

^7Be 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用

丁晋利^{1,2}, 郑粉莉^{1,2}

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨陵 712100;
2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

摘要: 利用放射性核素示踪研究土壤侵蚀已成为国际社会普遍关注的热点问题。 ^7Be 作为一种自然产生的, 短寿命的(半衰期 53.3 d)放射性核素, 具有特殊的示踪价值。介绍了 ^7Be 的来源、散落特征及其在土壤颗粒中的存在形态, 阐述了 ^7Be 示踪技术现有的土壤侵蚀速率定量估算模型, 提出了我国开展 ^7Be 示踪土壤侵蚀过程研究的建议。

关键词: 放射性核素; ^7Be ; 土壤侵蚀; 定量估算模型

中图分类号: S 157

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2004)04-0121-03

The Application of ^7Be as a Tracer to Soil Erosion Research

DING Jin-li^{1,2}, ZHENG Fen-li^{1,2}

(1. The State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;
2. Northwest Sci-tech University of Agriculture & Forestry, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Application of radionuclide as a tracer to study soil erosion is a hot spot in the world. ^7Be is an environmental or fallout radionuclide with a half-life of 53.3 days, which confirmed its particular trace value. The authors introduced ^7Be origin source, fallout characteristics, forms in soil particles, and presented quantitative estimate model of soil erosion rate by using ^7Be as a tracer. The comments on using ^7Be as tracer for soil erosion research in China are presented.

Key words: radionuclide; ^7Be ; soil erosion; quantitative estimation model

现有的土壤侵蚀测定方法可分为: 径流小区法, 调查法和示踪法。其中径流小区法和调查法在研究土壤侵蚀与其影响因子之间的关系方面发挥了很重要的作用, 是测定土壤侵蚀速率、河流泥沙量的传统方法, 但这些方法一般只能测定一定坡长地段内的总侵蚀量, 难以对坡面剥离—搬运—沉积的物理过程作定量描述; 而示踪法在不改变原始地貌的条件下进行土壤侵蚀发生和分布规律研究, 其分析精度和量化程度较高, 不需特殊的野外设施, 可定量监测土壤侵蚀时空变化规律, 克服了径流小区法与调查法的不足。目前, 应用放射性核素示踪进行土壤侵蚀研究已成为土壤学的国际前沿研究热点之一。其中以 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 示踪技术在土壤侵蚀中的应用研究领域较为深入。 ^7Be 是一种具有与 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 相似环境化学行为的放射性核素, 虽然其已被作为示踪剂对土壤侵蚀空间分布特征进行了研究, 但 ^7Be 示踪土壤侵蚀过程机理研究的相关报道尚未见到。

1 ^7Be 的来源、散落特征

^7Be 是宇宙射线成因的放射性核素, 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, 生成的 ^7Be 通过干湿沉降作用到达地表, 其半衰期为 53.3 d。 ^7Be 这种性质使之适用于示踪短期内或次降雨下的土壤侵蚀速率。

Wallbrink^[2] 研究发现 ^7Be 主要通过降雨到达地表且与降雨量存在着一定程度的相关关系: 沉降通量(Bq/m^2) = $1.03 \times$ 降雨量(mm) + 4.2 ($R^2 = 0.6$), 而每个月干沉降的贡献仅占 3% ~ 8%。 ^7Be 自大气向地表散落迁移的速率为 $2.7 \text{ cm}/\text{s}$ ^[3]。瑞士空气中 ^7Be 的浓度为 80 flux change per x inch per cubic meter, 其年散落通量为 $0.25 \text{ Bq}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$, 散落累计值约为 $530 \text{ Bq}/\text{m}^2$ ^[4]。位于墨西哥湾的 Galveston, ^7Be 的年沉降通量为 $0.245 \text{ Bq}/(\text{cm}^2 \cdot \text{a})$ 。在同一地区, ^7Be 自大气散落通量变化主要受降水影响, 其最大值出现在夏天^[5]。白占国^[6] 在奥地利 Gossenkoellesee 和 Mondsee 观测 ^7Be 随一次降水沉降通量分别为 $1.75 \times 10^{-2} \text{ Bq}/\text{cm}^2$ (降水量为 6.27 mm) 和 $3.43 \times 10^{-3} \text{ Bq}/\text{cm}^2$ (降水量为 590 mm); 贵阳观风山 ^7Be 散落通量为 $7.86 \times 10^{-4} \text{ Bq}/\text{cm}^2$; 降水量为 2.78 mm。

