

核素示踪在土壤侵蚀研究中的应用

宋 炜, 刘普灵, 郑良勇

中国科学院水利部
(西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨陵 712100)

摘 要: 利用示踪技术研究土壤侵蚀在国外已有 30 多年的历史, 因其具有分析精度和量化程度高, 能对土壤侵蚀时空变化进行定量监测的优势而受到重视。分别介绍了单核素示踪(^{137}Cs), 多核素复合示踪(^7Be , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{230}Th , ^{137}Cs) 在土壤侵蚀和泥沙来源研究领域中的进展情况, 并详细阐述利用稳定性稀土元素(REE) 示踪在研究泥沙来源, 侵蚀产沙时空分布方面也是一种有效的方法, 最后对各种方法做了简要评价。

关键词: 单核素示踪; 复合示踪; REE 示踪; 泥沙来源; 土壤侵蚀

中图分类号: TL99; S157.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2002) 01-0017-05

Application of Nuclides on Studies of Soil Erosion

SONG Wei, LIU Pu-ling, ZHENG Liang-yong

(Institute of Soil and Water Conservation, the Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources,
Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Tracer methods has been used to study soil erosion for about 30 years. With low analytical error and high quantification , it is also able to monitor quantitatively the both temporal and spatial variation of soil erosion. The single application of ^{137}Cs and compound application of ^7Be , ^{210}Pb , ^{226}Ra , ^{230}Th , ^{137}Cs in the field of soil erosion and sediment sources are reviewed. REE tracer method could perfectly describe the sediment sources, and be an effective method for studying temporal and spatial distribution of erosion and sediment. Finally both advantages and limitations of all these methods are discussed.

Key words: single application; compound application; REE tracer; sediment source; soil erosion

土壤侵蚀严重的影响土地生产力的提高和世界环境的改善, 所以备受世界各国政府和人民的重视。但其研究却是一项十分复杂的工作, 需要依赖研究方法和技术的改进。目前国内外对土壤侵蚀的主要研究方法有径流小区法、调查法、立体摄影法、人工模拟降雨法等, 但这些方法一般只能研究侵蚀的最终结果, 难以对侵蚀的物理过程作定量描述。自从本世纪 60 年代初 Menzel^[1]研究了有关土壤侵蚀和放射性核素沉降运移的关系以来, 核素示踪法作为对这些方法的必要补充在土壤侵蚀研究中日益受到人们的重视。核素示踪法可在不改变原始地貌的条件下, 通过示踪元素(核素)含量的分异来研究土壤侵

蚀的发生和分布规律, 其分析精度和量化程度较高, 不需特殊的野外设施, 能定量监测土壤侵蚀时空变化。目前一般采用单核素示踪、多核素复合示踪及 REE 示踪来研究土壤侵蚀过程, 并取得了许多研究成果。

1 单核素示踪

1.1 ^{137}Cs 示踪

以 ^{137}Cs 为示踪剂的累积性土壤侵蚀过程的研究在理论上和技术上都较成熟, 应用较广泛。 ^{137}Cs 是核裂变的一种产物, 它随降水沉降到地面, 和土壤

① 收稿日期: 2001-11-20
作者简介: 宋炜, 女, (1977-), 硕士研究生, 从事土壤侵蚀方面研究。

颗粒紧密结合,难以被水淋溶,植物吸收少,主要随土壤颗粒的移动发生再分布^[2]。Rogowski 等^[3]最早提出,对于较小的土壤侵蚀小区,¹³⁷Cs 在土壤中的再分配和侵蚀小区土壤的运移之间呈紧密相关,因此,土壤侵蚀和沉积作用是导致土壤中¹³⁷Cs 的迁移和再分配的主因,这正是土壤¹³⁷Cs 能示踪土壤侵蚀的先决条件。主要用于研究土壤侵蚀速率、泥沙沉积速率、定量分析土壤净流失量,并建立了土壤剖面中¹³⁷Cs 迁移量与土壤流失量的大量模型。

