

# 红砂岩母质红壤侵蚀作用的 $^{137}\text{Cs}$ 法初步研究

唐翔宇, 杨浩, 赵其国, 李仁英

(中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008)

**摘要:** 不合理的开发和利用所导致植被覆盖的破坏严重, 致使红砂岩母质地区长期以来遭受到强烈的土壤侵蚀。采用 $^{137}\text{Cs}$ 技术, 研究红砂岩发育的红壤典型小流域的土壤侵蚀作用。结果表明: 该流域的 $^{137}\text{Cs}$ 基准值为 $2\ 014\ \text{Bq}\ \text{m}^{-2}$ ; 对于非耕作土壤而言,  $^{137}\text{Cs}$ 在土壤剖面中呈峰值型分布, 最大分布深度约为15 cm; 对于耕作土壤而言, 则在耕作层内呈均一分布, 耕作层以下则急剧下降。典型断面研究表明, 上坡部坡耕地的侵蚀作用强于下坡部, 且山顶面积较小的耕地的侵蚀作用比面积较大的坡顶耕地要大。总体而言, 坡耕地的流失是相当严重的。

**关键词:**  $^{137}\text{Cs}$ 法; 红砂岩; 土壤侵蚀; 红壤

中图分类号: S 157.1; TL99

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2002)01-0121-05

## Preliminary Estimate of Soil Erosion Rate on Red Soil Developed From Red Sandstone Using $^{137}\text{Cs}$ Measurements

TANG Xiang-yu, YANG Hao, ZHAO Qi-guo, LI Ren-ying

(Institute of Soil Science, the Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** The destruction of vegetational cover in the region developed from red sandstone results in severe soil erosion.  $^{137}\text{Cs}$  technique was used to investigate soil erosion occurred within a small catchment developed from red sandstone. The local  $^{137}\text{Cs}$  reference inventory was determined to be  $2\ 014\ \text{Bq}\ \text{m}^{-2}$ .  $^{137}\text{Cs}$  exhibits peak vertical distribution in uncultivated soils, with a maximum vertical distribution depth less than 15 cm. However, it is uniformly distributed within the plough layer, and decreases sharply in activity below the plough layer. Typical transects case study shows that soil erosion rates on the upper sloping farmland is usually higher than that on the lower sloping farmland, and soil loss from cultivated land on the crest with a relatively small total area is usually higher than that with a relatively large total area. Generally, soil erosion on the sloping farmland is severe.

**Key words:**  $^{137}\text{Cs}$  technique; Haplic red soil; soil erosion; red soil

土壤侵蚀是全球面临的重要环境问题之一<sup>[1]</sup>。土壤侵蚀不仅导致土壤质量的下降, 而且还会造成水体污染、富营养化、河床抬升、加速侵蚀区生态系统的功能失调等后果。在长期地质作用的基础上, 由于不合理的开发和利用导致植被覆盖破坏严重, 致使红砂岩地区长期以来遭受到强烈的土壤侵蚀, 土壤质量严重退化。在严重侵蚀区, 表土基本流失殆尽, 地表呈现荒漠化景观, 生态环境恶化。有效控制

水土流失已成为改善侵蚀区生态环境质量的关键。对于红砂岩地区土壤侵蚀模数的准确测定, 可为该地区的土壤侵蚀基本状况评估和水土流失防治提供重要的科学依据。

$^{137}\text{Cs}$ 作为一种人工放射性核素, 是20世纪50年代至70年代大气热核试验以及1986年前苏联切尔诺贝利核电站事故的副产物, 其半衰期为30.17年。 $^{137}\text{Cs}$ 进入大气同温层后随着大气环流运动, 通

<sup>1</sup> 收稿日期: 2001-11-20

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目(G1999011801); 国家自然科学基金(49973027); 中国科学院院长特别资助基金和中国科学院红壤生态实验站基金资助项目。

作者简介: 唐翔宇, 男, (1972-), 现为中国科学院南京土壤研究所在读博士生, 主要从事土壤侵蚀示踪研究。

过干沉降和湿沉降作用到达地表,进而快速被强烈吸附于土壤黏土矿物颗粒和有机质上,而且,化学迁移和作物吸收所导致的土壤<sup>137</sup>Cs损失可忽略不计<sup>[2]</sup>。Rogowski和Tamura<sup>[3]</sup>曾指出,<sup>137</sup>Cs在土壤中的再分配和侵蚀小区土壤的运移之间呈紧密相关。因此,土壤侵蚀和沉积作用是土壤中<sup>137</sup>Cs的地表迁移和再分配作用的主要原因,这正是<sup>137</sup>Cs能示踪土壤侵蚀作用的基本理论依据。

