

^7Be 在坡面土壤侵蚀中应用的研究进展

李立青, 杨明义, 刘普灵

(中国科学院水土保持与生态环境研究中心 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: ^7Be 是自然界产生的一种放射性核素, 半衰期为 53.3 d, 通过干湿沉降到达地表, 被土壤颗粒强烈吸附, 随土粒的迁移而发生再分布, 因此可作为土壤侵蚀的示踪剂。本文就将 ^7Be 目前在土壤侵蚀研究中的应用现状做了介绍, 并对今后利用 ^7Be 示踪土壤侵蚀提出了建议。

关键词: ^7Be ; 土壤侵蚀; 定量模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2003)02-0069-04

中图分类号: S124; S157

Advance of ^7Be as A Tracer in Studying Sloping Erosion

LI Li-qing, YANG Ming-yi, LIU Pu-ling

(Research Center of Soil and Water Conservation & Eco-environment, Chinese Academy of Sciences, Institute of Soil and Water Conservation and Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Beryllium-7 is environmental or fallout radionuclide with a half-life of 53.3 days, which is produced primarily by the bombardment of the earth atmosphere by cosmic rays. It is subsequently transported into the soil surface by wet and dry deposition. It is rapidly and strongly absorbed by soil particles and redistributes with soil particles. Therefore, it can be used as a tracer for studying soil erosion. The recent progress in the use of the environmental radionuclide beryllium-7 (^7Be) for investigating rates of soil erosion and deposition is introduced, and suggestions for applying it into soil erosion are proposed.

Keywords: ^7Be ; soil erosion; quantitative model

1 概 述

径流、侵蚀垂直分带规律是坡面侵蚀的基本规律, 揭示这种规律不仅有助于人们对坡面土壤侵蚀方式内在联系与演变规律的认识, 而且对于水土保持措施的合理布局, 防止土壤侵蚀具有重要意义^[1]。坡面土壤侵蚀沿垂直方向的变化非常复杂, 它主要取决于地面径流的形成与汇集、土体被破坏剥蚀、泥沙输移与沉积的复杂过程, 并受降雨、地形、土质等多种因素的影响^[2]。现有的土壤侵蚀测定方法基本可分为: 径流小区法、调查法、示踪剂法^[3,4]。径流小区法和调查法虽然广泛应用于土壤侵蚀研究中, 但它们在研究土壤侵蚀过程和侵蚀沉积空间分布特征时却面临着许多困难, 而示踪剂法在研究土壤侵蚀过程和侵蚀沉积空间分布特征中却能够克服径流小区法和调查法的不足, 发挥其特有的优势。目前, 应用放射性核素(如 ^{137}Cs , ^{210}Pb , ^7Be , ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 等)和稳定性稀土元素(REE)示踪土壤侵蚀的研究备受许多研究者的重视, 以 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 示踪技术在土壤侵蚀中的应用研究较为成熟^[5-12]。由于 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 具有较长的半衰

期(分别为 30.3 a 和 22.3 a), 故应用 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 技术通过 1 次采样, 可分别进行大约 50 a 和 100 a 以来的土壤侵蚀速率估算和侵蚀空间分布特征的研究。但是正因为它们具有较长的半衰期, 所以无法示踪短期内或次降雨土壤侵蚀速率, 尤其是纯粹的水蚀速率。 ^7Be 作为一种放射性核素, 有与 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 相似的环境化学行为, 而 ^7Be 的半衰期仅为 53.3 d, 这就使 ^7Be 具备了示踪短期内或次降雨下的土壤侵蚀速率。本文就 ^7Be 在土壤侵蚀研究中的应用原理、现状做一综述。

2 实验 ^7Be 的来源与示踪原理

^7Be 是一种自然产生的放射性核素, 由对流层和同温层大气中的氧和氮在宇宙射线作用下分裂生成, 其半衰期为 53.3 d^[13]。 ^7Be 通过连续的干湿沉降作用到达地表, 主要在土壤表层 0—1 cm 的范围内富集, 有与 ^{137}Cs 相似的环境地球化学行为。Wallbrink 等^[14]研究发现 ^7Be 主要是通过降雨到达地表, 并且与降雨量存在着一定程度的相关关系: 沉降通量(Bqm^{-2}) = $1.03 \times \text{降雨量}(\text{mm}) + 4.2$ ($R^2 = 0.6$)。 ^7Be 随降雨到