70 年代, Simpson^[4] 在研究 Hudson 河下游的沉积时发现,¹³⁷Cs, ⁶⁰Co 等在河口不同部位深度有着不同的浓度,从而使同位素示踪技术应用于侵蚀和沉积方面的研究。Mccallan 等^[5]测定了澳大利亚昆士兰达草地的¹³⁷Cs 变化,发现随着地形、侵蚀和沉积模式变化¹³⁷Cs 含量具有水平和垂直分布规律; Brown 等^[6]发现坡地和岭脊¹³⁷Cs 含量没有差异,沉积剖面中的¹³⁷Cs 含量明显增加, De Jong 等^[7]对农耕地土壤¹³⁷Cs 研究表明坡地上部侵蚀而下部发生沉积。Campbell^[8]的试验结果也表明¹³⁷Cs 的变化与坡度、土地利用、土壤侵蚀状况有关。汪阳春等在研究黄土高原塬坡侵蚀中发现,塬坡由上而下¹³⁷Cs 含量呈逐渐递减的趋势。这一切表明,侵蚀区¹³⁷Cs 减少,沉积区¹³⁷Cs 增加。这样从分析¹³⁷Cs 的分异规律着手就可了解土壤的侵蚀状况。此外,国内外的许多学者研究表明,不同的土地利用方式、坡度、坡形、坡长也影响土壤侵蚀强度,从而影响土壤中¹³⁷Cs 的含量(张信宝等 1988, 刘志 1993, Ritchie 等 1974, 张信宝等 1989, 汪阳春等 1991)。^[9-13]

应用¹³⁷Cs 来研究土壤侵蚀作用的关键和基础是:土壤剖面中¹³⁷Cs 的流失量与土壤损失量(土壤侵蚀量)之间的关系问题。只有相对准确地建立了这种关系,才能定量地估计土壤剖面中土壤的侵蚀量。关于¹³⁷Cs 技术的模型很多,有经验模型和理论模型两类。

对于耕作土壤, Ritchie 等^[14]首先在土壤损失率与土壤侵蚀量之间建立起经验的定量关系。此后,许多研究者先后建立了一些土壤侵蚀速率的对数形式与损失率的对数形式的线性估算模型。经验模型的基本形式是: $y = \alpha X^\beta$ 。

式中: Y ——年土壤侵蚀损失量($t/hm^2 \cdot a$); X ——土壤¹³⁷Cs 损失百分率($X = A_{ref} - A / A_{ref} \times 100$); A_{ref} ——该区土壤中¹³⁷Cs 的活度基准值(Bq/m^2); A ——采样点土壤中¹³⁷Cs 的活度; α, β ——待定系数。

对于非耕作土壤, Elliott 等^[15]提出了如下形式

的估算土壤侵蚀的经验模型:

$$Y = \alpha \beta^X$$

式中: Y ——年土壤侵蚀损失量($kg/(hm^2 \cdot a)$); X ——土壤中¹³⁷Cs 的损失百分率($X = A_{ref} - A / A_{ref} \times 100$); α, β ——为待定系数。

它们是利用¹³⁷Cs 的损失量与通过其他方法获得的土壤侵蚀量进行统计而得到的经验方程,仅适用于小研究区,无普适性。

在各种¹³⁷Cs 估算土壤侵蚀模型中,以质量平衡模型较为可靠,其模型的建立是基于对侵蚀机理的理论分析基础之上的,综合考虑了影响土壤侵蚀的诸多因子,模型估算结果更为准确,符合实际情况。对于耕作土壤,质量平衡模型首先是由 Kachanoski 等^[16]提出的,随后许多研究者进行了深入的研究,提出了不同形式的质量平衡模型,该模型的基本形式是:

$$S_t = (S_{t-1} + T_t - E_t)k \quad (t = 1, 2, 3, \dots, N)$$

式中: S_t 和 S_{t-1} 分别为 t 年和 $t-1$ 年末土壤剖面的¹³⁷Cs 总量(Bq/m^2); T_t —— t 年的¹³⁷Cs 年总沉降量(Bq/m^2); E_t —— t 年末的土壤剖面¹³⁷Cs 的损失量(Bq/m^2); k ——¹³⁷Cs 的年放射性衰减常数(0.977); $N = M - 1954$, M ——采样年份。

