

# 核示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用\*

石 辉 刘普灵 田均良

中国科学院  
(水利部 水土保持研究所 陕西杨陵 712100)

**摘 要** 核示踪技术作为一种新技术、新方法应用于土壤侵蚀研究,使土壤侵蚀研究进入了一个新的阶段,并且使精确地监测泥沙来源成为可能。该文评述了近年来发展较快的 $^{137}\text{Cs}$ 、稀土元素(REE)、 $^{210}\text{Pb}$ 示踪法在土壤侵蚀研究中的进展。

**关键词:** 核示踪技术 土壤侵蚀 泥沙来源监测

## Application of Nuclear Tracer in Soil Erosion Studies

*Shi Hui Liu Puling Tian Junliang*

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

**Abstract** Nuclear tracer as a new technique and method has been applied in soil erosion studies, which makes the studies into a new period, and makes it possible to determine the source of sediment accurately. The fast developing methods— $^{137}\text{Cs}$ , rare earth element(REE) and  $^{210}\text{Pb}$  tracer in soil erosion studies were evaluated.

**Keywords:** nuclear tracer technique; soil erosion; monitoring of sediment source

土壤侵蚀已成为影响人类生存和工农业持续发展的重要环境问题。研究了解土壤侵蚀的发生发展规律是防治土壤侵蚀的重要依据。研究土壤侵蚀通常采用的方法有径流小区<sup>[1,2]</sup>,通用流失方程式<sup>[3,4,5]</sup>,遥感和摄影<sup>[6,7,8]</sup>等。近年来,随着核示踪技术在土壤侵蚀中的应用,使得土壤侵蚀研究进入了一个新的阶段。一般说来,示踪技术可在不改变原始地貌的条件下,利用示踪元素或核素的含量分异规律来研究土壤侵蚀的发生、分布,具有精确、快速、且可反映出侵蚀和沉积过程变化的优点。已利用的示踪物质有核爆产物 $^{137}\text{Cs}$ 、稳定性稀土元素(REE)以及天然放射性核素 $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  和  $^7\text{Be}$  等。本文主要介绍 $^{137}\text{Cs}$ 、REE 和 $^{210}\text{Pb}$ 作为示踪物质在土壤侵蚀中的应用。

### 1 $^{137}\text{Cs}$ 示踪法

$^{137}\text{Cs}$  的半衰期为30.2年,它是大气层核试验裂变反应的产物。 $^{137}\text{Cs}$  被释放进入大气平流层,随降雨到达地表,到达地表的 $^{137}\text{Cs}$  迅速牢固地被土壤和沉积物所吸附,很难再以化学形式

向下淋溶、迁移和被植物摄取。因此,在不遭受侵蚀的地区, $^{137}\text{Cs}$ 聚积在土壤表层,只以放射衰变的方式消失,这样的地区可作为 $^{137}\text{Cs}$ 的输入对照区。在土壤侵蚀区,因表层土壤流失将减少土壤中 $^{137}\text{Cs}$ 的含量,其减少量与土壤侵蚀强度有关。因而,与当地同类土壤的 $^{137}\text{Cs}$ 对照区相比较可以估算 $^{137}\text{Cs}$ 的流失程度。在本世纪50年代中期,土壤中的 $^{137}\text{Cs}$ 达到一定数量,1963~1964年达到峰值,故 $^{137}\text{Cs}$ 可作为1954年以来土壤侵蚀的示踪剂。