2 ^7Be 在土壤颗粒中存在形态与分布

^7Be 在自然环境中与水作用时, 瞬息在表面形成难溶的氢氧化物, 这一化学特性决定了 ^7Be 的微粒迁移性质^[5,6]。通过沉降作用到达地表的 ^7Be 能够很快被土壤吸附。万国江^[7] 等通过对表层土壤样品的溶析实验研究表明, ^7Be 的水溶态和可交换态小于 1%; 绝大部分 ^7Be 存在于有机结合态和 Fe - Mn 氧化结合态(约占 79%) 仅有少部分(15% ~ 18%) 以

① 收稿日期: 2004-07-10

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(40335050); 国家自然科学基金西部重大研究计划项目(90302001)

作者简介: 丁晋利(1978-), 女, 硕士研究生, 研究方向为坡面土壤侵蚀过程与机理。

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。⁷Be 在土壤颗粒中的分布也不相同。Wallbrink^[2]研究了⁷Be 在土壤不同粒径颗粒中的分布，发现二者存在明显的相关性，随土壤粒径变小⁷Be 的活度增加。

3 ⁷Be 示踪土壤侵蚀的原理

从⁷Be 的环境化学行为来看，它可以作为土壤颗粒迁移的示踪剂。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^[13,14]。⁷Be 在表层土壤中的分布特征决定了其对表层土壤发生迁移的敏感性，为其示踪表层土壤的再分布奠定了基础。由于⁷Be 是自然界产生且连续沉降，加上较短的半衰期(53.3 d)，所以它可以作为短期内，次降雨土壤侵蚀空间分布特征的示踪剂，也可以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^[6]利用⁷Be 示踪技术研究喀斯特地区的季节性变化，探讨了应用⁷Be 研究土壤侵蚀的可能性。Walling^[11]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。

⁷Be 示踪技术应用于土壤再分布速率研究原理与¹³⁷Cs 技术是相似的。因此，⁷Be 定量土壤侵蚀量和侵蚀速率可以通过侵蚀或沉积样点(即研究区域)的⁷Be 含量与环境中⁷Be 输入量(称为背景值)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。其中背景值的选取是关键，它直接影响测定结果的准确性。理想的背景值可以用环境中既无侵蚀也无沉积发生部位的土壤⁷Be 含量来代替或者取平坦而长期无人干扰的草地样点。在黄土高原侵蚀严重地区，理想的背景值很难得到，但需要一定数量样点的平均值才能较好地代表⁷Be 的背景值^[8]。

4 ⁷Be 在土壤剖面中的分布特征

Olsen^[10]等研究表明，美国沼泽土中⁷Be 的最大剖面分布深度为 40~50 mm，而对于未饱和的沼泽土而言，由于雨水的快速下渗可能使⁷Be 的剖面分布更深。Wallbrink^[2]对⁷Be 在土壤剖面中的分布及其影响因素做过大量研究。对不同土地利用类型的土壤进行测定，表明⁷Be 在土壤表层 0~20 mm 分布，其最大渗透度受植被覆盖和土壤物理性质的影响。⁷Be 的活度随土壤的深度增加基本呈指数递减。Walling^[11]分别对耕作土壤和非耕作土壤⁷Be 的剖面分布进行研究。结果表明，其分布深度也在 0~20 mm 范围内。在未发生侵蚀或堆积的耕作土壤中⁷Be 的分布模式和总活度与非耕作土壤基本一致，但前者的最大分布深度略高于后者，表层活度却低于后者，这反映了二者土壤质地和土壤容重之间的差异。在发生侵蚀的耕作土壤中⁷Be 的活度明显低于非耕作土壤。而在发生堆积的耕作土壤中⁷Be 的活度和分布深度高于非耕作土壤。综上所述，沉降输入到土壤中的⁷Be 在土壤剖面中的分布特征主要受到两方面的影响：一方面由于⁷Be 半衰期较短不可能在土壤中长期蓄积，所以它在土壤剖面中的赋存深度有限；另一方面，土壤的覆盖程度和物理性质对⁷Be 的土壤剖面分布有重要影响。

5 关于⁷Be 的模型研究

目前，应用⁷Be 示踪技术估算土壤侵蚀速率的定量模型的研究并不多。Bai^[12]等研究认为，⁷Be 在表土中的分布取决于其沉降量、侵蚀输出、沉积输入、下渗作用和放射性衰变等。Bai 等假设⁷Be 在表土的下渗作用是扩散过程，则土壤剖面中⁷Be 活度随着时间的变化可用下式表示：

