

工程建设弃土弃渣水土流失⁷Be 核素示踪监测技术

贺秀斌¹, 陈晨宇², 韦杰¹, 张信宝¹, 李海林²

(1. 中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041;

2. 中国水电顾问集团 华东勘测设计研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 系统介绍了⁷Be 核素侵蚀示踪技术的原理和方法。⁷Be 核素侵蚀示踪技术提供了短时期季节性或单次降水事件的水土流失信息, 可为水土流失监测, 土壤侵蚀模型试验研究提供重要信息数据。⁷Be 核素侵蚀示踪技术具有不受场地限制、简便快捷, 省时省力等特点。对工程建设弃土弃渣水土流失的监测, 不用建立把口站或径流小区, 只须在雨季后采一次样, 或雨季(单次降雨)前后各采集一次样品, 利用⁷Be 核素侵蚀示踪技术就可精确估算出其水土流失量。

关键词: 核素侵蚀示踪; ⁷Be; 弃渣弃土; 水土流失监测

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2006)06-0067-05

中图分类号: S157, X837

Erosion Monitoring by ⁷Be Tracing Technique for Debris Deposit in Project Construction Sites

HE Xiubin¹, CHEN Chenyu², WEI Jie¹, ZHANG Xinfu¹, LI Hailin²

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. East China Investigation and Design Institute, Hangzhou, Zhejiang 310014, China)

Abstract: Cosmogenic environmental radionuclide ⁷Be, produced primarily by the bombardment of the earth's atmosphere by cosmic rays within the troposphere and stratosphere, has a similar environmental chemical behavior as ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb. With a half-life of 53.3 days, ⁷Be can be used to document short-term rates, patterns and seasonal variations of soil redistribution or sediment deposition representing the influences of a specific landuse or a particular event in a period of precipitation. Potential application of the information on soil erosion and redistribution provided by ⁷Be measurements can clearly include the validation and calibration of distributed event-induced soil erosion and sediment delivery models. ⁷Be technique, a potential alternative to ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb in situations where information on short-term or event-based soil erosion is required, is considerably promising in soil erosion tracing, such as soil erosion on debris from project construction.

Keywords: radionuclide tracing techniques; ⁷Be; debris from construction; erosion monitoring

全世界每年因开发建设等活动大约造成 400 亿 m³ 的松散堆积物, 压盖、占用大量土地, 并造成了严重的水土流失^[1]。近年来我国各类开发建设项目急剧增加, 因开发建设导致人为新增水土流失问题越来越严重^[2-3]。据调查估算, 仅长江流域每年因水电开发、开矿、修路、城镇建设等基本建设活动新增的水土流失面积在 1000 km² 以上, 侵蚀量超过 1.50 × 10⁸ t^[4]。我国《水土保持法》及相关法规要求对一切有可能造成新增水土流失的建设项目, 如矿产开采、水利工程建设、交通运输工程建设、区域自然资源开发、土地开垦等, 都必须制定水土保持方案并贯彻实施^[1], 而编制水保方案的主要内容之一是对水土流失量进

行预测, 然而目前工程开发建设人为水土流失过程机理、预测预报及其侵蚀特殊性的研究还十分薄弱。开发建设所产生的松散堆积物不同于自然地表土壤, 它属于非均质的多相体。20 世纪 80 年代, 美国学者 Mitchell, Lang 分别对松散堆积物的可蚀性进行了研究, 并应用通用土壤流失方程预测其流失量^[5], 但是松散堆积物的水土流失不同于坡耕地水土流失, 边界条件发生了本质变化, 不能直接运用通用土壤流失方程来计算工程项目施工造成的水土流失量^[6]。我国学者针对煤田和公路建设弃土弃渣体侵蚀产沙规律进行了试验研究^[7], 李智广等总结开发建设项目水土流失预测方法为^[8]: 数学模型法、类比分析法、典

型调查推算法等。但是开发建设水土流失的研究仍停留在对其类型、分布的野外调查、定性描述和少量有限的野外模拟试验方面,对涉及侵蚀机理、影响因素与侵蚀量关系的定量化试验研究较少,开发建设新增水土流失量估算缺乏科学依据。本文介绍了 ^7Be 核素示踪技术在开发建设项目弃土弃渣水土流失监测方面的应用。

