

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪法应用于非耕作土壤侵蚀的研究探讨

王小雷, 杨浩*, 张明礼, 徐从安, 王轶虹 (南京师范大学地理科学学院, 江苏南京 210046)

摘要 [目的] 为更好地使用 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪法测定土壤侵蚀速率提供依据。[方法] 叙述 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的来源、示踪原理与土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的计算方法, 探讨 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在非耕作土壤中的深度分布及土壤侵蚀模型中的应用。[结果] $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在非耕作土壤剖面中存在于0~16 cm处。从土壤表层自上而下, 非耕作土壤和矮树林土壤中的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量随土层深度增加呈指数降低。利用环境放射性核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 来研究土壤侵蚀和沉积具有很大的应用价值和潜力, 当核素随大气沉降到地表时, 迅速被土壤颗粒吸附, 通过其在土壤间的移动和有规律分布模式可以示踪100年尺度上的土壤侵蚀速率。[结论] $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 示踪技术可以研究近100年的土壤再分配状况, 在时间尺度上很好的弥补了示踪短周期的土壤再分配速率。

关键词 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$; 非耕作地; 土壤侵蚀速率

中图分类号 S151.9+5 文献标识码 A 文章编号 0517-6611(2008)28-12350-03

Study on $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ Tracer Method Applied in Uncultivated Soil Erosion

WANG Xiaolei et al (School of Geographic Science, Nanjing Normal University, Nanjing, Jiangsu 210046)

Abstract [Objective] The aim was to provide the basis for applying $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracer method to detect the soil erosion rate better. [Method] The origin and tracing theory of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ and its calculation method in soil were narrated, and the depth distribution of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in uncultivated soil and its application in soil erosion model were discussed. [Result] $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ existed in uncultivated soil profile at 0-16 cm. The $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ content in uncultivated soil and in shrub soil was decreased with the increase of the soil depth from the soil surface. Using environmental radionuclide $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ to study the soil erosion and sediment had great application value and potential. When the nuclide was settled on the surface with atmosphere, it was absorbed by the soil particle quickly. The soil erosion rate on the scale of 100 years was traced through the retention of nuclide in soil and its regular distribution mode. [Conclusion] $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ tracer method could investigate the soil redistribution status in recent 100 years and remedied the soil redistribution rate in short period of trace.

Key words $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$; Uncultivated soil; Soil erosion rate

土壤侵蚀是指地球表面的土壤及其母质在水力、风力、冰融或重力以及人为营力的作用下发生的各种破坏、分散、搬运和沉积现象。土壤侵蚀已成为世界上一个日益严重的环境问题^[1-3], 不仅导致土壤资源的破坏和损失, 同时也引发了洪涝灾害和水质污染等一系列问题, 严重的土壤侵蚀已经制约了生态环境和社会经济的可持续发展。国内外对土壤侵蚀的主要研究方法有径流小区法、调查法、人工模拟降雨法等, 但这些传统的方法需要投入大量的资金和人力进行长期的监测, 同时径流小区的设置也改变了原来的地貌, 使研究结果可靠性减弱, 难以对侵蚀的物理过程作定量描述。利用环境中某些具有特殊地球化学特征的放射性核素作为示踪剂, 在不同时间尺度和不同景观类型的地球化学过程中对土壤侵蚀进行示踪具有重要的意义^[4]。

目前有关利用 ^{210}Pb 作为土壤示踪剂的研究中, 以测定沉积物年代为多, 而应用于土壤侵蚀方面的研究较少。笔者探讨了 ^{210}Pb 在非耕作土壤中的空间分布以及在土壤侵蚀示踪中的应用, 旨在为以后更好地使用该方法测定土壤侵蚀速率, 为水土保持工作提供依据。