Walling 等对此模型的建立做了许多工作,也提出了侵蚀估算模型,并对非耕作土壤侵蚀估算建立了相应的模型。杨浩等^[17,18]认为土壤剖面分布的不同,相应土壤侵蚀量也不同,并建立了估算非耕作土壤的一些侵蚀模型。诸如,对于土壤剖面分布符合函数 $C_s = ae^{-bZ}$ ($a > 0, b > 0$), 土壤侵蚀量可由下式求得:

$$E_R = -1000D \ln(1 - \lambda) / b$$

式中: C_s ——土壤剖面某一深度的¹³⁷Cs 浓度(Bq/m^2); Z ——土壤剖面的某一深度(m); a, b 均为系数; λ ——侵蚀常数,即土壤剖面¹³⁷Cs 年损失百分率,则

$$Y = 100 - [R_1(1 - \lambda)^{28} + R_2(1 - \lambda)^{27} + R_3(1 - \lambda)^{26} + \dots + R_{29}(1 - \lambda)^{M-1982}]$$

式中: Y ——采样年份的土壤剖面¹³⁷Cs 损失百分率; R 值由文献查,给定年份 M ($M \geq 1983$),即由上式求得 λ 值。运用¹³⁷Cs 法估算土壤侵蚀的模型都是在一假设前提下即¹³⁷Cs 自散落时起,它的初始分布是一致的,而事实上¹³⁷Cs 在地面的沉降量受气候、雨形面 and 不同土壤渗透度影响而产生空间分布的变异性,即使在未扰动的非侵蚀区,不同样品间¹³⁷Cs 的含量差异很大,由于影响土壤侵蚀的因素相当多,现有的质量平衡模型有待完善。

由于大气沉降的放射性核素¹³⁷Cs 在沉积物中的分布与¹³⁷Cs 沉降的时间分布有关, 这样能利用¹³⁷Cs 建立沉积剖面的地质年代学。叶崇开^[19]在研究鄱阳湖的近代沉积率时认为: 由于¹³⁷Cs 的沉降在 1963 年达到峰值, 故可以逐层测出沉积物垂直深度¹³⁷Cs 最大峰值层, 即为 1963 年的沉积物层位, 就可得到 1963 年以来的沉积厚度和年平均沉积速率。万国江^[38]用同样原理测定了瑞士格莱芬湖近代沉积速率, 同时, 许多科学家建立了各种¹³⁷Cs 沉积模型, 用定量的方法描述沉积率 (Lowrance1988, Brown1981, Smith and Ellis1982)。

用¹³⁷Cs 法研究土壤侵蚀具有一定的局限性。¹³⁷Cs 的半衰期为 30.17 年, 故¹³⁷Cs 适宜进行中长时期(如 30 年)的侵蚀量宏观估算。由于采用表层土壤含量比较法, 对于侵蚀现状, 特别是对于黄土高原广为分布的陡坡和坡沟侵蚀严重地带, 含¹³⁷Cs 土层多侵蚀殆尽, 限制了该法的应用。¹³⁷Cs 最早沉降发生在 1954 年, 不可能测算更早年代沉积。¹³⁷Cs 沉降的空间变异性大。Sutherland^[20]在研究了 Saskatchewan 的三个未侵蚀坡面上¹³⁷Cs 的面积比活性, 发现其变异系数在 18% ~ 32% 之间。Wallbrink 等人和 Sutherland 等在研究中发现最初的¹³⁷Cs 沉降量不是固定的有很大的变异性, 最大变异可达 40%。而在利用¹³⁷Cs 测侵蚀时, 都假定¹³⁷Cs 的原始沉降量是固定的, 故导致用¹³⁷Cs 示踪研究的不精确性。