1 核素示踪技术基本原理

20 世纪 70 年代以来,世界上核示踪技术用于侵蚀泥沙的研究取得了突破性进展。应用最广和最成功的是 ^{137}Cs 示踪技术。 ^{137}Cs 是 20 世纪 50—70 年代大气层核试验产生的放射性核尘埃,半衰期 30.2 a。 ^{137}Cs 主要随降雨降落到地面,随即被表层土壤颗粒吸附, ^{137}Cs 基本不被植物摄取和淋溶流失,它以后的迁移主要伴随土壤、泥沙颗粒的物理运动。大气层核试验产生的 ^{137}Cs 尘埃沉降到地表,相当于在地球表面撒播了一层 ^{137}Cs 示踪源,在较小的范围内,可以认为 ^{137}Cs 是均匀分布的,通过与当地参照点(local reference)对比,可以定量计算土壤侵蚀速率或沉积速率。地表环境中核素迁移模式及其侵蚀示踪原理^[9]如图 1 所示。美、澳、加、英是世界上运用 ^{137}Cs 示踪技术研究侵蚀泥沙最早的国家,我国于 20 世纪 80 年代末期开始此项研究。

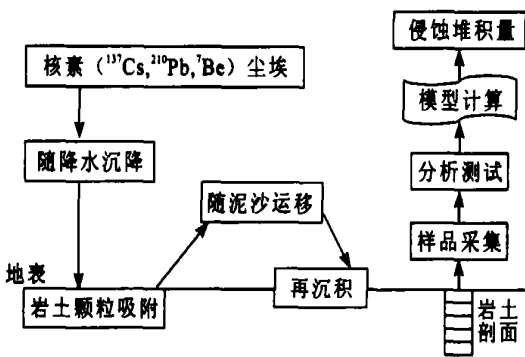


图 1 地表环境中核素迁移模式及其侵蚀示踪原理

90 年代以来,澳大利亚和英国率先开展了侵蚀泥沙的 ^{210}Pb 研究, ^{210}Pb 是 ^{238}U 衰变系列的产物, ^{210}Pb 源于气体 ^{222}Rn 的衰变,为 ^{226}Ra (半衰期 1 622 a)的姊妹元素。 ^{226}Ra 天然赋存于土壤和岩石中。土壤中的 ^{210}Pb 产生于 ^{226}Ra 的衰变,为本源性 ^{210}Pb ,与 ^{226}Ra 平衡。另一方面,土壤和岩石中产生的 ^{222}Rn ,一小部分释放到空气中,在大气中衰变为 ^{210}Pb ,大气沉降的 ^{210}Pb 不与表土和泥沙中的父系元素 ^{226}Ra 相平衡,通常将这部分 ^{210}Pb 称为非载体的 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)。土壤样品中非载体的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 数量可以通过测试样品 ^{210}Pb 和 ^{226}Ra 活度计算求得,即从样品的 ^{210}Pb 总浓度中减去 ^{226}Ra 浓度即为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 浓度。

^7Be 是 Be 众多的同位素家族(^6Be , ^7Be , ^8Be , ^9Be 和 ^{10}Be)中的一种,质子和中子数分别是 4 和 3,半衰期为 53.3 d。 ^7Be 来源于大气层顶部的宇宙射线中高能粒子与高层大气中 ^{14}N , ^{16}O 原子核的碰撞及反应,它在 10~20 km 高度附近有一峰值,反应式为: $^3\text{He} + ^4\text{He} \rightarrow ^7\text{Be} + \gamma$ 。 ^7Be 原子一旦形成,很快被吸附在亚微米尺度的气溶胶上,气溶胶伴随降雨沉降到地面,主要以阳离子态为表层土壤强烈吸附,它以后的运动主要伴随土壤颗粒发生迁移。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,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坡侵蚀程度的示踪剂。与 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 相似, ^7Be 定量土壤侵蚀量和侵蚀速率可以通过侵蚀或沉积样点的 ^7Be 含量与环境中 ^7Be 输入量(称为本底值)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(表 1)。白占国在喀斯特地区土壤 ^7Be 季节性变化研究中探讨了应用 ^7Be 研究土壤侵蚀的可能性。Walling 也利用 ^7Be 示踪技术对一次降雨侵蚀事件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。

表 1 不同核素侵蚀示踪技术的应用比较

示踪元素	来源	半衰期	监测时段	监测范围	监测指标
^{137}Cs	核爆炸	30.02 a	1963 年以后的 120 a 内	表层侵蚀(溅蚀、面蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀)	采样点 1963 年至今的多年平均侵蚀模数
$^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$	天然	22.2 a	过去的 100 a	表层侵蚀(溅蚀、面蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀)	采样点过去 100 年的多年平均侵蚀模数
^7Be	天然	53.3 d	过去的 200 d	表层侵蚀(溅蚀、面蚀、细沟侵蚀和浅沟侵蚀)	采样点过去 200 d 的侵蚀量

2 ⁷Be 侵蚀示踪样品采集与分析

经过现场踏勘后确定样品采集策略(图2), 2至5个样品重复。取样可以采用如下方法^[15]: 在标准样方内(60 cm × 60 cm), 用不锈钢钢丝刷分层刷取表层土壤, 0—10 mm 土层土壤按 2 mm 厚度分层取样; 10—20 mm 土壤按 5 mm 厚度分层取样, 每一土壤剖面每次采集数个分层土壤样品。

分层取得的土壤样品装入土壤袋并做好取样记录带回室内。

先将土壤样品风干、研磨、过筛(2 mm), 分别称重, 将 < 2 mm 的土样在 105 °C 的烘箱中烘干后, 称取 400 g 左右样品供测试用(图3)。测试采用高纯锗探头多道 γ 能谱仪, 在 478 keV 能谱峰下测试⁷Be 比活度, 测试时间 30 000 s 以上, 然后用全峰面积法(TPA)求算⁷Be 比活度。

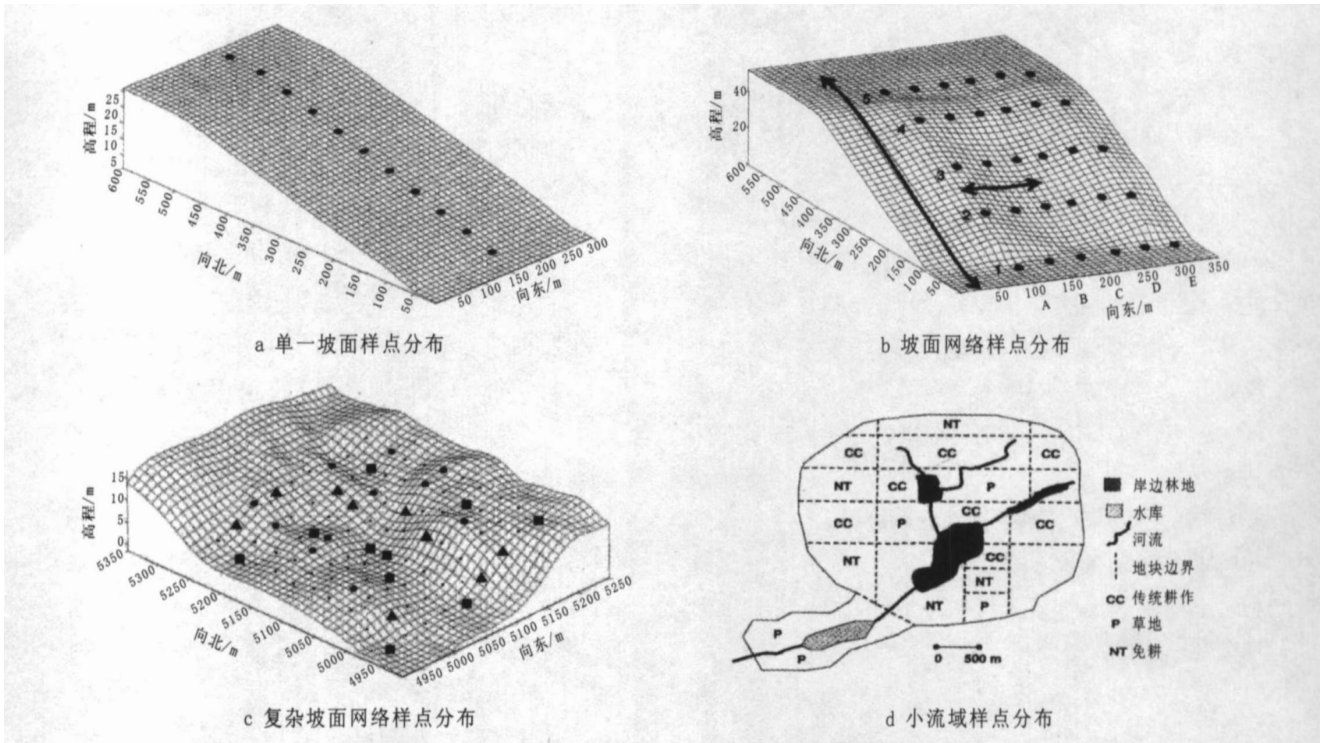


图2 ⁷Be 核素侵蚀示踪监测采样布点策略^[10]

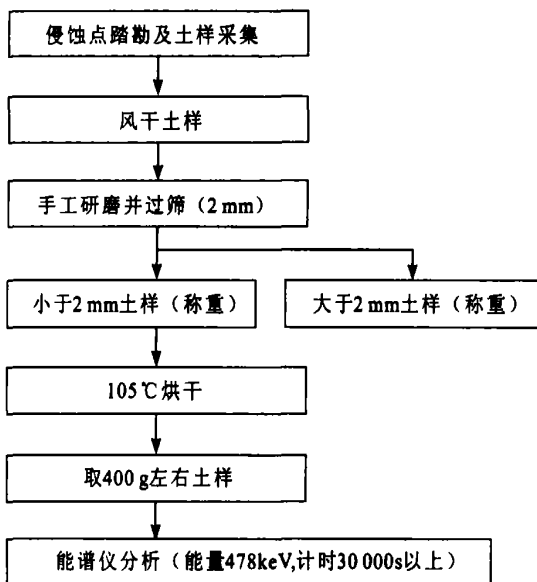


图3 ⁷Be 样品采集与分析流程

3 ⁷Be 示踪土壤侵蚀量计算模型

3.1 季节内平均侵蚀速率计算模型

白占国认为^[11,13-14], ⁷Be 在表土中的分布取决于沉降量、侵蚀输出、沉积输入、下渗作用和放射性衰变等。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($4.74/\text{a}$)。

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 $Z = 0, C(z) = C_0^*, Z = \infty, C(z) = 0$ 。这样, 可由(1)式获得:

$$C(z) = C_0^* \cdot e^{\alpha z} \quad (2)$$

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

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

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

$$P = 0; a = -\left(\frac{\lambda}{D}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

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

当 P 为正时,该点发生沉积;当 P 为负时,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^[12]。

3.2 场次降雨事件侵蚀速率计算模型

Walling 等建立了基于 ^7Be 初始剖面分布特征基础上的定量模型^[12-14]。该模型假设 ^7Be 在表层土壤剖面中呈指数型分布:

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

式中: x ——自土表算起的某一深度质量 (kg/m^2);
 $C_{\text{Be}}(x)$ ——深度处的 ^7Be 初始活度 (Bq/kg);
 $C_{\text{Be}}(0)$ ——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 $0-h_0$ 深度范围内。 h_0 值越大, ^7Be 的剖面最大分布深度越深。

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

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

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

$$\begin{aligned} A_{\text{Be}}(x) &= \int_0^{\infty} C_{\text{Be}}(y) dy = C_{\text{Be}} h_0 e^{-x/h_0} \\ &= A_{\text{Be,ref}} e^{-x/h_0} \end{aligned} \quad (9)$$

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 $h (\text{kg}/\text{m}^2)$ 为土壤侵蚀的质量厚度,且 $x = h = R_{\text{Be}}$, 土壤侵蚀速率 $R_{\text{Be}} (\text{kg}/\text{m}^2)$ 可由下式求得:

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

如果采样点的 ^7Be 总活度高于基准值,该点发生了净沉积。沉积速率 $R_{\text{Be}} (\text{kg}/\text{m}^2)$ 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 $C_{\text{Be},d} (\text{kg}/\text{m}^2)$ 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:

$$R'_{\text{Be}} = (A_{\text{Be}} - A_{\text{Be,ref}}) / C_{\text{Be},d} \quad (11)$$

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 $C_{\text{Be},d} (\text{Bq}/\text{kg})$, 则有

$$C_{\text{Be},d} = \frac{1}{\int_s R_{\text{Be}} dS} \int_s C_{\text{Be},e} R_{\text{Be}} dS \quad (12)$$

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:

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

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的基础上,建立适用范围更广的定量模型^[13-14]。

4 结 论

^7Be 与其它侵蚀核素示踪法相似,具有不受场地限制、简便快捷、省时省力等特点,重要的是 ^7Be 能提供短时期季节性或单次降水事件的水土流失信息,为水土流失监测和土壤侵蚀模型试验研究提供重要信息数据。与 ^{137}Cs 相比, ^7Be 土壤侵蚀计算模型无需众多的假设前提,加之其背景值更容易准确的确定,因而其估算精度较高。对工程建设的弃土弃渣水土流失的监测,不用建立把口站或径流小区,只须在雨季采一次样,或雨季(单次降雨)前后各采集一次样品,就可精确估算出其水土流失量。

[参 考 文 献]

- [1] 刘震. 水土保持监测技术[M]. 北京: 中国大地出版社, 2004.
- [2] 李文银, 王治国, 蔡继清. 工矿区水土保持[M]. 北京: 科

- 学出版社, 1996. 28—29.
- [3] 冷疏影, 冯仁国, 李锐, 刘宝元, 等. 土壤侵蚀与水土保持科学重点研究领域与问题[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 1—6.
- [4] 蔡其华. 维护健康长江, 促进人水和谐[J]. 人民长江, 2005, 36(3): 1—4.
- [5] Mitchell J K, Moldenhauer W C, Gustafson D D. Erodibility of selected reclaimed surface mined soils[J]. Transactions of ASAE, 1983, 26(5): 1413—1421.
- [6] 叶翠玲, 许兆义, 董瑞树, 等. USLE 用于估算工程建设项目水土流失量的讨论[J]. 中国水土保持, 2001(12): 29—30.
- [7] 王文龙, 李占斌, 李鹏, 等. 神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究[J]. 水土保持学报, 2004, 20(3): 68—71.
- [8] 李智广, 曾大林. 开发建设项目土壤流失量预测方法初探[J]. 中国水土保持, 2001(4): 24—26.
- [9] Walling D E, He Q, Quine T A. Use of caesium-137 and lead-210 as tracers in soil erosion investigations[J]. In Tracer Technologies for Hydrological Systems, IAHS Publ, 1995, 229: 163—172.
- [10] Zapata F. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides[M]. Dordrecht/ Boston/ London: Kluwer academic publishers, 2002. 32—35.
- [11] 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.
- [12] Walling D E, He Q P, Blake W. Use of and ⁷Be and ¹³⁷Cs measurement to document short and medium-term rates of water-induced soil erosion on agricultural land[J]. Water Resource Research, 1999, 35(2): 3865—3874.
- [13] 唐翔宇, 杨浩, 李仁英, 等. ⁷Be 在土壤侵蚀示踪中的应用研究进展[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 520—525.
- [14] 丁晋利, 郑粉莉. ⁷Be 示踪技术在土壤侵蚀研究中的应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(4): 121—123.
- [15] 张信宝, 冯明义, 张一云, 等. 川中丘陵区⁷Be 在土壤中的分布和季节性本底值[J]. 核技术, 2004, 27(11): 873—876.

(上接第27页)

(4) 从1992年与2000年的土壤侵蚀解译图叠置看, 兴国县土壤侵蚀的各个等级都有明显降低; 从土壤侵蚀强度等级的变化看, 有66%左右的侵蚀面积其侵蚀等级保持不变。在变化的部分, 又以变化一个等级的面积为主, 说明兴国县的土壤侵蚀已呈现出明显的减弱趋势。

(5) 不难看出, 上述方法, 尽管在野外勘查的基础上, 结合3S技术进行土壤侵蚀动态监测, 但在确定土壤侵蚀强度时, 显得理由不充分, 还是以定性为主。因此定量监测土壤侵蚀是研究方向。尽管定量监测土壤侵蚀在理论上已经比较成熟, 可在实际应用中还是很难, 特别在区域尺度范围内。因此, 建立适合我国南方丘陵区不同尺度的土壤侵蚀预测模型, 是实现土壤侵蚀定量化的前提。

[参 考 文 献]

- [1] 史德明, 等. 应用遥感技术监测土壤侵蚀动态的研究[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 48—59.
- [2] 张佳华, 等. 江西兴国土壤侵蚀动态的研究[J]. 北京林业大学学报, 2004, 26(1): 53—56.
- [3] 梁音, 等. 江西省兴国县土壤侵蚀遥感动态监测即演变规律[J]. 南昌水专学报, 1995, 14(增刊): 40—45.
- [4] 李德成, 等. 应用卫星遥感技术监测兴国县水土流失动态演变[J]. 中国水土保持, 1998, 19(2): 29—32.
- [5] 潘剑君, 等. 江西省兴国县、余江县土壤侵蚀时空变化研究[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 58—64.
- [6] 王库, 等. 基于景观格局分析的兴国县土壤侵蚀演变研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(4): 94—98.
- [7] 史德明, 梁音. 我国脆弱生态环境的评估与保护[J]. 水土保持学报, 2002, 16(1): 6—10.
- [8] Mathew J, Cohena Keith D, Shepherdb Markus G. Walsh, Empirical reformulation of the universal soil loss equation for erosion risk assessment in a tropical watershed[J]. Geoderma, 2005, 124: 235—252.
- [9] Sunar F, Musaoglu N. Merging multiresolution SPOT P and landsat TM data: the effects and advantages[J]. INT J Remote Sensing, 1998, 19(2): 219—224.