土壤侵蚀作用的<sup>137</sup>Cs示踪法研究在理论和技术上日益成熟,其侵蚀估算结果的可靠性因定量模型的改进而得以大大提高。<sup>137</sup>Cs示踪技术具有传统研究法的结果所不可比拟的诸多优点,特别反映在研究中长期的土壤侵蚀或沉积作用的强度和空间特征上<sup>[4,5]</sup>。

土壤侵蚀作用的<sup>137</sup>Cs示踪研究在中国的起步较晚。张信宝等在我国西北黄土地区及四川盐亭进行了这方面的开拓性研究,在建模和小流域应用研究方面均取得了许多有益的成果<sup>[6~11]</sup>。白占国和万国江等也将<sup>137</sup>Cs示踪法研究贵州石灰岩地区的土壤侵蚀作用<sup>[12]</sup>。唐翔宇和杨浩等则首次在我国第四纪红色黏土发育的红壤地区,明确了<sup>137</sup>Cs在非耕作土壤和耕作土壤剖面中的分布特征,并应用<sup>137</sup>Cs示踪技术对非耕作土壤和耕作土壤的侵蚀作用的强度和空间特征进行了初步研究,取得了一些重要成果<sup>[13]</sup>。

本文在明确<sup>137</sup>Cs的土壤剖面分布特征的基础上,采用<sup>137</sup>Cs示踪技术研究红砂岩发育的红壤典型小流域的土壤侵蚀作用,以探讨<sup>137</sup>Cs技术在红砂岩地区土壤侵蚀研究中的适用性。

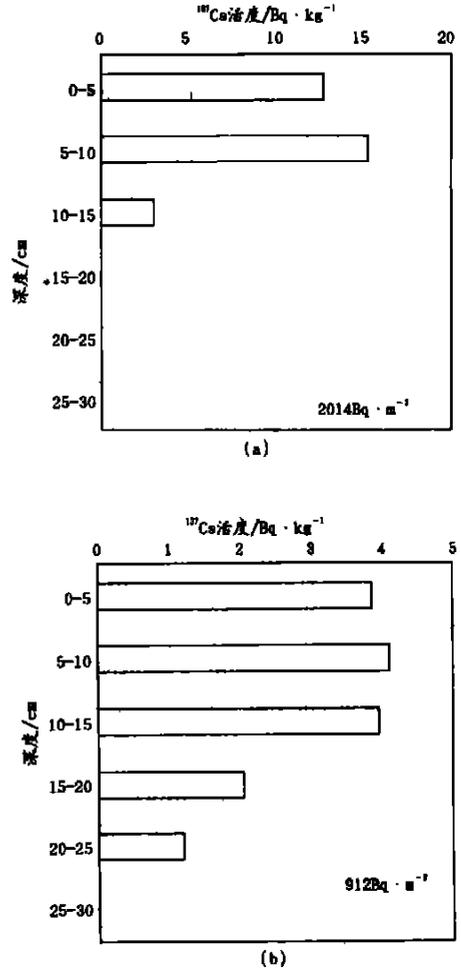
### 1 研究区概况

本研究区位于江西省余江县刘垦三分场(116° 53 E, 28 14 N),属亚热带季风气候,平均气温为17.8,年均降雨量约为1 795 mm,50%左右的年降雨分布在4~6月间。该研究区为低丘缓坡地形,坡度在3~15之间,海拔为35~60 m。成土母质为红砂岩,土壤类型为红壤,富含铁氧化物,黏土矿物以高岭石为主。土壤中的有机质、有效磷和钾的含量都较低,尤其以有效磷的缺乏最为严重,因此,土壤的生产力相当低。该研究区非耕作土壤的植被覆盖以灌木为主。人类的高强度开发和干扰导致该研究区的片蚀较为严重。

### 2 样品采集

在研究区内选取不同的地貌部位,布设土壤采

样点,并选取两条典型纵断面进行研究。采用内径为9 cm的采样钻进行采样。采样深度一般为30 cm,每5 cm一层采到30 cm或35 cm深。



(a 为非耕作土;b 为耕作土)