收稿日期: 2002-05-10

资助项目: 国家自然科学基金项目资助(40071059)

作者简介: 李立青(1977—), 男(汉族), 内蒙古人, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀新技术、新方法研究。E-mail: li-liqing@163.com。

达土壤表面后能够很快被土壤颗粒强烈吸附。白占国等^[15]研究表明,土壤中⁷Be 的水溶态和可交换态占⁷Be 的总量的不到 1%,土壤中的⁷Be 主要是有机结合态和 Fe—Mn 氧化结合态(大约占 80%),仅有少部分(15%~18%)以残余态存在。在一般环境条件下,⁷Be 几乎是不溶的,它随着土壤颗粒的运动而发生迁移。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(53.3 d),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壤侵蚀程度的示踪剂。白占国^[16]研究喀斯特地区土壤⁷Be 季节性变化,探讨了应用⁷Be 研究土壤侵蚀的可能性。

一些研究者已将⁷Be 用于示踪海洋和湖泊沉积物来源的研究^[17]。⁷Be 较短的半衰期使之成为示踪含有新近沉降⁷Be 的沉积物提供了手段。然而,⁷Be 在土壤侵蚀示踪研究中的应用并不多,特别是很少用于示踪研究短期内或次降雨下的土壤再分布速率。⁷Be 示踪技术应用于土壤再分布速率研究的原理与¹³⁷Cs 技术是相似的。因此,特定采样点土壤的⁷Be 含量与基准点⁷Be 含量差值可反映土壤的空间再分配作用的强度。与基准值相比,土壤⁷Be 总活度的损失说明该采样点发生了侵蚀,土壤总活度的增加则表示出现了沉积。土壤中的⁷Be 损失率或增加率则可用于定量计算土壤侵蚀或沉积速率。

3 土壤⁷Be 损失率与土壤侵蚀速率之间的定量关系模型

由于沉降输入到土壤中的⁷Be 在土壤表层分布,因此,⁷Be 的土壤剖面分布特征可以表征土壤的侵蚀程度。目前,应用⁷Be 示踪技术计算土壤再分布速率的模型的研究并不多。白占国^[16]和 Walling^[18]根据⁷Be 在土壤中的剖面分布特征建立了各自的土壤侵蚀模型。

白占国等^[16]研究认为,⁷Be 的土壤剖面分布受沉降量、侵蚀输入、沉积输出、渗透作用、和放射性衰变等因素影响,假设⁷Be 在表土的渗透作用是扩散过程,则土壤剖面中的⁷Be 活度随时间的变化可用下式表示:

$$\frac{\partial}{\partial Z}(D \frac{\partial}{\partial Z} \rho C) - P(\rho \frac{\partial}{\partial Z} \rho C) - \lambda \rho C = \frac{\partial}{\partial t} \rho C \quad (1)$$

式中: D ——混合系数(cm^2/a); t ——混合时间(a); ρ ——土壤容重(g/cm^3); P ——土壤侵蚀速率(-)或沉积速率(+); λ ——⁷Be 的放射性衰变常数($4.74/\text{a}$)。

假设在一定季节、一定样点的土层中⁷Be 活度处于稳态,即 $\frac{\partial C}{\partial t} = 0$; D, P, ρ 对时间和深度均为常数,并在边界条件: $Z = 0$ 时, $C_{(Z)} = C_0$; $Z = \infty$ 时, $C(Z) = 0$; 则扩散方程解为:

$$C_{(Z)} = C_0 e^{-az} \quad (2)$$

式中:

$$a = \frac{P - (P^2 + 4D\lambda)^{1/2}}{2D} \quad (3)$$

如果未发生土壤侵蚀或堆积,渗透作用占主导地位,即 $P = 0$; 则有:

$$D = \frac{\lambda}{a^2} \quad (4)$$

$$a = -\left(\frac{\lambda}{D}\right)^{1/2} \quad (5)$$

$$C_{(Z)} = C_0 e^{-z(\frac{\lambda}{D})^{1/2}} \quad (6)$$

由式(3)可得:

$$P = Da - \frac{\lambda}{a} \quad (7)$$

式(7)中,如 P 为正值,即为土壤堆积; P 为负值,即为土壤侵蚀。

由上述分析说明:⁷Be 在表土层中的剖面分布与其来源、渗透及衰变直接相关。⁷Be 的活度随土层深度增加呈指数下降。该模型反映的是一个季节内的平均土壤侵蚀速率,不能对特定侵蚀事件的侵蚀速率进行估算。

Walling 等^[18]根据⁷Be 在未扰动土中的垂直分布随深度递减的趋势,建立了以⁷Be 初始剖面分布特征为基础的定量模型。该模型假设⁷Be 在表层土壤剖面中呈指数型分布:

$$C_{\text{Be}}(x) = C_{\text{Be}}(0) e^{-x/h_0} \quad (8)$$

式中: x ——土壤质量深度(kg/m^2); $C_{\text{Be}}(x)$ ——深度 x 处的⁷Be 初始活度(Bq/kg); h_0 ——张弛质量深度(kg/m^2),以表征⁷Be 土壤剖面分布形式。对于指数型剖面分布形式,土壤剖面⁷Be 总量的 63% 分布于 $0 \sim h_0$ 深度范围内。 h_0 越大,说明⁷Be 的剖面最大分布深度越深。

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

$$A_{\text{Be},\text{ref}} = \int_0^\infty C_{\text{Be}}(x) dx = C_{\text{Be}}(0) h_0 \quad (9)$$

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

$$A_{\text{Be}}(x) = \int_x^\infty C_{\text{Be}}(y) dy = C_{\text{Be}}(0) h_0 e^{-x/h_0} \quad (10)$$

该模型假设侵蚀作用使表层一定厚度的整个薄层土壤损失掉。设 h (kg/m^2) 为土壤侵蚀的厚度,且 x

$= h = R_{Be}$, R_{Be} 为土壤侵蚀速率,可由下式求得:

$$R_{Be} = h = h_0 \ln \frac{A_{Be,ref}}{A_{Be}} \quad (11)$$

如果采样点的⁷Be总活度高于基准值,则说明该点发生了净沉积。沉积速率 R_{Be} (kg/m^2) 的大小与该点⁷Be的活度高于基准值的幅度和沉积土壤中⁷Be的浓度 $C_{Be,d}$ (Bq/kg) 有关。由于该技术适用于短期内土壤再分配作用的示踪,加之衰减作用可以忽略,因此,土壤沉积速率 R_{Be} 可用下式表示:

$$R_{Be} = (A_{Be} - A_{Be,ref}) / C_{Be,d} \quad (12)$$

假设沉积土壤⁷Be的浓度 $C_{Be,d}$ 反映来自上坡向贡献面积 S 的沉积物的⁷Be平均质量浓度 $C_{Be,e}$ (Bq/kg),则有:

$$C_{Be,d} = \frac{1}{R_{Be} ds} C_{Be,e} R_{Be} ds \quad (13)$$

来自特定侵蚀单元的沉积土壤的⁷Be浓度可由该点的⁷Be初始分布浓度和侵蚀速率求得,公式如下:

$$C_{Be} = A_{Be,ref} (1 - e^{-R_{Be}/h_0}) / R_{Be} \quad (14)$$

该模型主要应用于一次降雨侵蚀,而且这次降雨侵蚀与相邻的上一次降雨侵蚀间隔大约5个月。这样上次降雨造成的土壤侵蚀与沉积作用对⁷Be空间分布的影响由于衰减而消失。

4 ⁷Be和¹³⁷Cs复合示踪在土壤侵蚀研究中的应用

Burch等^[19]研究表明,不同放射性核素渗透深度的差异使之可以用于说明土壤剖面中沉积土壤的最初来源,并可推断可能发生的侵蚀过程。沉积土壤中的¹³⁷Cs和⁷Be活度较好地说明土壤通过片蚀或细沟侵蚀作用进行搬运的情况。若沉积土壤中的¹³⁷Cs活度较高,而⁷Be活度较低,则说明它是来自人类活动较多的土壤环境,也就是说土壤颗粒来自原土壤5—50 mm深度范围内。很低或检测限以下的¹³⁷Cs和⁷Be活度则说明该土壤并未接受到¹³⁷Cs和⁷Be的大气沉降,如遭受侵蚀的沟壁土壤。较高的⁷Be活度和较低的¹³⁷Cs活度则表明该沉积土来自¹³⁷Cs基本全部损失的土壤,但该土壤有足够的暴露时间获得大气沉降的⁷Be。Wallbrink等^[20]采用⁷Be和¹³⁷Cs以及其它放射性元素复合示踪研究不同侵蚀类型在土壤侵蚀作用中的相对贡献,结果证明,⁷Be用于示踪浅层表土来源是非常有用的。杨明义^[21]首次利用⁷Be和¹³⁷Cs复合示踪技术,研究次降雨条件下黄土坡面不同侵蚀方式(片蚀和细沟侵蚀)随时间推移的发生、发展,定量区分了面蚀和细沟侵蚀的演变过程及其在坡面侵蚀中的地位,证明了⁷Be和¹³⁷Cs复合示踪研究土壤侵蚀过程的可行性。

5 建议与展望

根据⁷Be是自然界产生、连续沉降、半衰期短(53.3 d)、在土壤表层富集等特点,今后在利用⁷Be作为土壤侵蚀(水蚀)示踪剂的研究过程中,应主要从以下几个方面着手:

(1) ⁷Be主要通过降雨到达地表,在同一地区地形对降雨径流的再分配作用会引起土壤中⁷Be含量的空间分异性。因此,在应用⁷Be估算土壤侵蚀速率时,一定要考虑到⁷Be的空间分布特征。

(2) ⁷Be在土壤剖面中分布模式是利用⁷Be估算土壤侵蚀速率的基础,而⁷Be在土壤剖面分布特征受沉降通量、衰变作用、渗透作用以及侵蚀作用的共同影响。因此,在实际应用中⁷Be在土壤剖面中分布模式的研究不容忽视。

(3) 由于⁷Be主要在土壤表层(1 cm左右)富集,所以⁷Be在土壤侵蚀研究中的应用应放在坡度较平缓、以片蚀和细沟侵蚀为主的坡面。

(4) ⁷Be连续沉降与半衰期53.3 d是⁷Be示踪短期内或特定侵蚀事件(一次降雨)土壤侵蚀程度的优势,所以可用于评价不同水土保持措施,特别是林草植被建设的减沙效益,为生态环境建设提供及时合理的评价。

(5) ⁷Be是宇宙射线作用于大气中的氧原子与氮原子生成的,因此通过研究不同年份、同一年份不同季节以及不同地区⁷Be沉降通量的变化,可以探讨宇宙射线对地球环境的作用。

[参考文献]

- [1] 郑粉莉,高学田.黄土坡面土壤侵蚀过程与模拟[M].西安:陕西人民出版社,2000.
- [2] 刘普灵,武春龙,等.稀土元素示踪法在坡面土壤侵蚀垂直分布研究中的应用[J].水科学进展,2001,12(3):331—335.
- [3] 唐小明,李长安.土壤侵蚀速率研究方法综述[J].地球科学进展,1999,14(3):274—277.
- [4] 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(1):17—21.
- [5] 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.
- [6] Tian Junliang et al. REE tracer method for studies on soil erosion[J]. Int. J. Sediment. Res. 1994,9(2).
- [7] 石辉.利用REE示踪法研究小流域泥沙来源[D].中国科学院水土保持所,1995陕西杨凌.
- [8] 张信宝,等.Cs-137法测定梁峁坡农耕地土壤侵蚀初探[J].水土保持通报,1988,8(5).
- [9] 张信宝,李少龙,王成华,等.黄土高原小流域泥沙来源

- 的 Cs-137 法研究[J]. 科学通报, 1989, 3: 210—213.
- [10] Rogowski A S, Tamura T. Movement of Cs-137 by runoff, erosion and infiltration on the alluvial caprina silt loam [J]. Health Physics, 1965, 11: 1333—1340.
- [11] Ritchie J C, McHenry J R, Gill A C. Fallout Cs-137 in the soils and sediments of three small watersheds[J]. Ecology, 1974, 55: 887—890.
- [12] 唐翔宇, 杨浩, 赵其国, 等. ^{137}Cs 示踪技术在土壤侵蚀估算中的应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 4(1): 576—582.
- [13] Olsen C R, Larse I L, lowry P D, et al. Atomospheric fluxes and marsh-soil inventories of ^7Be and ^{210}Pb [J]. J Geophys Res, 1985, 90: 10487—10495.
- [14] Wallbrink P J and Muruay A S. Distribution and variability of ^7Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution processes [J]. Water Reources Research, 1996, 32: 467—476.
- [15] 白占国, 等. 岩溶山区表土中 ^7Be , ^{137}Cs , ^{226}Ra 和 ^{228}Ra 的地球化学相分配及其侵蚀示踪意义[J]. 环境科学学报, 1997, 17(4).
- [16] 白占国, 万国江. 宇宙线散落核素 ^7Be 在山区表土层中的分布特征及侵蚀示踪原理[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 266—275.
- [17] 万国江, Appleby P G. 环境生态系统散落核素示踪研究新进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(2): 172—177.
- [18] Walling D E, He Q P, Blake W. Use of ^7Be and ^{137}Cs measurements to document short-and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land [J]. Water Resource Res, 1999, 35(2): 3865—3874.
- [19] Burch G J. Detection and prediction of sediment sources in catchments: use of ^7Be and ^{137}Cs . Paper presented at hydrology and water resources symposium, inst. Of Eng., Aust. Nati. Univ., Canberron, 1988.
- [20] Wallbrink P J, Murray A S. Use of fallout radionuclides as indicators of erosion processes. Hydrological Processes. 1993, 7: 297—304.
- [21] 杨明义. 多核素复合示踪定量研究坡面侵蚀过程[D]. 中国科学院水土保持研究所. 博士学位论文, 2001. 陕西 杨凌.

(上接第 68 页)

建议中美水土保持科技合作领域如下。

(1) 土壤侵蚀过程及其环境影响评价。定量研究风蚀、水蚀、重力侵蚀过程, 评价这些过程对地形稳定、水资源数量和质量、农业和环境的影响。

(2) 流域生态系统恢复和管理。包括①流域生态过程(物理、化学和生物过程对流域生态系统的作用); ②流域生态系统健康评价(指标确定及评价方法); ③确定流域生态系统对治理保持措施和气候变化的敏感性。

(3) 气候变化—植物响应—侵蚀过程—环境质量演变的耦合关系。植物生长对全球气候变化下的响应, 气候和植物变化对土壤侵蚀过程的影响及其与环境质量演变的耦合关系。

(4) 不同尺度水土流失预测预报。美国水土流失的预测预报研究代表了世界上的最高水平。借鉴美国的成功经验, 开发研制适用于复杂地形区的不同尺度水土流失预测预报模型是中美水土保持界共同面临的重大议题。

(5) 水土保持与生态环境建设的环境效应评价。大规模进行水土保持与生态环境建设会带来一系列的生态环境效应问题, 特别是大规模治理后会不会引起新的生态环境问题, 区域生态环境的变化趋势等是目前迫切需要开展的重要课题。美国在这方面的成功经验可供我们借鉴。

本文多次引用了水利部陈雷副部长在第 12 届国际水保大会上的主题发言报告。在此表示感谢!