1.2 ²¹⁰Pb、⁷Be 示踪

²¹⁰Pb 是自然环境中存在的天然放射性核素, 物理半衰期为 22.3 年。²¹⁰Pb 能和土壤颗粒紧密结合, 在土壤侵蚀研究中,²¹⁰Pb 主要用在沉积速率的测定及沉积记年的示踪研究上。自从 Goldberg 提出天然放射性元素²¹⁰Pb 可作为百年内发生的地质事件的时钟,²¹⁰Pb_{ex}就被广泛用在沉积时间的研究上。用²¹⁰Pb_{ex}方法计算沉积速率最常用的模式有: (1) 恒定初始浓度模式(CIC), (2) 恒定供给速率模式(CRS) (3) 恒定²¹⁰Pb_{ex}量和恒定沉积速率模式(CFS)。

CRS 模式表达式为: $A(x) = A(0)e^{-kt}$
式中: $A(x)$ ——在 x 深度以下²¹⁰Pb_{ex} 的活性(dpm/g); $A(0)$ ——表层沉积物以下所有²¹⁰Pb_{ex} 的活性; k ——²¹⁰Pb 的衰变常数; t ——时间, 其中 $t = x/s$, x ——深度(cm); s ——沉积速率(cm/a)。

CIC 模式表达式为: $C = C_0e^{-\lambda/s}$, 式中: C 、 C_0 某一层及表层沉积物中²¹⁰Pb_{ex} 的浓度(dpm/g); Z ——深度(cm); s ——沉积速率(cm/a), λ ——²¹⁰Pb 的衰变常数。

CFS 模式表达式为: $A(m) = (P/W)e^{-\lambda m/w}$

式中: $A(m)$ ——某一深度以上沉积物累积质量中²¹⁰Pb_{ex} 的量(dpm/g); p ——水界面处的²¹⁰Pb_{ex} 的量(dpm/cm²g); w ——沉积物累积速率(g/cm²·a); m ——质量深度(g/cm²); λ 为²¹⁰Pb 的衰变常数。

尽管这些模式应用较广泛, 但仍在许多假设存在的条件下成立, 还需进一步完善。Olley 等人研究认为²¹⁰Pb_{ex}在表征土壤侵蚀上比¹³⁷Cs 具有更大的敏感性, 但²¹⁰Pb_{ex}的沉降也有很大的空间变异性, 且利用²¹⁰Pb_{ex}法, 样品处理复杂, 费时费工。

⁷Be 是宇宙线与大气层作用产生并降落到地面的短寿命核素(半衰期为 53.3 d), 在一定区域范围内,⁷Be 散落地表的输入量近于常量, 具有微粒迁移的示踪价值, 已较好的运用于湖泊、海湾沉积物表层微粒混合作用的示踪研究, 证明了其作为季节性环境微粒示踪剂的可能性, 但迄今为止, 在国内外尚未见用⁷Be 示踪表层土壤季节性侵蚀的报道。白占国等的文章报道了一个新的研究实例, 初步研究用⁷Be 示踪的目的是了解土壤侵蚀的动力学特性和季节性变化^[21]。

2 复合核素示踪

单核素示踪方法均存在着核素分布的变异性较大问题, 虽然可通过大量取样来降低变异性提高精度, 但费时费力且精度受限制, 核素复合示踪方法可解决这一问题。复合示踪技术是一个比较新的领域, 也是目前核素示踪技术领域的一大热点。

Burch 等^[22]首先提出了用⁷Be 和¹³⁷Cs 复合确定和预测集水区的泥沙来源, 通过测定泥沙中⁷Be 和¹³⁷Cs 的含量, 分析泥沙颗粒组成, 区分片蚀、细沟侵蚀、冲沟侵蚀及其侵蚀机制。Wallbrink 等人^[23]在研究中发现, 单独用²¹⁰Pb_{ex}测土壤侵蚀, 其相对标准偏差 $RED = 57\%$, 用¹³⁷Cs 的相对标准偏差 $RED = 47\%$, 而用两者面积浓度之比值相对标准偏差 $RED = 28\%$, 为利用²¹⁰Pb_{ex}/¹³⁷Cs 研究土壤侵蚀速率提供依据。核素比率能够降低因核素含量的空间变异性导致的不确定性, 是土壤侵蚀示踪的一个较为敏感的指标。Wallbrink 等人^[24]利用⁷Be, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb_{ex}剖面分布的差异应用于土壤侵蚀研究, 在人工降雨条件下研究不同侵蚀方式下(面蚀、浅细沟侵蚀、深细沟侵蚀、小冲沟侵蚀)泥沙起源的深度, 但主要还局限于理论上的探讨和描述。

杨明义等^[25]根据⁷Be 和¹³⁷Cs 剖面分布的差异, 探讨了农耕地小区剖面侵蚀过程和机制, 将坡面片蚀和细沟侵蚀类型随时变化定量区分开, 并将土壤

表层中核素损失率与泥沙中核素含量之间建立等式, 计算坡面侵蚀量和细沟侵蚀量。这是传统测量方法难以做到的。He 等利用 ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, ^{226}Ra 三种元素描述了 Culm 河泥沙来源。Wallbrink 等通过在 Murrumbidgee 河中游采样分析细颗粒部分 ^{137}Cs , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量研究泥沙来源地的相对贡献率。 ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 是天然存在 U 系和 Th 系的放射性核素, 二者的比例关系可用于示踪表土的侵蚀状态, 侵蚀区的比值大于 1, 堆积区的比值小于 1 或等于 1。

复合核素示踪研究的区域范围很小, 不能在大流域内使用, 此外它的研究精度值得进一步校正。

3 REE 示踪

稀土元素(REE)—中子活化分析(INAA)应用于土壤侵蚀研究是一种刚发展起来的新技术。1986 年, 美国的 Knaus^[26] 等人首先用稳定性稀土元素(REE)示踪和中子活化分析技术, 成功地测定了沼泽地的演变。其基本原理为核分析技术在土壤侵蚀中开辟了新途径。稀土元素具有能被土壤颗粒强烈吸附, 难溶于水, 植物富集有限, 且对生态环境无害, 淋溶迁移不明显, 有较低的土壤背景值, 中子活化对其检测灵敏度高等特点, 是较理想的稳定性示踪元素, 并可同时用多种稀土元素示踪, 能比较细微地研究不同地形部位的侵蚀过程和产沙特点。REE 示踪法可在不同的地形条件下施放不同的元素, 可起到一次施放, 多次观测的作用比其他方法有着更大的优越性, 从而完成对泥沙分布的监测, 细致地确定侵蚀产沙部位及类型。

国内, 田均良等人^[27, 28] 首次将 REE 示踪法应用于黄土区侵蚀的垂直分布研究, 取得了重要进展, 确定了元素的施放方法(条带法、穴施法)和施放浓度的计算方法:

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

式中: j ——小区划分的总区段(或条带)数; C_j ——施放第 j 种元素的浓度; B_j ——第 j 种元素的土壤背景值; R_j ——第 j 种元素施放部位相对侵蚀量的最小期望值; k ——考虑到其他因素的综合保证系数。

石辉^[29] 在室内模拟试验表明示踪法可比较满意地示踪小流域泥沙来源情况, 是一种研究小流域侵蚀产沙时空分布的有效方法, 田均良等人在此基础上, 在野外将不同的稀土元素布设在坡面不同部