图 1 <sup>137</sup>Cs 的典型土壤剖面分布特征

### 3 样品分析

土样风干后,研磨过2 mm筛,去除植物残体和粗颗粒,在110下烘至恒重。准确称取土样100 g左右,置于塑料容器中,采用美国ORTEC公司生产的配有多通道分析仪的高纯锗(谱仪进行测试,计算其662 keV(射线的全峰面积,求得土样的<sup>137</sup>Cs活度。该r谱仪的主要指标为:对<sup>60</sup>Co 1.33 MeV的能量分辨率为2.10 keV,峰康比大于48 1,相对探测效率为25%。每个样品的数据积累时间为14 400 s(实时)。

## 4 结果分析

### 4.1 $^{137}\text{Cs}$ 基准值的确定

基准点的选取对于确保 $^{137}\text{Cs}$  基准值的可靠性相当重要, 直接影响土壤侵蚀模数计算结果的准确性和可靠性。一般而言, 基准点应在历史上(40 余年来)基本未受到侵蚀或沉积<sup>[14]</sup>。国内外研究中一般把未受到侵蚀或沉积的大面积的平坦山顶和非耕作平地选作基准点。本研究表明, 大面积的平坦山顶往往被开发用作耕地, 其 $^{137}\text{Cs}$  总量相当低, 甚至低于检测限, 这一点是与国内外报道迥然不同的, 这可能与山顶仅有侵蚀输出而无输入、耕作土抗蚀性相对较差和溅蚀过程等因素有关。因此, 本研究选用平坦谷底的灌木林采样点 U1 作为基准点, 实地踏勘表明, 该地点基本未受坡面径流的影响。通过采样分析, 确定 $^{137}\text{Cs}$  基准值为  $2\ 014\ \text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

### 4.2 $^{137}\text{Cs}$ 剖面分布特征

总的来说, $^{137}\text{Cs}$  在红砂岩发育的非耕作土壤中的剖面分布深度并不深, 一般在 15 cm 以内。土壤剖面中的 $^{137}\text{Cs}$  呈峰值型分布, 90% 的土壤 $^{137}\text{Cs}$  集中在表层 10 cm 以内(图 1a)。

对于耕作土壤而言, 长期的耕作活动导致耕作土和非耕作土在土壤质地和其它土壤性质(如土壤容重和有机质含量等)上产生明显的差异, 加之耕作活动在耕作层内的均一化作用, 从而使 $^{137}\text{Cs}$  在耕作层内则表现出典型的均一分布特征, 其剖面最大分布深度比非耕作土壤深, 达到 30 cm 左右(图 1b)。