70年代,Simpson<sup>[9]</sup>在研究Hudson河下游的沉积时发现, $^{137}\text{Cs}$ , $^{134}\text{Cs}$ , $^{60}\text{Co}$ , $^{239}\text{Pu}$ , $^{240}\text{Pu}$ 在河口不同的部位和不同的沉积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。土壤的侵蚀和沉积使 $^{137}\text{Cs}$ 在土壤中重新分布。McCallan<sup>[10]</sup>等测定了澳大利亚昆士兰达领草地的 $^{137}\text{Cs}$ 变化,发现随着地形、侵蚀状况和沉积变化 $^{137}\text{Cs}$ 含量具有水平分布和垂直分布规律。Brown<sup>[11]</sup>发现坡地和岭脊 $^{137}\text{Cs}$ 含量没有差异,而沉积剖面中的 $^{137}\text{Cs}$ 量明显增加。De Jong等<sup>[12]</sup>对农耕地土壤 $^{137}\text{Cs}$ 研究表明,坡地上部发生侵蚀而下部发生沉积。Campbell<sup>[13]</sup>的试验结果也表明 $^{137}\text{Cs}$ 的变化与坡度、土地利用、土壤侵蚀状况有关。Martz<sup>[14]</sup>的研究发现, $^{137}\text{Cs}$ 反映坡顶的土壤侵蚀最强,而洼地发生堆积。在流域中存在类似情况,同 $^{137}\text{Cs}$ 分布与流域内地形较陡地区的土壤移动和坡面形态有关。从以上结果可以看出,侵蚀区的 $^{137}\text{Cs}$ 减少,沉积区的 $^{137}\text{Cs}$ 增加。这样,从分析 $^{137}\text{Cs}$ 的分异规律着手可以了解土壤的侵蚀状况。刘志<sup>[15]</sup>根据土壤中 $^{137}\text{Cs}$ 的含量研究了新西兰南茨特布里丘陵区的土壤侵蚀,发现耕地中表土厚度随地貌部位不同有明显差别,平均厚度由坡肩的15cm直到低洼地的50cm。汪春阳等<sup>[16]</sup>关于梁峁坡 $^{137}\text{Cs}$ 的研究也说明随坡长和坡度的加大,侵蚀量增大;凸形坡的侵蚀较强。不同的土地利用方式影响土壤侵蚀强度,从而也影响土壤中的 $^{137}\text{Cs}$ 含量,由此可研究土地利用对侵蚀的影响。张信宝<sup>[17]</sup>在研究蒋家沟小流域 $^{137}\text{Cs}$ 时发现,裸坡地土壤侵蚀强度>农耕地>荒草地>林地;刘志<sup>[15]</sup>发现牧草地的 $^{137}\text{Cs}$ 平均含量明显比耕地高,牧草地表变异不大,而耕地变化较大,这也说明耕地比草地侵蚀强烈。Richard<sup>[18]</sup>和Lourance等<sup>[19]</sup>在估算农林系统的土壤侵蚀与沉积时发现 $^{137}\text{Cs}$ 分布最大放射深度从农田到河流逐渐增加,即农田发生侵蚀,河岸林区和农田下部坡面发生沉积。

根据试验结果,确定出土壤侵蚀量与 $^{137}\text{Cs}$ 含量之间的关系,从而可估算出土壤的侵蚀量。Menzel<sup>[20]</sup>,Wise<sup>[21]</sup>根据径流小区试验,对土壤流失和放射性核素迁移进行了回归分析,得出

$$Y = 1.6X^{0.68} \quad (r = 0.95) \quad (1)$$

式中:  $Y$  ——放射性核素迁移量与积累量的百分比;  $X$  ——土壤流失率( $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ )。Menzel<sup>[22]</sup>用这一方程计算了朝鲜土壤流失量。Campbell<sup>[23]</sup>研究了澳大利亚新南威尔士试验小区的资料,回归分析 $^{137}\text{Cs}$ 迁移量和土壤流失量关系为

$$Y = 0.419X^{0.648} \quad (n = 30, r = 0.89) \quad (2)$$

式中:  $Y$  —— $^{137}\text{Cs}$ 迁移百分比;  $X$  ——平均土壤流失率。Ritchie & Machenry<sup>[24]</sup>对美国密西西比河黄土区的三个小流域进行研究,有

$$Y = 4.04X^{0.53} \quad (r = 0.8) \quad (3)$$

式中:  $Y$  —— $^{137}\text{Cs}$ 流失量( $\mu\text{Ci}/\text{m}^2$ );  $X$  ——土壤侵蚀量 $\text{t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 。如果忽略了林地的话,则变为