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

式中： D ——混合系数(cm^2/a)； t ——混合时间(a)； ρ ——原位土壤容重(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/a)。

该模型假设在特定的季节和地形单元⁷Be 的活度保持稳态，即，则 D 、 P 和 ρ 随时间和深度在边界条件内保持恒定，即

$$Z=0, C(Z)=C_0; Z=\infty; C(Z)=0 \text{ 这样, 可由(1) 式获得:}$$

$$C(Z) = C_0 \cdot e^{-aZ} \quad (2)$$

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

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

如果该点未发生侵蚀或沉积，而边界混合渗透作用是主导的，即

$$P = 0; a = -(\frac{\lambda}{D})^{\frac{1}{2}}$$

$$C(Z) = C_0 \cdot e^{-aZ} \quad (5)$$

则,
$$P = Da - \frac{\lambda}{a} \quad (6)$$

由上式可见，当 $P > 0$ 时，说明该点发生沉积；当 $P < 0$ 时，说明该点发生侵蚀。

上述定量模型的建立是以⁷Be 在土壤剖面中的分布模式为基础的。由于⁷Be 在表土中的剖面分布与其来源、渗透及衰变直接相关，因此，该模型充分考虑了其沉降量、侵蚀输出、沉积输入、下渗作用和放射性衰变等。由于该模型反映的是一个季节内的平均土壤侵蚀速率，因此不能对特定侵蚀事件的侵蚀速率进行估算。

Walling^[11]等建立了基于⁷Be 初始剖面分布特征的基础上的定量模型。该模型假设⁷Be 在表层土壤剖面中呈指数型分布：

$$C_{Be}(x) = C_{Be}(0) e^{-\frac{x}{h_0}} \quad (7)$$

式中： x ——自土表算起的某一深度质量(kg/m^2)； $C_{Be}(x)$ ——深度处的⁷Be 初始活度(Bq/kg)； $C_{Be}(0)$ ——土表(即 $x = 0$)的⁷Be 初始浓度(Bq/kg)； h_0 ——张弛深度质量(kg/m^2)。对于指数型土壤剖面分布，⁷Be 总量的 63% 分布于 $0 \sim h_0$ 深度范围内。 h_0 值越大，说明⁷Be 的剖面最大分布深度越深。

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

$$A_{Be,ref} = \int_0^\infty C_{Be}(x) dx = C_{Be}(0) h_0 \quad (8)$$

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

$$A_{Be}(x) = \int_x^\infty C_{Be}(y) dy = A_{Be}(0) h_0 e^{-\frac{x}{h_0}} = A_{Be,ref} e^{-\frac{x}{h_0}} \quad (9)$$

该模型假设侵蚀作用使土壤表层一定厚度的整个薄层土壤损失掉。设 $h(\text{kg}/\text{m}^2)$ 为土壤侵蚀的厚度,且 $x = h = R_{Be}$, 土壤侵蚀速率 $R_{Be}(\text{kg}/\text{m}^2)$ 可由下式求得:

$$R_{Be} = h = h_0 \ln \frac{A_{Be,ref}}{A_{Be}} \quad (10)$$

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 $R_{Be}(\text{kg}/\text{m}^2)$ 的大小与该点⁷Be 活度高于基准值的幅度和沉积土壤的⁷Be 浓度 $C_{Be,d}(\text{Bq}/\text{m}^2)$ 有关。由于本技术适用于短期特定事件导致的土壤再分配作用的示踪,加之衰减作用使得沉积土壤⁷Be 含量的长期变化可以忽略,因此,土壤沉积速率 R'_{Be} 可用下式表示:

$$R_{Be} = (A_{Be} - A_{Be,ref}) / C_{Be,d} \quad (11)$$

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

$$C_{Be,d} = \frac{1}{R_{Be} d S^5} C_{Be,e} R_{Be} d S \quad (12)$$

来自特定侵蚀点的沉积土壤的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:

$$C_{Be,e} = A_{Be,e} (1 - e^{-R_{Be} t / h_0}) / R_{Be} \quad (13)$$

该模型只适用于历次特定侵蚀事件间隔大约 5 个月(即 3 个⁷Be 半衰期)以上的条件下。该模型还假设,这 5 个月内的沉降作用(主要指降雨)并未造成显著侵蚀,因而期间的⁷Be 沉降在空间上是均匀分布的。事实上,数次侵蚀事件之间往往不会有足够的时间间隔,因此,应在考虑⁷Be 沉降输入的时间分布、沉积和迁移土壤中⁷Be 的衰减作用、侵蚀事件的时间分布

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] Wallbrink, P J, A. S. Muruay, Distribution and Variability of Be in soils under different surface cover conditions and its potential for describing soil redistribution processes[J]. Water Resources Research, 1996, 32, 467- 476.
- [3] Turekian, K K, Benninger, L K, Dion E P. ⁷Be and ²¹⁰Pb total deposition fluxes at New Haven, Conn. and at Bermuda [J]. J. Geophys. Res., 1983, 88(C9). 5411- 5415.
- [4] KUER (Kommission zur Überwachung der Radioaktivität) Bericht. 25 Jahre Radioaktivität Überwachung in der Schweiz [Z]. Phys. Inst., Univ. of Freiburg, Freiburg, 1982.
- [5] Baskaran M, Coleman Ch, Santschi, P H, Atmospheric deposition flux of ⁷Be and ²¹⁰Pb at Galveston and college station Texas [J]. J. Geophys. Res, 1993, 98(D11): 20555- 20571.
- [6] 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- 274.
- [7] 万国江,白占国,等.湖泊现代沉积作用核素示踪研究进展[J].地质地球化学, 1996, 2: 9- 13.
- [8] 郑永春,王世杰.¹³⁷Cs 的土壤地球化学及其示踪意义[J].水土保持学报, 2002, 16(2), 57- 61.
- [9] Blake, W. H., Walling, D. E. and Q. He, Fallout betyllium, Be as tracer in soil erosion investigations [J]. Appl Radiat Isotopes, 1999, 51: 599- 605.
- [10] Olsen, C R, Larse, I L, Lowry, P D, et al. Atmospheric fluxes and marsh- soil inventories of ⁷Be and ²¹⁰Pb [J]. Geophys. Res, 1985, 90: 10487- 10495.
- [11] Walling, D E, He, Q P, W Blake. Use of ⁷Be and ¹³⁷Cs measurement to document short and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land [J]. Water Resource Res, 1999, 35(2), 3865- 3874.
- [12] Bai Z G, Wan G J, Wang C S, et al. ⁷Be A geochemical tracer for seasonal erosion of surface soil in watershed of Lake Hongfeng, Guizhou, China [J]. Pedosphere, 1996, 6(1): 23- 28.
- [13] Young, J A, W A Silker. Aerosol deposition on the pacific and Atlantic Ocean calculated from ⁷ Be measurements [J]. Earth Planetary Sci Letter, 1987, 50: 92- 104.
- [14] Wan, G J, Santschi, M, Sturm, K, et al. Natural (²¹⁰Pb, ⁷Be) and fallout (¹³⁷Cs, ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ⁹⁰Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland [J]. Chem. Geol., 1987, 63: 181- 196.

布的基础上,建立适用范围更广的定量模型。

6 结 论

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利于人们对土壤侵蚀方式内在联系与演变规律的认识,而且对于防止土壤侵蚀具有重要意义。⁷Be 示踪技术的应用为土壤侵蚀研究提供了一种新方法,具有良好的应用前景。有关⁷Be 示踪技术在今后的研究,建议如下:

(1) 现有模型的建立没有充分考虑到⁷Be 的空间分布特征。因此,在今后的研究中,应把⁷Be 沉降输入的时间分布、侵蚀事件的时间分布及其随降雨径流的再分配考虑在内,加强⁷Be 在土壤剖面中的分布模式研究,建立适用范围更广的定量模型。

(2) 由于土壤⁷Be 活度变化反映的是各主要侵蚀影响因素的综合作用结果。因此,⁷Be 技术也可用于研究特定小流域的水文气象条件对土壤侵蚀的综合影响。

(3) 土壤侵蚀过程是侵蚀动力与下垫面相互作用的过程,作用过程复杂,影响因素多。为了进一步肯定⁷Be 示踪坡面土壤侵蚀过程的可行性,应设计新的实验方案对⁷Be 随降水径流的运移特征开展进一步的研究,并分析其预报次降雨量土壤侵蚀量的精度。

(4) ⁷Be 示踪技术只是土壤侵蚀的研究的一种方法,整个土壤侵蚀研究工作的进行和土壤侵蚀物理模型的建立离不开对土壤侵蚀作用机理的深刻理解,在此基础上,加强对⁷Be 示踪土壤侵蚀过程机理研究,并把⁷Be 技术与其他研究方法相结合,为建立我国土壤侵蚀物理预报模型提供依据。