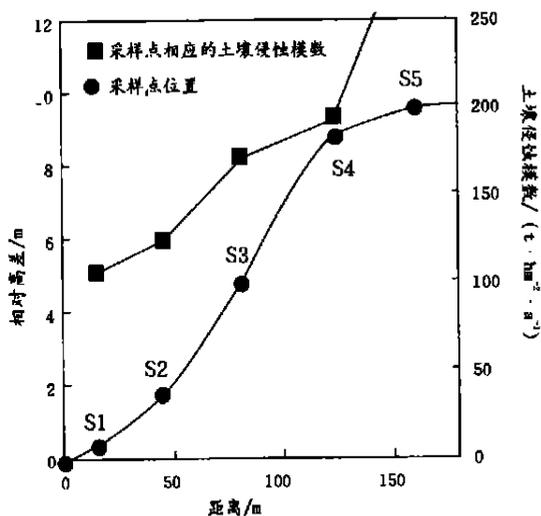


图 2 纵断面 A 的采样点分布及相应的土壤侵蚀模数

### 4.3 土壤侵蚀模数的计算

现有的诸多 $^{137}\text{Cs}$  法土壤侵蚀模数定量估算模型, 一般可分为经验模型和理论模型两大类。经验模型是通过现有的侵蚀小区数据和土壤 $^{137}\text{Cs}$  损失量进行统计学分析, 从而得出土壤 $^{137}\text{Cs}$  损失率与土壤侵蚀模数的简单经验函数关系。经验模型因其所具有的一些明显的局限性, 而越来越少被应用于侵蚀估算。理论模型则是在对土壤侵蚀机理进行理论分析的基础上, 综合考虑影响两者定量关系的诸多重要因素, 从而建立起的土壤 $^{137}\text{Cs}$  损失率与土壤侵蚀模数之间的定量关系。适用于耕作土的估算模型主要有比例模型、重量模型和质量平衡模型等; 适用于非耕作土的估算模型有剖面分布模型和迁移扩散模型等<sup>[4, 5, 15]</sup>。杨浩等则在质量平衡基本模型的基础上, 引入了侵蚀常数  $\lambda$ , 综合考虑了 $^{137}\text{Cs}$  的年沉降分量、地表富集层(对耕作土而言)、土壤剖面分布特征(对非耕作土而言)和 $^{137}\text{Cs}$  的放射性衰减系数等影响定量关系的因素, 分别建立了适用于耕作土壤和非耕作土壤的定量模型, 使模型计算结果的可靠性得以较大的提高<sup>[16~21]</sup>。

本研究采用杨浩等建立的分别适用于非耕作土和耕作土的不同定量模型进行土壤侵蚀模数的估算。

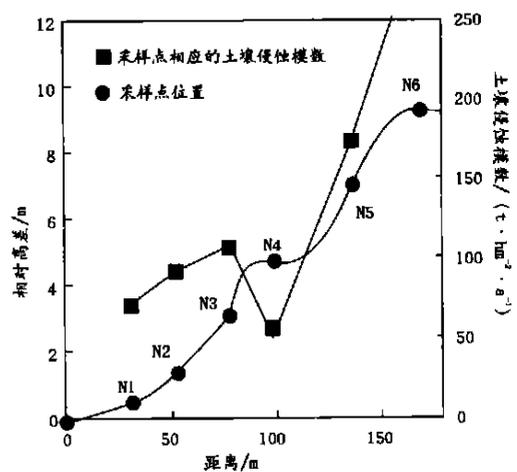


图 3 纵断面 B 的采样点分布及相应的土壤侵蚀模数

4.3.1 非耕作土壤 首先, 对研究区内非耕作土壤的 $^{137}\text{Cs}$  剖面分布特征进行统计回归分析, 求得土壤 $^{137}\text{Cs}$  剖面分布函数为:

$$C_s = 46.748 \left[ 1 - (0.988 - z/0.15)^{2.331} \right] (0.988 - z/0.15)^{1.331} \quad (1)$$

式中:  $C_s$  ——土壤的 $^{137}\text{Cs}$  活度( $\text{Bq kg}^{-1}$ );  $z$  ——深度(m)。

然后, 在质量平衡基本方程的基础上, 考虑 $^{137}\text{Cs}$  的年沉降分量和衰减常数, 采用数值法或图象法, 求

得侵蚀常数  $\lambda^{[16-18]}$ 。最后,将  $\lambda$  代入方程(2),即可求得土壤侵蚀模数:

$$y = -10000D \ln(1 - \lambda) \quad (2)$$

其中:  $y$ ——土壤侵蚀模数  $t/(hm^2 \cdot a)$ ;  $D$ ——土壤容重 ( $kg/m^3$ ),非耕作土壤取 1.3,而耕作土壤取 1.1;  $\lambda$  为侵蚀常数,即土壤中  $^{137}Cs$  的年损失量占土壤  $^{137}Cs$  总量的比例。

4.3.2 耕作土壤 对于耕作土壤,为了计算的简便,本研究采用杨浩等建立的定量模型<sup>[19-22]</sup>,并假设  $^{137}Cs$  在耕作层内因充分混合而呈均一分布,忽略  $^{137}Cs$  地表富集层的影响。有关不同母质发育的红壤的  $^{137}Cs$  地表富集层的特征及对侵蚀估算结果的修正,将在后续的研究报告中加以系统阐述。

在质量平衡基本方程的基础上,考虑  $^{137}Cs$  的年沉降分量和衰减常数,采用数值法或图象法,求得年土壤侵蚀厚度  $h$  (单位:  $m$ )。最后,将  $h$  代入方程<sup>[3]</sup>,即可求得土壤侵蚀模数:

$$y = h \times D \times 10000 \quad (3)$$

#### 4.4 典型纵断面研究

本文选取两条典型纵断面,应用  $^{137}Cs$  法进行非耕作土壤和耕作土壤的侵蚀研究,以探索  $^{137}Cs$  法在红砂岩发育的红壤地区的适用性(采样点概况见表 1)。