$$Y = 4.69X^{0.53} \quad (r = 0.96) \quad (4)$$

De Jong & Lowrance<sup>[25]</sup>认为用线性公式(5)可描述土壤侵蚀量和 $^{137}\text{Cs}$ 含量之间的关系

$$A = \frac{B - C_*}{B} \frac{D}{E} \quad (5)$$

式中:  $A$  —— 年平均土壤侵蚀速率( $\text{kt}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ );  $B$  —— 背景值区 $15\text{cm}$ 厚土层的总 $^{137}\text{Cs}$ 活度( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $C$  —— 侵蚀区 $15\text{cm}$ 厚土层的总 $^{137}\text{Cs}$ 活度( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ );  $D$  —— 单位面积( $1\text{hm}^2$ ) $15\text{cm}$ 深土层重( $1000\text{t}$ );  $E$  ——  $^{137}\text{Cs}$ 初始降落至采样年限。Martz & De Jong<sup>[26]</sup>在1991年提出了适合耕地的公式

$$E_n = D_p * B_s * \frac{kR_c - R_s}{kR_c} \quad (6)$$

式中:  $E_n$  —— 净土壤侵蚀量( $\text{kg}/\text{m}^2$ );  $D_p$  —— 平均耕层厚度( $\text{m}$ );  $B_s$  —— 耕层样品的土壤容重( $\text{kg}/\text{dm}^3$ );  $K$  —— 由于雪飘移和作物收获的校正系数(De Jong等1983年定为0.95);  $R_c$  —— 对照区 $^{137}\text{Cs}$ 的输入量;  $R_s$  —— 样点 $^{137}\text{Cs}$ 的活度( $\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ )。张信宝等<sup>[27]</sup>在研究黄土高原土壤侵蚀的基础上提出了剖面法

$$X_n = X_o(1 - \Delta H/H)^{(7+n-1970)} \quad (7)$$

式中:  $X_n$  ——  $n$ 年时土壤剖面的 $^{137}\text{Cs}$ 总量;  $X_o$  ——  $^{137}\text{Cs}$ 背景值;  $\Delta H$  —— 耕作土的年流失厚度;  $H$  —— 犁底层深度;  $7$  ——  $^{137}\text{Cs}$ 流失影响期。

使用 $^{137}\text{Cs}$ 法研究土壤侵蚀隐含着两个假设: (1)  $^{137}\text{Cs}$ 的沉降在研究区域内是均匀的; (2)  $^{137}\text{Cs}$ 与耕层土壤是均匀混合, 层间 $^{137}\text{Cs}$ 含量无差异。而实际情况是, 自从50年代中期以来, 许多耕地没有连续耕作,  $^{137}\text{Cs}$ 与土壤的混合是断续的; 农耕地土壤与 $^{137}\text{Cs}$ 混和之前, 可能已发生了季节性放射尘埃沉降和土壤侵蚀, 增加了 $^{137}\text{Cs}$ 不均匀大量迁移的可能性; 且放射性尘埃含量在层内还有差异, 土壤流失也不均匀。同时, 由于需采用剖面对比法, 而有些地区由于强烈的现代侵蚀, 使表层土壤侵蚀殆尽, 也限制了该方法的应用区域。

## 2 REE 示踪法

REE 包括 La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu 等14种元素, 由于元素 Y 的化学与地球化学性质和上述元素相似且密切伴生, 故通常在地球化学研究中归为一类, 通称为稀土元素。这些元素与土壤有较高的结合力, 且在黄土高原土壤中含量甚微, 植物富集有限, 淋溶迁移不明显, 同时它们是稳定性同位素, 对环境无危害, 从而可利用 REE 作为示踪物质来研究土壤侵蚀。仪器中子活化分析(INAA)对大多数 REE 元素分析灵敏度高, 方法简便, 为该方法的应用提供了可靠的保证。同时, 由于镧系收缩, REE 元素间的化学性质相似, 土壤侵蚀研究中选用 REE, 尚可克服元素理化性质差异而引起的实验误差。由于 REE 是人工施放的元素, 可在不同的地形条件下施放, 一次施放, 多次观测; 在不同的部位施放不同的元素, 完成对泥沙来源的监测, 可细致地确定产沙部位和类型。