位上, 成功显示了全坡长土壤侵蚀分布模式, 为土壤侵蚀空间分布的定量化研究开辟了新径。室内模拟和野外实验均表明 REE 示踪法的监测误差小于 15%, 可完全来测定土壤侵蚀空间分布, 能揭示土壤侵蚀过程中小区不同部位相对侵蚀量的变化趋势及小区泥沙输移过程中的沉积规律, 在研究土壤侵蚀、泥沙运移、沉积及小流域泥沙来源中有广阔的应用前景。

目前, 国内外土壤侵蚀的研究方法有: 径流小区法、调查法、立体摄影法、人工模拟降雨等方法, 但大多数情况只能调查记载侵蚀作用的后果, 对于观测侵蚀作用的全过程, 只能对比土壤发生侵蚀前后的状态来鉴别, 有的方法提供实际资料, 但存在费时费工代表性差等问题, 且难以应用于土壤侵蚀大范围空间分布及土壤迁移的空间分配研究, 难以提供较长时间的土壤侵蚀数据, 很难同时提供侵蚀沉积数据^[30, 31]; 天然或大气沉降放射性示踪元素可弥补这些不足, 较精确地研究不同地形部位侵蚀强度的分布及小流域泥沙来源的量化研究, 可信度和精确度较高, 但侵蚀严重地带, 天然放射性示踪元素则无能为力; 对于人工施放稀土元素, 克服了核素空间分布差异性大的问题, 加强人为的目的性, 提高了精确度和可信度, 并且中子活化分析对大多数 REE 分析灵敏度高, 特别对于研究次降雨侵蚀泥沙运移和沉积规律, REE 示踪法更可取。REE 法不足之处在于 INAA 需特殊的实验设备, 且对于大区域或长时段的研究, REE 法因具试验成本高而受到限制。

4 小 结

核素示踪作为一种新的土壤侵蚀研究方法已经在土壤侵蚀研究中获得较多的应用, 并取得了许多成果。它在研究土壤侵蚀的物理过程和侵蚀预报模型的参数确定方面具有重要的应用前途, 以后应该加强利用核素示踪定量研究侵蚀方式的转变和细沟侵蚀发生发育过程等方面的工作, 并发掘核素示踪在土壤侵蚀中新的利用另一方面, 核素示踪只是土壤侵蚀研究的一种方法, 整个土壤侵蚀研究工作的前进和土壤侵蚀物理预报模型的建立离不开对土壤侵蚀作用机理的深刻理解, 我们在研究工作中应将核素示踪法与其它研究方法结合, 发挥各自优势以更深刻的理解土壤侵蚀的作用原理, 为建立我国的土壤侵蚀物理预报模型提供依据。

参考文献:

[1] Menzel, R. G. Transport of ^{90}Sr in runoff[J]. Science(Washington) 1960, 131: 499–500.

[2] 杨明义,等. 用¹³⁷Cs 法研究农耕地坡面土壤侵蚀空间分布特征初报[J]. 水土保持研究, 1997, 4(2) .

[3] Rogowski A S, Tamura T. Movement of ¹³⁷ Cs by runoff, erosion and infiltration on the alluvial captina silt loam [J]. Health Physics, 1965, 11: 1 333– 1 340.

[4] Simpson etc. Man-made radionuclides and sedimentation in the Hudson River estuary[J]. Science, 1976, 194.

[5] McCallan M.E etc. Redistribution of¹³⁷ Cs by erosion and deposition on an Australian soil[J]. Australian Journal of Soil Research, 1980, 18.

[6] Brown R.B etc. Agricultural erosion indicated by¹³⁷Cs redistribution: Estimates of erosion rates[J]. Soil Science Society of American Journal, 1981, 45.

[7] De Jong, Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1983, 63.

[8] Campbell B. L. etc. ¹³⁷Cs as an indicator of gemorphic processes in a drainage basin system[J]. Australian Geographical Studies, 1982, 20.

[9] 张信宝,等. ¹³⁷Cs 法测定梁茆坡农耕地土壤侵蚀初探[J]. 水土保持通报, 1988, (5).

[10] 刘志. ¹³⁷Cs 法评价不同土地经营管理条件下的土壤面蚀[J]. 环境与生态论丛, 1993, 5.

[11] Ritchie, J. C. McHenry, J. R. and Gill. A. C. Fallout¹³⁷ Cs in the soils and sediments of three small watersheds[J]. Ecology, 1974, 55: 887– 890.

[12] 张信宝, 李少龙, 王成华, 等. 黄土高原小流域泥沙来源的¹³⁷Cs 法研究[J]. 科学通报, 1989, (3): 210– 213.

[13] 汪阳春, 张信宝, 李少龙, 等. 黄土茆坡侵蚀的¹³⁷Cs 法研究[J]. 水土保持通报. 1991, 11(3): 34– 37.

[14] Ritchie, J. C. Spraberry J A, McHenry J. R. Estimating soil erosion from the redistribution of ¹³⁷Cs [J]. Soil Sci Soc Am Proc . 1974, 38(1): 137– 139.

[15] Elliott G L. Campbell B L, Loughran R J. Correlation of erosion measurements and soil caesium – ¹³⁷ content [J]. Appl Radiat Isotopes . 1990, 41(8): 713– 717.

[16] Kachanoski R G, De Jong E. Predicting the temporal relationship between soil caesium– ¹³⁷ and erosion rate [J]. J Environ Qual, 1984, 13(2): 301– 304.

[17] Yang H, Chang Q. Du M . et al. Quantitative model of soil erosion rate using ¹³⁷Cs for uncultivated soil [J]. Soil Sci. 1998, 163(3): 248– 257.

[18] Yang H. Du M. Chang Q. et al. Quantitative model for estimating soil erosion rate using ¹³⁷Cs [J]. Pedosphere. 1998, 8(3): 211– 220.

[19] 叶崇开. ¹³⁷Cs 法和²¹⁰Pb 法对比研究鄱阳湖近代沉积速率[J]. 沉积学报. 1991, 9: 106– 114.

[20] R. A. Sutherland. Examination of caesium– ¹³⁷ areal activities in control unroded locations[J]. Soil Technology. 1991, 4: 33– 35.

[21] Bai Z G, Wan G J, Wang C s, et al. The distribution and geochemical behaviour of ⁷Be, ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb, ²²⁶ Ra, ²²⁸Ra in the soil of kaist ecological landscape and their erosion trace: an example from central Guizhou Plateau[C]. 第七届国际生态大会交流文章, 意大利佛罗伦萨, 1998, 6: 201– 203.

[22] Burch G J , Detection and prediction of sediment sources in catchments: use of ⁷Be and ¹³⁷Cs[C]. Paper presented at hydrology and water resources symposium, inst Of Eng. , Aust. Nati. Univ. , Canberron, 1988, 5: 135– 137.

[23] P. J. Wallbrink, et al. Determing sources and transit times of suspended sedimentd in the Murrubidgee River , New South Wales, Australia, using fallout ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb[J]. Water Resources Research. 1998, 34, (4): 879– 887.

[24] Wallbrink, P. J. and Murray , A. S. Use of fallout radionudides as indicators of erosion processes[J]. Hydrological Processes. 1993, 7: 297– 304.

[25] 杨明义. 多核素复合示踪定量研究坡面侵蚀过程[D][博士论文]. 杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 2001.

[26] Knaus, R. W. and D. L. VanGent. Accretion and cancel impacts in a rapidly resents accretion[J]. Estuaries. 1989, 12 (4)269– 283.

[27] 田均良, 周佩华, 刘普灵, 等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 23– 27.

[28] Tian Junliang et al. REE tracer method for studies on soil erosion[J]. Int. J. Sediment. Res. 1994, 9(2).

[29] 石辉. 利用 REE 示踪法研究小流域泥沙来源[D][硕士论文]. 杨陵: 中国科学院水利部水土保持研究所, 1995.

[30] 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.

[31] Loughran, R. J. The measurement of soil erosion[J]. Progress in Physical Geography, 1989, 13: 216– 233.