表 1 采样点概况

纵断面	采样点 代号	土地利用方式	地貌部位	坡度 / °	$^{137}Cs$ 含量 /( $Bq \cdot m^{-2}$ )
断面 A	S1	坡耕地	下坡	5.5	227
	S2	坡耕地	中坡	7	163
	S3	坡耕地	中坡	9	74
	S4	坡耕地	上坡	6	52
	S5	坡耕地	坡顶	0	0
断面 B	N1	坡耕地	下坡	4	451
	N2	坡耕地	中坡	6.5	292
	N3	坡耕地	中坡	8	221
	N4	灌木林	中坡	1	1542
	N5	坡耕地	上坡	7	72
	N6	坡耕地	坡顶	0	0
	C1	旱作耕地	坡顶	0	912
U1	灌木林	谷底	0	2014	

4.4.1 纵断面 A 由图 2 可见,土壤  $^{137}Cs$  总量以坡顶采样点 S5 最低,这说明山顶遭受的侵蚀最为严重,这可能与山顶仅有土壤的侵蚀损失,而无泥沙输入,溅蚀作用较强,以及因土壤黏粒含量相对较低(20%左右)而导致的抗蚀性相对较差有关。土壤  $^{137}Cs$  总量由坡顶向下有上升的趋势,土壤侵蚀模数则有降低的趋势。从总体来看,纵断面 A 的坡耕地的土壤侵蚀模数总体大于  $100 t/(hm^2 \cdot a)$ ,这表明,坡

致谢:本工作得到南京大学城市与资源学系濮励杰教授的大力支持和硕士生朱振华的帮助,谨表谢意。

耕地的开发利用和开发在该地区造成了严重的土壤侵蚀。

4.4.2 纵断面 B 由图 3 可见,与纵断面 A 相比,纵断面 B 坡中的灌木丛地平台有效地减轻了坡下部坡耕地的侵蚀作用,因此,坡中的灌木平台的存在或构建能有效地减缓整个坡面,特别是坡下部耕地的侵蚀强度,这对坡耕地的水土保持工作是颇具意义的。

采样点 S5、N6 和 C1 所代表的坡顶耕地面积分别约为 120、150 和 1 000  $m^2$ 。对于面积较小的 S5 和 N6 而言,土壤中  $^{137}Cs$  低于检测限,侵蚀相当严重;而对于面积较大的 C1 而言,其土壤侵蚀模数相对较小,为 36.9  $t/(hm^2 \cdot a)$ 。

## 5 结论与讨论

由于本研究所选取的研究在红砂岩发育的红壤地区具有较好的代表性,因此,本研究的结果对认识红壤地区水土流失状况具有重要意义,并能为水土保持决策提供可靠的基础数据。

(1) 由于该研究区内缺乏未受到侵蚀或沉积的大面积的非耕作平坦山顶,因此,本研究选用 40 余年来基本未遭受侵蚀或沉积的谷底灌木林地作为基准点,测得  $^{137}Cs$  基准值为 2 014  $Bq \cdot m^{-2}$ 。这与第四纪红色黏土小流域所获得的基准值 2 107  $Bq \cdot m^{-2}$  较为接近<sup>[13]</sup>。

(2) 对于非耕作红壤而言,  $^{137}Cs$  在土壤剖面中呈峰值型分布。一般而言,该研究区内非耕作土的  $^{137}Cs$  最大分布深度通常在 15 cm 以内,而  $^{137}Cs$  在耕作红壤中的剖面分布深度因耕作作用而明显比非耕作土深,达到 30 cm 左右。

(3) 典型纵断面研究表明,坡耕地的侵蚀模数相当大。坡中的灌木丛平台的平台有助于减轻整个坡面特别是坡下部的侵蚀强度,这一结果对于水土保持工作颇具意义。

(4) 与第四纪红色黏土发育的红壤相比,红砂岩发育的红壤的黏粒含量相对较低,约为 20%,而第四红土发育的红壤一般大于 40%,因此,土壤的抗蚀性相对较差,这尤其表现在相似坡度坡中的坡耕地上。红砂岩发育的红壤的侵蚀模数明显大于第四纪红色黏土发育的红壤,前者大于 120  $t/(hm^2 \cdot a)$ ,而后者小于 100  $t/(hm^2 \cdot a)$ <sup>[13]</sup>。因此,该地区应减少坡耕地的开发,并对现有的坡耕地采取有效的水土保持措施。

## 参考文献:

- [1] 周启星, 黄国宏. 环境生物地球化学及全球环境变化[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 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(2): 215-233.
- [3] Rogowski A S, Tamura T. Movement of cesium-137 by run off, erosion and infiltration on the alluvial Captina silt loam[J]. Health Physics, 1965, 11: 1333-1340.
- [4] Walling D E, He Q. Improvement models for estimating soil erosion rates from cesium-137 measurements[J]. J Environ Qual, 1999, 28(2): 611-622.
- [5] 唐翔宇, 杨浩, 赵其国, 等. <sup>137</sup>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, 15(5): 576-582.
- [6] Zhang X B, Higgitt D L, Walling D E. A preliminary assessment of the potential for using caesium-137 to estimate rates of soil erosion in the Loess Plateau of China[J]. Hydrol Sci J, 1990, 35: 267-276.
- [7] Zhang X B, Li S, Quine T A, Walling D E. The effects of tillage on estimates of erosion rate on cultivated soils using <sup>137</sup>Cs measurements[J]. Chinese Sci Bull, 1993, 38: 2072-2076.
- [8] Zhang X B, Quine, T A, Walling D E, et al. Application of the caesium-137 technique in a study of soil erosion on gully slopes in a yuan area of the Loess Plateau near Xinfen, Gansu Province, China[J]. Geogr Ann, 1994, 76A: 103-120.
- [9] Zhang X B, Walling D E, Quine T A, et al. Use of reservoir deposits and caesium-137 measurements to investigate the erosional response of a small drainage basin in the rolling loess plateau region of China[J]. Land Degrad Develop, 1997, 8: 1-16.
- [10] Zhang X B, Quine T A, Walling D E. Soil erosion rates on sloping cultivated land on the Loess Plateau near Ansai, Shanxi Province, China: An investigation using <sup>137</sup>Cs and rill measurements[J]. Hydrol Processes, 1998, 12: 171-189.
- [11] Zhang X B, Walling D E, He Q. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using caesium-137 measurements[J]. Hydrol Sci J, 1999, 44: 33-45.
- [12] Bai Z G, Wan G J, Wang C S, et al. Geochemical speciation of soil <sup>7</sup>Be, <sup>137</sup>Cs, <sup>226</sup>Ra and <sup>228</sup>Ra as tracers to particle transport[J]. Pedosphere, 1997, 7: 263-268.
- [13] 唐翔宇, 杨浩, 曹慧, 等. <sup>137</sup>Cs 法估算南方红壤地区土壤侵蚀作用的初步研究[J]. 水土保持学报, 2001, 15(3).
- [14] Campbell B L, Loughran R J, Elliott G L. A method for determining sediment budgets using caesium-137[A]. In: M. P. Bordas and D. E. Walling (Editors), Sediment Budget, Proceedings of the Porto Alegre Symposium[C]. IASH Publication no 174, 1988, 171-180.
- [15] Walling D E, Quine T A. Calibration of caesium-137 measurements to provide quantitative erosion rate data[J]. Land Degrad Rehab, 1990, 2: 161-172.
- [16] Yang H, Chang Q, Du M Y, et al. An estimating model of soil erosion rate using <sup>137</sup>Cs in soil profile for uncultivated soil[A]. In: Proceedings of MODSIM97 (International Congress on Modelling and Simulation) [C]. Hobart, Modelling and Simulation Society of Australia Inc., 1997, 627-632.
- [17] Yang H, Chang Q, Du M Y, et al. T. Quantitative model of soil erosion rate using <sup>137</sup>Cs for uncultivated soil[J]. Soil Sci., 1998a, 163: 248-257.
- [18] Yang H, Du M Y, Chang Q, et al. Quantitative model for estimating soil erosion rate using <sup>137</sup>Cs[J]. Pedosphere, 1998b, 8: 211-220.
- [19] 杨浩, 杜明远, 赵其国, 等. 基于<sup>137</sup>Cs 地表富集作用的土壤侵蚀速率的定量模型[J]. 土壤侵蚀和水土保持学报[J], 1999, 5(3): 42-48.
- [20] Yang H, Du M Y, Zhao Q G, et al. A quantitative model for estimating mean annual soil loss in cultivated land using <sup>137</sup>Cs measurements[J]. Soil Sci Plant Nutri, 2000, 46: 69-79.
- [21] 杨浩, 杜明远, 赵其国, 等. 利用<sup>137</sup>Cs 示踪农业耕作土壤侵蚀速率的定量模型[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 296-305.