Knaus<sup>[23]</sup>在研究沼泽地的沉积时提出, 作为示踪物质必须满足以下几个条件, (1) 元素(核素)必须与土壤紧密结合; (2) 对动植物无害; (3) 水迁移能力弱; (4) 有较低的背景值。REE 元素正是一种理想的示踪物质。他采用 Dy, Sm 研究了沼泽地的沉积速率与来源。中科院水土保持研究所田均良等人根据黄土高原地球化学的研究结果<sup>[29, 30, 31]</sup>, 在国内首次把该法用于黄土区侵蚀的垂直分布研究<sup>[32, 33]</sup>。筛选出适用于黄土区侵蚀示踪的元素——La, Ce, Sm, Eu, Nd, Dy 等元素, 并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

$$C_j = KB_j * 10^{-3}/R_j \quad (8)$$

式中:  $C_j$  —— 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;  $K$  —— 考虑到其它因素的综合保证系数。用下式计算 REE 示踪法的精度

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n W_i / W_e}{n} \quad (9)$$

式中:  $E$  —— 相对误差;  $n$  —— 地形部位的划分段数, 即示踪元素的种类;  $W_i$  —— 第  $i$  个地形部位的侵蚀量;  $W_e$  —— 示踪小区的总侵蚀量。通过室内小区试验表明, 侵蚀强度小区下部大于上部, 与侵蚀细沟的分布趋势一致; REE 示踪法可精确地测定不同部位的相对侵蚀量, 误差小于 15%; 对过程样进行分析可揭示降雨侵蚀过程的变化情况, 同时为野外的工作提供了科学的依据。

田均良等在黄土丘陵沟壑区的野外全坡长小区的试验结果表明, 大约总侵蚀量的 2/3 来自于坡长下部 1/3 以下的位置; 元素在坡面上的沉积愈到下部愈少, 这从另一个方面说明, 侵蚀主要发生在坡面下部。REE 示踪法作为一种研究土壤侵蚀的有效手段, 已经应用于小流域土壤侵蚀时空分布的研究。

### 3 $^{210}\text{Pb}$ 示踪法

土壤中的  $^{210}\text{Pb}$  是土壤中本身就存在的天然放射性同位素, 是  $^{233}\text{U}$  作为母体的铀系衰变的产物, 它们主要来自于成土母质<sup>[34]</sup>。来源于大气中  $^{222}\text{Rn}$  衰变的  $^{210}\text{Pb}$  小于总量的 5%<sup>[35]</sup>, 但它在土壤侵蚀示踪研究中有着重要的作用。大气中的  $^{210}\text{Pb}$  随降雨到达地表, 被土壤颗粒吸附, 土壤中  $^{210}\text{Pb}$  含量主要受降雨和微环境的影响。通过研究侵蚀和沉积区土壤剖面  $^{210}\text{Pb}$  浓度的变化规律, 可得知土壤的侵蚀状况。

Wasson<sup>[36]</sup> 在研究 Burrinjack 水库的泥沙沉积时发现, 沉积物中  $^{210}\text{Pb}$  浓度的变化与产沙源区的含量有关, 用表层土壤和底层土壤的  $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$  的比值可以说明土壤的侵蚀状况。在 1925 ~ 1940 年间, Burrinjack 水库上游的土壤片蚀比现在强烈, 是水库沉积物的主要来源, 从 1950 年以来, 表层土壤侵蚀减弱。Anderson 等<sup>[37]</sup> 提出以下两点假设: (1) 某一研究区域的  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  ( $^{210}\text{Pb}$  浓度减去背景浓度) 在某一层次是均匀的; (2) 在极小的范围内  $^{210}\text{Pb}$  的量只与衰变有关。据此, 提出了  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  在沉积物中的分布公式:

$$\frac{\rho A}{t} = \frac{D_B \rho A}{z} - \frac{S \rho A}{z} - \lambda \rho A \quad (10)$$