1 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的来源与示踪原理

1.1 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的来源 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 是 ^{238}U 衰变系列的一种自然产物, 半衰期22.26年, 其母体 ^{222}Rn 是惰性气体, 土壤和岩石中的小部分 ^{222}Rn 沿土壤孔隙和岩石裂隙通过分子扩散输送至地表再逃逸至大气, 在大气中通过衰变成子体 ^{210}Pb , 并很快被气溶胶吸附, 参与大气混合和输送过程, ^{210}Pb 在大气中的平均滞留时间为5~10 d^[5], 然后通过干、湿沉降到地表, 并被土壤颗粒所吸附。通过大气沉降并被土壤颗粒所吸附

的 ^{210}Pb 通常称为“非载体来源” ^{210}Pb (记为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$); 而土壤中未逃逸的那部分 ^{222}Rn 则为土壤基质所吸附, 衰变成 ^{210}Pb , 这部分 ^{210}Pb 称为补偿性 ^{210}Pb (记为 $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$) (图1)。

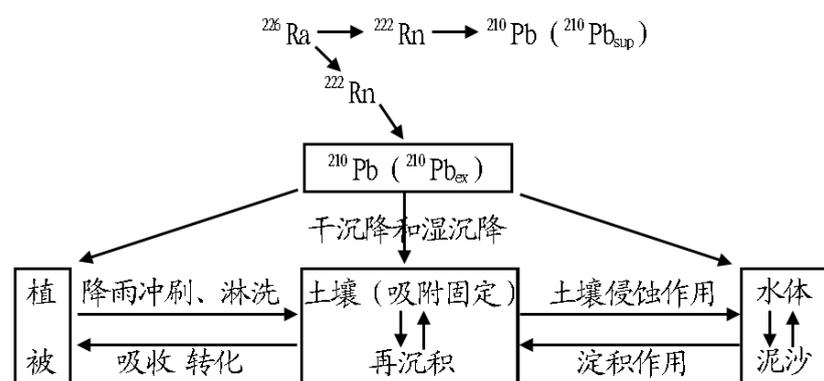


图1 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在自然界的物质循环示意

Fig.1 The material cycle of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in the natural world

1.2 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的示踪原理 ^{137}Cs 作为土壤侵蚀示踪剂的基本假设: 一是 ^{137}Cs 的全球分布虽与纬度变化及某地的降雨密切相关, 但在区域上其沉降是均匀分布的, 因此土壤 ^{137}Cs 的初始含量(背景值) 是确定的; 其二, ^{137}Cs 被土壤尤其是土壤中的黏粒和有机质强烈吸附于阳离子交换位置, 很难被置换, 不易淋洗, 化学和生物学运移极小, 仅随土壤颗粒作机械位移, 土壤中含量的变化主要受土壤颗粒物理运动的影响。基于以上两点, ^{137}Cs 是一种良好的土壤侵蚀示踪剂。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 和 ^{137}Cs 同为环境放射性核素, 示踪原理十分相似。其示踪方法为: 把采样点 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的含量与附近的未被扰动的或固定的背景值位置的含量比较, 得到各点的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量减少与增加的百分比。减少的样点表示发生土壤侵蚀, 增加的样点表示发生土壤沉积, 然后通过定量模型将 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 减少或增加的百分比换算成土壤侵蚀或沉积量。该方法可用于中长时间尺度上(约100年)土壤侵蚀的研究^[6]。

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在示踪过程中, 背景值地点的确定是成功的关键。一般情况下, 选在采样点周围山顶平坦的草地和低草地。在

基金项目 高等学校博士学科点专项科研基金资助(20060319006)。

作者简介 王小雷(1982-), 男, 山西临汾人, 硕士研究生, 研究方向: 土壤侵蚀和环境影响。* 通讯作者, 博士生导师, 研究员, E-mail: yanghao@njnu.edu.cn。

收稿日期 2008-07-11

没有平坦草地的地区也可以用森林样点,但需要注意森林样点由于树冠的雨滴滞留和降雨分布不均,导致 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在很小范围内又有较大空间变异,通常需要一定数量样点的平均值才能较好地代表 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的背景值^[7]。

2 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的求算方法

$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的计算可用两种方法求得,即直接法和间接法^[8]。直接法就是用土壤中 ^{210}Pb 的总量减去由 ^{226}Ra 衰变而来的 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$)的含量;间接法就是用土壤中 ^{210}Pb 的总比活度减去 ^{226}Ra 的比活度。比活度的测量通常采用谱仪测定法,其方法原理是将土壤样品在105℃下烘干,磨碎后过2 mm的筛,接着把样品放在比较规则的圆柱状塑料盒内,密封1~2个月,使 ^{226}Ra 与 ^{210}Pb 处于永久衰变平衡体系,然后将样品直接放在配备高纯锗探头(EG and GORTEC LOAX HPGe)多道谱仪内测定。 ^{210}Pb 和 ^{226}Ra 的比活度可分别根据其特征能量值46.5和185.99 keV处底射线的净峰面积(net area)求得。测定误差在95%的置信度下一般控制在10%以内,测定时间50 000 s。

3 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在非耕地土壤剖面中的垂直分布及模型

3.1 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在非耕地土壤剖面中的深度分布

^{137}Cs 进入大气同温层后随着大气环流运动,通过干沉降和湿沉降作用到

达地表, ^{137}Cs 一旦进入土壤,就马上被强烈吸附于粘土矿物颗粒和有机质上,它通过化学迁移和作物吸收所导致的损失可忽略不计^[9]。和 ^{137}Cs 一样, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 与土壤和泥沙细颗粒也具有强烈的亲和力^[10-12],沉降于地表后,受土壤系统中物理-化学及生物学过程(如扩散、迁移等)的影响,在土壤中的分布深度相对较浅,一般在20 cm以内^[13-14]。

He和Walling^[15]证实了背景值在土壤侵蚀模型中的可操作性,在英国Kaleya流域中选择了既没有土壤损失也没有土壤沉积的地点作为理想的背景值区域进行研究。在此研究中,得出了 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在非耕作土壤剖面中的分布特征(图2a), $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在土壤剖面中存在于0~16 cm处,从土壤表层自上而下, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的含量随深度增加呈指数降低。另外还选择了距离此流域不远的一块矮树林草地进行研究(图2b),结果显示,其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的含量与背景值区域(非耕作土壤)的值整体上呈现一致的规律,随深度增加其 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量指数降低。对比图2两幅图,可以得知Kaleya流域区域面积浓度为2 602 Bq/m²,矮树林区域面积浓度为2 000 Bq/m²,很明显后者的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度比前者减少了23%,表明了矮树林区域内的采样点,虽然没有经过人为的翻耕,但其地貌单元在一定程度上发生了轻微的土壤侵蚀现象^[15]。

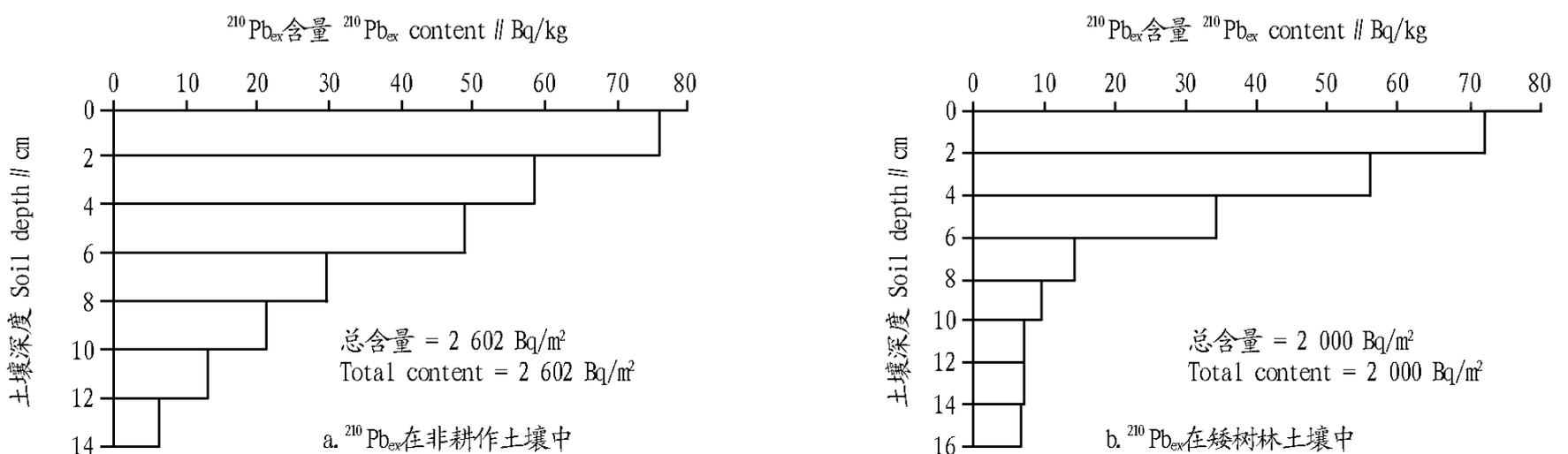


图2 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在土壤剖面中的深度分布

Fig.2 The depth distribution of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in soil profile

He和Walling对英国一些永久草地上剖面的研究表明, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的剖面分布深度均在15 cm以上,且浓度在表层土中最大,随深度增大, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的浓度减小^[15]。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在土壤剖面中随累积质量深度 z 和时间 t (a)变化可用下述公式表示:

$$\frac{\text{Cu}(z,t)}{t} = D \frac{\partial^2 \text{Cu}(z,t)}{\partial z^2} - V \frac{\partial \text{Cu}(z,t)}{\partial z} - \lambda \text{Cu}(z,t) \quad (1)$$

式中, D 为有效弥散系数($\text{g}^2/\text{cm}^2\cdot\text{a}$), V 为有效向下迁移速率($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{a}$), λ 为 ^{210}Pb 的衰变常数, Cu 为不同累积质量深度 z 处 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的浓度(Bq/g)。

非耕作地土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度深度分布可表示为:

$$A_x = ae^{hc(H-h)} \quad (2)$$

式中, A_x 为深度为 x 时的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度(mBq/g), H 为土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 分布的最大深度(cm), x 为深度(cm), a 、 hc 为系数。

非耕作土壤 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 浓度的深度分布也类似于面积浓度的深度分布:

$$C_x = ce^{hc(H-h)} \quad (3)$$

式中, C_x 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在深度 x 时的浓度(mBq/g), c 、 hc 为系数。

张信宝对中国陕北子长县赵家沟黄土丘陵顶部老坟地附近的草地进行研究,得出中国黄土草地的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 浓度深度分布和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 面积浓度深度分布为: $C_x = 0.0594e^{0.3135(24-x)}$ ($R^2 = 0.94$), $A_x = 0.0559e^{0.4807(24-x)}$ ($R^2 = 1$)。利用谱仪对侵蚀地块的全样样品进行测量,测出 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的面积浓度,其表层土壤的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 浓度可通过(2)和(3)式推导出的公式求算:

$$C_x = \frac{c}{a} A_x d^{(ha-hc)(H-h)} \quad (4)$$

选用中国黄土草地的参数: $A_{\text{cf}} = 573 \text{ mBq}/\text{cm}^3$, $I = 17.9 \text{ mBq}/(\text{cm}^3\cdot\text{a})$, $H = 24 \text{ cm}$, $\lambda = 0.0307$, $\rho = 1.11 \text{ g}/\text{cm}^3$, $a = 0.0559$, $hc = 0.4807$, $c = 0.0594$, $hc = 0.3135$ 。由此得出了非耕作地块在长期(100a)稳定状态下,土壤侵蚀速率和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 流失百分比之间的关系(图3)^[16]。

3.2 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在非耕地土壤侵蚀中的转化模型 目前用到的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 理论模型由He and Walling等在已建立的 ^{137}Cs 理论转化模型的基础上进行修正得到的^[17]。对于侵蚀点而言,该模型可以表述为:

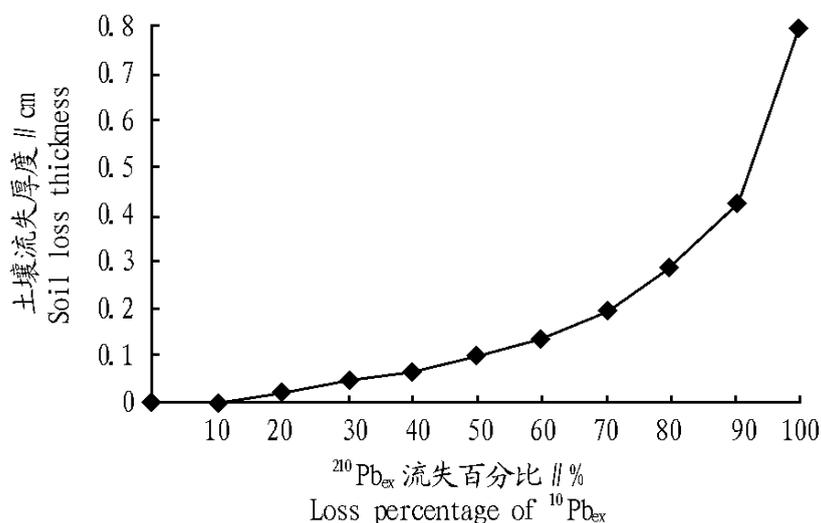


图3 非耕作地稳定状态下土壤流失厚度与 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 减少量之间的关系

Fig.3 Correlation between soil loss thickness and the decrease amount of $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ under the non-farming stable status

$$\int_0^t \text{PRC}_u(t) e^{-\lambda(t-t')} dt = A_{u,1s}(t) \quad (5)$$

式中, R 为侵蚀速率 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $C_u(t)$ 为侵蚀点表层土壤的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 浓度, λ 为 ^{210}Pb 的衰变常数, $A_{u,1s}(t)$ 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 相对于背景值所减少的浓度, P 为土壤粒径校正系数, 定义为运移泥沙中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 浓度与其源地土壤中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 浓度的比值。由于 ^{210}Pb 强烈吸附于细土壤颗粒及土壤侵蚀过程中的粒径分选性, 考虑粒径校正系数 P 是非常必要的, 它反映了运移泥沙和其源地土壤的粒径组成。

该模型可以用来估算中长期(约100年)的非耕地土壤再分配速率, 与 ^7Be 和 ^{137}Cs 技术相比较, 在时间尺度上弥补了示踪短周期和中期的土壤再分配速率。相对于前两者, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 可以克服 ^{137}Cs 因过分依赖于核爆炸实验(核事故泄露)产生的分布不均匀和 ^7Be 的季节性降雨不稳定等造成的缺陷, 可以通过与 ^{137}Cs 、 ^7Be 等多同位素技术相结合来对不同时间尺度的土壤侵蚀速率进行研究, 以更深刻地理解土壤侵蚀的作用原理。

4 结论

利用环境放射性核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 来研究土壤侵蚀和沉积具有很大的应用价值和潜力, 当核素随大气沉降到地表时, 迅速被土壤颗粒吸附, 通过其在土壤间的移动和有规律的分布模式可以示踪100年尺度上的土壤侵蚀速率, 而且浓度的变化可以描述侵蚀和沉积的过程, 可以很好地为水土保持工作提供依据。在以后的工作中, 环境放射性核素 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 作为示踪剂应该得到很好的重视, 主要体现在以下几点:

(1) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 是 ^{238}U 衰变系列的一种自然产物, 其母体 ^{222}Rn 从土壤和岩石中逃逸的一小部分 ^{210}Pb , 经过大气干湿沉降到地表, 且被土壤颗粒所吸附, 这部分 ^{210}Pb 通常称为“非载体来源 ^{210}Pb (记为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)”。在使用谱仪测其比活度时, 样品测量前应密封1~2个月, 目的是使 ^{210}Pb 与其母体达到衰变

平衡; 同时用间接法或直接法计算得到的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量应具有可比性。

(2) 背景值地点的确定是成功的关键, 理想的背景值区是既没有土壤损失也没有土壤沉积, 总量仅仅反映的是大气直接输入的放射性核素, 随着时间的推移而衰变。背景值选择区域单元要地势平坦, 且长期有植被覆盖的地区。一般情况下, 选在采样点附近山顶平坦的草地和低草地。

(3) 非耕作土壤剖面 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的最大浓度通常出现在土壤表层(一般在20cm以内), 自表层自上而下, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的含量随深度增加呈指数降低。 ^{210}Pb 技术可以研究近100年的土壤再分配状况, 在时间尺度上很好的弥补了示踪短周期土壤再分配速率。将 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 技术与 ^{137}Cs 、 ^7Be 等技术进行结合, 复合同位素示踪法在今后研究工作中应得到进一步加强, 以更深刻地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] 郑永春, 王世杰. ^{137}Cs 技术定量侵蚀速率常用模型及其讨论[J]. 山地学报, 2002, 20(5): 600-605.
- [2] 杨明义, 田均良, 刘普灵. 应用 ^{137}Cs 研究小流域泥沙来源[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 49-53.
- [3] ZAPATA F. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentations using environmental radio nuclides[M]. Kluwer Academic Publishers, USA, 2002. IAEA. Bired in the Netherlands, 2002: 185-215.
- [4] 白占国, 万国江. 现代侵蚀作用核素示踪研究新进展[J]. 地球科学进展, 1998, 13(3): 232-237.
- [5] TUREKIAN K K, NOZAKI Y, BENNINGER L K. Geochemistry of atmospheric radon and radon products[J]. Ann Rev Earth Planet Sci, 1977, 5: 227-255.
- [6] 齐孟文, 王琳. 土壤侵蚀 ^{137}Cs 测定的示踪法原理及其常用模型[J]. 中国水土保持, 2004(7): 16-17.
- [7] 魏彦昌, 欧阳志云. 放射性核素 ^{137}Cs 在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(3): 200-206.
- [8] DORR H, MANNICH K O. Lead and Cesium transport in European forest soils[J]. Water Air and Soil Pollution, 1991, 57: 809-818.
- [9] RITCHIE J C, MCHENRY J R. Application of radioactive Cesium 137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns[J]. J Environ Qual, 1990, 19(2): 215-233.
- [10] MEGUMI K, OKATA Y, YASKAWA K, et al. Contents of natural radionuclides in soil in relation to their surface area[J]. J Geophys Res, 1982, 87: 10857-10860.
- [11] HE Q, WALLING D E. Interpreting particle size effect in the adsorption of ^{137}Cs and unsupported ^{210}Pb by mineral soils and sediments[J]. J Environ Radioact, 1996, 30: 117-137.
- [12] RITCHIE J C, MCHENRY J R. Application of radioactive fallout cesium 137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: a review[J]. J Environ Qual, 1990, 19: 215-233.
- [13] WALLBRINK P J, MURRAY A S, COLLEY J M. Relating suspended sediment to its original soil depth using fallout radionuclides[J]. Soil Sci Soc Am J, 1999, 63(2): 369-378.
- [14] WALLBRINK P J, MURRAY A S. Dating soil loss using inventory ratio of excess lead-210 to cesium 137[J]. Soil Science Society of American Journal, 1996, 60: 1201-1208.
- [15] HE Q, WALLING D E. The distribution of fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb in undisturbed and cultivated soils[J]. Appl Radiat Isot, 1997, 48(5): 677-690.
- [16] 张信宝, WALLING D E. $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 在土壤中的深度分布和通过 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 法估算土壤侵蚀速率模型[J]. 科学通报, 2003, 48(5): 502-506.
- [17] WALLING D E, COLLINS A L, SICHINGABULA H M. Using unsupported lead-210 measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small Zambian catchment[J]. Journal of Geomorphology, 2003, 52: 193-213.