规水文泥沙监测资料情况下, 水土保持效益多核素联合示踪评价的简便、快捷和高效的技术方法和计算模型。

1 核素示踪原理及计算方法

1.1 核素示踪原理

放射性核素在土壤侵蚀中的应用是从 20 世纪 60 年代初 Menzel 研究土壤侵蚀和放射性核素沉降运移的关系后逐步发展起来的^[7]。核素示踪法的基本原理是: 大气层中核素随降雨或尘埃沉降到地面, 被土壤颗粒强烈快速吸附, 难以被水淋溶, 其再分布主要伴随土壤颗粒运移而发生, 侵蚀或堆积地块的核素赋存量与相应的土壤侵蚀或堆积量可建立简单数

收稿日期: 2007-05-20

基金项目: 中国科学院西部行动计划(KZCX2-XB2-07-01); 国家自然科学基金(40671120); 973 项目(2003 CB 415201)

作者简介: 贺秀斌(1967—), 男(汉族), 陕西省镇安县人, 研究员, 博导, 从事土壤侵蚀与水土保持研究工作。E-mail: xiubinh@imde.ac.cn。

学模型加以求算,这样通过测定核素在地表水平断面和垂直剖面的赋存量和空间分布形态,就可以测定不同部位的土壤侵蚀(堆积)速率^[8-10]。目前,主要的示踪核素包括¹³⁷Cs, ²¹⁰Pbex, ⁷Be, ²²⁶Ra, ²³²Th, ³²Si, ⁹⁰Sr等,其中应用最广泛的是¹³⁷Cs, ²¹⁰Pbex和⁷Be。

¹³⁷Cs是20世纪50—70年代大气层核试验产生的放射性核尘埃,半衰期30.2 a。¹³⁷Cs主要随降雨降落到地面,随即被表层土壤颗粒吸附,¹³⁷Cs基本不被植物摄取和淋溶流失,它以后的迁移主要伴随土壤、泥沙颗粒的物理运动。大气层核试验产生的¹³⁷Cs尘埃沉降到地表,相当于在地球表面撒播了一层¹³⁷Cs示踪源,在较小的范围内,可以认为¹³⁷Cs是均匀分布的,通过与当地参照点(local reference)对比,可以定量计算土壤侵蚀速率或沉积速率。美、澳、加、英是世界上运用¹³⁷Cs示踪技术研究侵蚀泥沙最早的国家,我国于20世纪80年代末期开始此项研究。¹³⁷Cs被广泛应用于估算表土侵蚀与堆积速率、示踪泥沙来源和湖库泥沙沉积剖面的计年断代。

20世纪90年代以来,澳大利亚和英国率先开展了侵蚀泥沙的²¹⁰Pbex研究,²¹⁰Pb是²³⁸U衰变系列的产物,²¹⁰Pb源于气体²²²Rn(半衰期3.8 d)的衰变,为²²⁶Ra(半衰期1 622 a)的姊妹元素。²²⁶Ra天然赋存于土壤和岩石中。土壤中的²¹⁰Pb产生于²²⁶Ra的衰变,为本源性²¹⁰Pb,与²²⁶Ra平衡。另一方面,土壤和岩石中产生的²²²Rn,一小部分释放到空气中,在大气中衰变为²¹⁰Pb,大气沉降的²¹⁰Pb不与表土和泥沙中的父系元素²²⁶Ra相平衡,通常将这部分²¹⁰Pb称为非载体的²¹⁰Pb(²¹⁰Pbex)。土壤样品中非载体的²¹⁰Pbex数量可以通过测试样品²¹⁰Pb和²²⁶Ra活度计算求得,即从样品的²¹⁰Pb总浓度中减去²²⁶Ra浓度即为²¹⁰Pbex浓度。

⁷Be是Be众多的同位素家族(⁶Be, ⁷Be, ⁸Be, ⁹Be和¹⁰Be)中的一种,质子和中子数分别是4和3,半衰期为53.3 d。⁷Be来源于大气层顶部的宇宙射线中高能粒子(主要是中子)与高层大气中¹⁴N, ¹⁶O原子核的碰并反应,并在10~20 km高度附近有一峰值,反应式为:³He + ⁴He → ⁷Be + γ。⁷Be原子一旦形成,很快被吸附在亚微米尺度的气溶胶上,气溶胶伴随降雨沉降到地面,主要以阳离子态为表层土壤强烈吸附,它以后的运动主要伴随土壤颗粒发生迁移,因此,⁷Be可作为土壤侵蚀的示踪剂。由于⁷Be是自然界产生且连续沉降,加之较短的半衰期,所以它可作为短期内、次降雨土壤侵蚀速率的示踪剂,也可作为评价不同土地利用方式下土坡侵蚀程度的示踪剂。与¹³⁷Cs和²¹⁰Pb相似,⁷Be定量土壤侵蚀量和侵蚀速率可以通过侵蚀或沉积样点的⁷Be含量与环境中⁷Be

输入量(称为本底值)相比较,得到各点⁷Be含量减少或增加的百分比,其中减少的点发生土壤净流失,增加的点发生土壤净沉积。然后通过定量模型将⁷Be减少或增加的百分比换算成土壤侵蚀量或沉积量。白占国在喀斯特地区土壤⁷Be季节性变化研究中探讨了应用⁷Be研究土壤侵蚀的可能性。Walling也利用⁷Be示踪技术对一次降雨侵蚀事件的侵蚀与沉积的空间分布特征进行了研究,并取得了满意结果(见图1)^[8-10]。

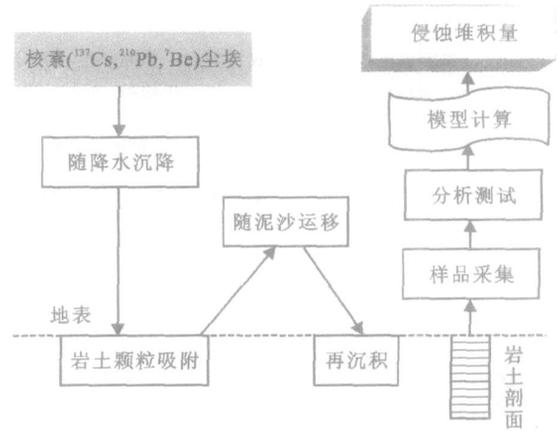


图1 核素大气沉降及在地表的迁移模式与侵蚀量评价

1.2 ¹³⁷Cs示踪侵蚀速率计算方法

¹³⁷Cs技术是3种核素示踪中应用最成熟的,可以利用相关公式求算侵蚀土壤剖面的侵蚀速率^[11]。

农耕地侵蚀速率计算采用质量平衡模型,计算公式为:

$$A = A_{ref} (1 - h/H)^{t-1963} \quad (1)$$

式中: A ——¹³⁷Cs 面积浓度 (Bq/m²); A_{ref} ——¹³⁷Cs 本底 (Bq/m²); h ——土壤年流失厚度 (cm); H ——犁耕层厚度 (cm); t ——取样年份。

非农耕地侵蚀速率采用剖面模型,计算公式为:

$$A(x) = A_{ref} (1 - e^{-ax}) \quad (2)$$

式中: A(x) ——深度 x 以上的¹³⁷Cs 面积活度 (Bq/m²); A_{ref} ——¹³⁷Cs 本底值 (Bq/m²); a ——¹³⁷Cs 深度分布系数。

1.3 ²¹⁰Pb示踪侵蚀速率计算方法

He & Walling 建立了农耕地土壤侵蚀与沉积速率的²¹⁰Pb理论模型^[12-13],即质量平衡模型。侵蚀速率计算公式为:

$$R = (I - A/AH + ID) \cdot (DI/Pt) \quad (3)$$

式中: I ——²¹⁰Pbex的年沉降通量 (Bq/m²·a); ——²¹⁰Pb的衰变常数; A ——单位面积上²¹⁰Pbex的比活度 (Bq/cm²); H ——累积质量深度 (g/cm²); ——每年²¹⁰Pb在被耕作混合之前,由于侵蚀损失掉的部分; D ——有效弥散系数 g²/(cm⁴·a); P ——土壤

粒径校正系数; t ——耕垦时间(a)。

对于非农耕地可以采用重量逼近模型,公式为:

$$R = (A_{ref} - A) / C \quad (4)$$

式中: A_{ref} ——参照点 $^{210}\text{Pbex}$ 的存量(Bq/m^2); A ——土壤中 $^{210}\text{Pbex}$ 的存量(Bq/m^2); C ——土壤中 $^{210}\text{Pbex}$ 的平均浓度(Bq/g); λ —— $^{210}\text{Pbex}$ 的衰变常数。

1.4 ^7Be 示踪侵蚀速率计算方法

设 $h(\text{kg}/\text{m}^2)$ 为水土流失的土壤质量厚度,且 $x = h = R_{\text{Be}}$, 土壤侵蚀速率 R_{Be} (kg/m^2) 可由下式求得^[14-16]:

$$R_{\text{Be}} = h = h_0 \ln(A_{\text{Be,ref}} / A_{\text{Be}}) \quad (5)$$

其中,研究区土壤 ^7Be 的基准值 $A_{\text{Be,ref}}$ (Bq/m^2) 采用未发生侵蚀或沉积的土壤的 ^7Be 总活度测定值。

$$A_{\text{Be,ref}} = \int_0^x C_{\text{Be}}(x) dx = C_{\text{Be}}(0) h_0$$

在初始分布形式下, x 深度以下 ^7Be 的总活度 $A_{\text{Be,ref}}$ (Bq/m^2)用下式表示:

$$A_{\text{Be}}(x) = \int_x^{\infty} C_{\text{Be}}(y) dy = C_{\text{Be}}(0) h_0 e^{-x/h_0} = A_{\text{Be,ref}} e^{-x/h_0}$$

$$C_{\text{Be}}(x) = C_{\text{Be}}(0) e^{-x/h_0}$$

式中: x ——自土表算起的某一深度质量(kg/m^2); $C_{\text{Be}(x)}$ ——某深度处的 ^7Be 初始活度(Bq/kg); $C_{\text{Be}(0)}$ ——表土(即 $X = 0$)的 ^7Be 初始浓度(Bq/kg); h_0 ——张弛深度质量(kg/m^2)。

2 多核素联合示踪理论

^{137}Cs , $^{210}\text{Pbex}$ 和 ^7Be 这3种核素在现代土壤侵蚀研究中的应用,可为研究土地退化状况和土壤资源利用的可持续性、侵蚀和沉积的空间分布模式、土壤侵蚀的经济损益评估等提供有力的技术支撑。 ^{137}Cs 是大气层核试验产生的放射性核尘埃,即人工放射性核素, ^{137}Cs 半衰期为30.02 a;可提供1963年以来的多年平均侵蚀量;而 $^{210}\text{Pbex}$ 和 ^7Be 则是自然界存在的核素,其中 $^{210}\text{Pbex}$ 为宇生天然放射性核素,半衰期为22.2 a,可供近88 a来的多年平均侵蚀量; ^7Be 半衰期仅53.3 d,可应用于季节性或场次降雨侵蚀的研究。将3种核素联合示踪有助于识别不同时间尺度的土壤侵蚀信息,进而计算水土保持的减沙效益(详见表1)。

表 1 不同核素侵蚀示踪技术的应用比较

示踪元素	来源	半衰期	示踪时段	示踪范围	示踪指标
^{137}Cs	核爆炸	30.02 a	1963 年以后的 120 a 内	表层侵蚀(溅蚀、面蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀)	采样点 1963 年至今的多年平均侵蚀模数
$^{210}\text{Pbex}$	天然	22.2 a	过去的 88 a	表层侵蚀(溅蚀、面蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀)	采样点过去 88 a 的多年平均侵蚀模数
^7Be	天然	53.3 d	过去的 200 d	表层侵蚀(溅蚀、面蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀)	采样点过去 200 d 的侵蚀量

3 多核素联合示踪水土保持效益计算模型

水土保持减沙效益可以通过水土保持治理前后侵蚀模数变化进行计算。而侵蚀模数又可以通过侵蚀速率进行求解。根据不同核素示踪的特点,我们可以将核素示踪侵蚀分为5个时段(如图2),a为采样年份。每个时段的计算方法如下。

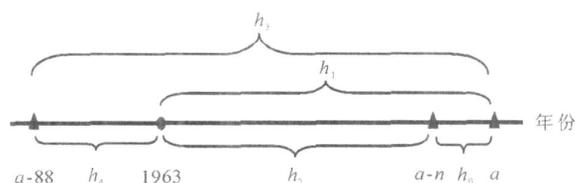


图 2 核素示踪土壤侵蚀时段划分

(1) 近 n 年平均侵蚀速率可以采用 ^7Be 连续采样测定,然后求平均值,如果没有采用连续监测采样,只用当年一次样品, $n = 1$,即:

$$h_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n I_{\text{Be}(i)} \quad (6)$$

(2) 1963 年以来的平均侵蚀速率可以直接用 ^{137}Cs 手段测定,即:

$$h_1 = h_{\text{Cs}} \quad (7)$$

(3) 1963 年至 $a - n$ 年间平均侵蚀速率

$$h_1(a - 1963) = h_2(a - n - 1963) + h_0 n \quad (8)$$

由上式可以得出 1963 年至 $a - n$ 年间平均侵蚀速率:

$$h_2 = [h_1(a - 1963) - h_0 n] / (a - n - 1963) \quad (9)$$

(4) 近 88 a 平均侵蚀速率可以直接用 ^{210}Pb 手段测定,即:

$$h_3 = h_{Pb} \quad (10)$$

(5) 1963 年前(1963 - a + 88) 年间平均侵蚀速率可以根据侵蚀量的平衡进行计算,即:

$$h_3(a - 88) = h_4(1963 - a + 88) + h_1(a - 1963) \quad (11)$$

由上式可以得出 1963 年前(1963 - a + 88) 年间平均侵蚀速率:

$$h_4 = [h_3 \times 88 - h_1(a - 1963)] / (1963 - a + 88) \quad (12)$$

4 结论

目前常用于水土保持减沙效益评价的水文法、水保法、模型法都要求有常规监测资料。而很多采取水土保持措施的地方又缺乏监测数据,对水土保持措施的减沙效益不能进行定量评价,因此无法判别水土保持措施的相对效率,更不可能为提升水土保持技术和生态环境建设决策提供依据。核素示踪技术不受场地限制,简便快捷,省时省力,因此环境核素²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs 和⁷Be 被广泛应用于土壤侵蚀研究,鉴于 3 种核素示踪时间段的差异和半衰期的不同,本文利用环境核素²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs 和⁷Be 示踪技术测定不同时间尺度的土壤侵蚀强度,探讨在无常规水文泥沙监测资料情况下,水土保持效益多核素联合示踪评价的简便、快捷和高效的技术方法和计算模型,将核素示踪时段划分为 5 段,并提出了各时段侵蚀速率的计算方法。

[参 考 文 献]

- [1] 张胜利, 于一鸣, 姚文艺. 水土保持减水减沙效益计算方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1994. 49—51.
- [2] 刘孝盈, 汪岗, 吴斌, 等. 美国大流域长时间序列水土保持减沙效果分析[J]. 中国水土保持科学, 2006, 4(4): 67—71.
- [3] 周振民, 王铁虎. 黄土高原地区水土保持减水减沙效益计算方法探讨[J]. 中国农村水利水电, 2006(6): 44—47.
- [4] 高博文, 刘万铨, 张大全. 80 年代黄河流域水利水土保持措施减沙作用研究[J]. 中国水土保持, 1994(5): 8—15.
- [5] 徐建华, 李雪梅, 李世明. 河龙区间水利水保工程减沙效益水保法研究成果浅析[J]. 人民黄河, 1995(8): 18—22.
- [6] 于一鸣. 黄河流域水土保持减沙计算方法有关的问题及改进途径[J]. 人民黄河, 1996, 18(1): 27—29.
- [7] Menzel R G, Jung P K, Ryu K S, Um K T. Estimating soil erosion losses in Korea with fallout cesium-137[J]. Journal of Applied Radiation and Isotopes, 1987, 38(6): 451—454.
- [8] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 和²¹⁰Pb 双同位素法研究[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1537—1541.
- [9] 张信宝, 李少龙, 赵庆昌. 黄土高原小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 法研究[J]. 科学通报, 1989, 34(3): 210—213.
- [10] 贺秀斌, 张信宝, D. E. Walling. 基于湖库沉积剖面¹³⁷Cs 变化的流域表层侵蚀速率计算模型[J]. 自然科学进展, 2005, 15(4): 495—498.
- [11] Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. 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.
- [12] He Q, Walling D E. The distribution of fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in undisturbed and cultivated soils[J]. Applied Radiation and Isotopes, 1997, 48(5): 677—690.
- [13] Walling D E, He Q. Using of fallout lead-210 measurements to estimate soil erosion on cultivated land[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999(6): 1404—1412.
- [14] Walling D E, He Q P, Blake W. Use of and ⁷Be and ¹³⁷Cs measurement to document short and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land[J]. Water Resource Research, 1999, 35(2): 3865—3874.
- [15] 唐翔宇, 杨浩, 李仁英, 等. ⁷Be 在土壤侵蚀示踪中的应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 520—525.
- [16] 丁晋利, 郑粉莉. ⁷Be 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 121—123.