式中:  $A$  ——  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的浓度 (dpm/g);  $t$  —— 时间;  $Z$  —— 深度;  $\rho$  —— 沉积物的密度 [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ];  $D_B$  —— 沉积物混合速度 ( $\text{cm}^2/\text{s}$ );  $S$  —— 沉积速率 ( $\text{cm}/\text{s}$ );  $\lambda$  ——  $^{210}\text{Pb}$  的衰变常数。沉积速率与  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  成对数线性关系。Murray 等<sup>[38]</sup> 在 Murrumbidgee 河研究中用  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}/^{137}\text{Cs}$  的比值分析了泥沙来源, 在 12 年一遇的洪水悬浮泥沙中有 50% 来自于上游山地; 正常情况下也有同样的结果。Wallbrink 等<sup>[39]</sup> 在人工降雨时发现, 降雨前表层土壤中有较高的  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}$ , 连续降雨后,  $^{210}\text{Pb}$  减少而  $^{137}\text{Cs}$  保持不变; 可用来研究片蚀到细沟侵蚀的侵蚀过程。在小流域的出口处监测  $^{210}\text{Pb}$  与  $^{137}\text{Cs}$  的浓度变化可了解小流域的侵蚀过程。Mattheus 等<sup>[40]</sup> 发现随降雨降落的  $^{210}\text{Pb}$  由于土壤的强烈吸附主要存在于未扰动的土壤表层, 故  $^{210}\text{Pb}$  可以比<sup>137</sup>

Cs 更敏感地反映出土壤厚度的变化。Wallbrink<sup>\*</sup>, \*\* 用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}/^{137}\text{Cs}$  与对照值相比较研究土壤侵蚀,发现 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}/^{137}\text{Cs}$  与土层深度是单调递减关系。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}/^{137}\text{Cs}$  对于研究20年以上未经扰动地区的土壤侵蚀是一种有效的方法。

$^{210}\text{Pb}$  同位素示踪是一种新兴的示踪方法,但样品处理比较复杂,要求精度较高;同时 $^{210}\text{Pb}$  在示踪研究中还存在一些问题亟待解决。

示踪技术为土壤侵蚀与沉积研究提供了一种有效的手段,目前的发展趋势是寻求多元素(核素)复合示踪,以满足监测不同类型的产沙量和分布,提高监测的量化程度和精度,为防治水土流失提供基础资料和数据。

### 参 考 文 献

- 1 蒋德麒等.黄河中游小流域泥沙来源初步分析.地理学报,1966,32(4)
- 2 龚时 等.黄河中游黄土丘陵沟壑区沟道小流域的水土流失及治理.中国科学,1978,(6)
- 3 美国土壤保持学会.(窦保障译,许国华校),土壤侵蚀预报与控制.北京:科学出版社,1981
- 4 张宪奎等.黑龙江省土壤流失方程的研究.水土保持通报,1992,(4)
- 5 孙保平等.USLE 在西吉县黄土丘陵沟壑区的应用.中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,西安:陕西省科学技术出版社,1990
- 6 孙保平.黄家二岔小流域土壤侵蚀强度遥感调查制图.中国科学院、水利部西北水土保持研究所集刊,西安:陕西科学技术出版社,1990
- 7 徐国礼 等.沟道侵蚀与地面遥感监测研究.水土保持学报,1991,(2)
- 8 徐国礼 等.地面立体摄影测量在监测沟蚀中的应用.中国科学院水利部西北水土保持研究所集刊,西安:陕西科学技术出版社,1990
- 9 Simpson etc. Man-made radionuclides and sedimentation in the Hudson river estuary. Science, 1976,194:
- 10 McCallan M E etc. Redistribution of caesium-137 by erosion and deposition on an Australian soil. Australian Journal of Soil Research, 1980,13:
- 11 Brown R B etc. Agricultural erosion indicated by caesium- 137 redistribution: Estimates of erosion rates. Soil Science Society of American Journal,1981,45:
- 12 De Jong. Estimates of soil erosion and deposition for some Saskatchewan soils. Canadian Journal of soil Science, 1983,63:
- 13 Campbell B L etc. Caesium - 137 as an indicator of geomorphic processes in a drainage basin system. Australian Geographical Studies, 1982,20:
- 14 Martz L W etc. Using caesium- 137 to assess the variability of net soil erosion and association with topography in a Canadian prairie landscape. Catena, 1987,14:
- 15 刘志. Cs- 137法评价不同土地经营管理条件下的土壤面蚀.环境与生态论丛,1993,5
- 16 汪春阳等.黄土峁坡侵蚀的 $^{137}\text{Cs}$  法研究.水土保持通报,1991,11(3)
- 17 张信宝等.  $^{137}\text{Cs}$  法测定梁峁坡农耕地土壤侵蚀初探.水土保持通报,1988,5
- 18 Richard J C etc. Application of radioactive fallout caesium- 137 for measuring soil erosion and deposition accumulation rates: a review. Journal of Environmental Quality, 1990, 19:

\* Wallbrink P J etc. A new method for determining soil loss using the inventory ratio of excess  $^{210}\text{Pb}$  to  $^{137}\text{Cs}$ . 中澳水土保持研讨会资料,1994,澳大利亚

\*\* Wallbrink P J etc. Measuring soil movement using  $^{137}\text{Cs}$ ; implication of reference site variability, 中澳水土保持研讨会资料,1994,澳大利亚

- 19 Lowrance M E. Erosion and deposition in a field/forest system estimated using caesium - 137 activity. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1988
- 20 Menzel. Transport of strontium- 90 in runoff. *Science*, 1960, 131:
- 21 Wise S M. Caesium- 137 and lead - 210: a review of techniques and some applications in geomorphology. In: *Timescales in Geomorphology*, 1988
- 22 Menzel. Estimated soil erosion in Korea with fallout caesium - 137. *Applied Radiation and Istopes*, 1987, 38(6):
- 23 Campbell B L etc. A method for determining sediment budgets using caesium- 137. In: *Sediment Budgets, Proceeding of the Porto Alegre Symposium*, IAHS Publication, 1988, 174:
- 24 Ritchie J C etc. Estimating soil erosion from the redistribution of fallout <sup>137</sup>Cs. *Soil Sci. Soc. AMER. Proc.*, 1974, 38:
- 25 De Jong, Lowrance. Soil redistribution on three cultivated New Brunswick hillslope calculated from <sup>137</sup>Cs measurement, solum data and USLE. *Can. J. Soil Sci.*, 1986, 66:
- 26 Martz L M, De Jong. Using caesium - 137 and landform classification to develop a net soil erosion budget for a small Canadian Prairie watershed. *Catena*, 1991, 18:
- 27 张信宝等. 黄土高原小流域泥沙来源的<sup>137</sup>Cs 法研究. *科学通报*, 1989, (3)
- 28 Knause R M etc. Accretion and canal impacts in a rapidly subsiding watland. A new soil horizon marker method for measuring recent accretion. *Estuaries*, 1989, 12(4):
- 29 田均良等. 中国黄土高原土壤元素含量及地域分异规律. *水土保持学报*, 1992, 6(1)
- 30 田均良等. 中国黄土元素背景值分异规律的研究. *环境科学学报*, 1991, 11(3)
- 31 田均良等. 黄土高原土壤地球化学. 北京: 科学出版社, 1994, 73 ~ 87
- 32 田均良等. 土壤侵蚀 REE 示踪法研究初报. *水土保持学报*, 1992, 6(4)
- 33 Tian junliang etc. REE tracer method for studies on soil erosion. *International Journal of Sediment Research*, 1994, 9(2):
- 34 田均良等著. 黄土高原土壤地球化学. 北京: 科学出版社, 1994, 166 ~ 198
- 35 Smith J D etc. Modelling of <sup>210</sup>Pb behaviour in the catchment and sediment of Lake Talikarng, Victoria, and estimation of recent sedimentation rates. *J. Mar. Freshw. Res.*, 1985, 36:
- 36 Wasson R J etc. <sup>210</sup>Pb as a chronometer and tracer, Burrinjack Reservoir, Australia. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1987, 12:
- 37 Anderson R F etc. Determining sediment accumulation and mixing rates using <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs, and other tracer: Problems due to post depositional mobility or coring artifacts; *Can. J. Fish. Auquat. Sci.*, 1987, 44:
- 38 Murray A S etc. Tracing the source of suspended sediment in the Murrumbidgee River, Australia. *Tracers in Hydrology*, IAHS Publ. 1993, 215:
- 39 Wallbrink P J etc. Use of fallout radionuclides as indicators of ersion processes. *Hydrological Processes*, 1993, 7:
- 40 Mattheus K M etc. Extraction of fallout <sup>210</sup>Pb from soils and its distribution in soil profiles. *J. Environ Radioctivity*, 1995, 2: