

土壤侵蚀调查中的航空 ^{137}Cs 测量方法初探

韦中亚¹, 徐素宁², 吴景双², 邬伦¹

(1 北京大学城市环境学系 100871; 2 核工业航测遥感中心 050002)

摘要: 放射性核素示踪法是土壤侵蚀研究的一种重要方法。通过对土壤侵蚀放射性示踪测量方法国内外研究进展的介绍和分析, 提出基于航空放射性测量的土壤侵蚀定量监测方法, 并介绍了测量系统的组成、数据处理流程、放射性元素 ^{137}Cs 含量的计算方法以及土壤侵蚀模数的相关计算模型, 为土壤侵蚀调查工作提供了一套高效、快捷方案, 并指出当前航空能谱土壤侵蚀调查应用和研究的重点。

关键词: 土壤侵蚀; 航空测量; ^{137}Cs ; 放射性能谱

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2001)02-0045-05

Primary Discussion on Soil Erosion Investigation Using Aerial Radioactive ^{137}Cs Survey Approach

WEI Zhong-ya¹, XU Su-ning², WU Jing-shuang², WU Lun¹

(1 Department of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2 Remote Sensing Center for Aerial Survey, Ministry of Nuclear Industry, 050002, China)

Abstract: It is an important method to investigate soil erosion that using radionuclides tracks down. On the basis of situation of this study in the world, a method of ARS-based (ARS airborne radioactive survey) is provided to study soil erosion quantitatively, and meanwhile a series of procedure and model related with this method, such as the constitute of the survey system, the flow of data processing, the algorithm of ^{137}Cs consistency, and the calculating model of soil erosion modulus, is presented. The current emphasis of the study and application is pointed out. It is an efficient, speedy way in the field of soil erosion study.

Key words: soil erosion; airborne survey; ^{137}Cs ; radioactive spectrum

土壤侵蚀是一个复杂的自然和人文过程, 受下垫面状况、气候及人为扰动等诸多条件的控制, 其中下垫面状况又受基底岩性、地形坡度、土地覆盖类型等众多因素的影响。其调查方法主要有定性调查法、工程实验法、遥感调查法以及放射性示踪法等。我国幅员辽阔, 而又处于发展中国家, 多年来, 资源环境遭到不同程度的破坏, 土壤侵蚀状况以及土地退化程度的研究已迫在眉睫。为了更好地利用土地, 治理环境, 保障可持续发展, 水利部、国家计委及相关部门已制定了我国土壤侵蚀治理的中长期规划。当前,

研究快速、高效进行大范围的土壤侵蚀调查方法和确定大江大河强烈侵蚀堆积区的产沙及其泥沙来源和运移规律是控制和治理土壤侵蚀的科学基础, 对政府宏观决策和水保部门制定水土保持治理方案意义重大。

我们在这里要讨论的是利用航空能谱 ^{137}Cs 测量的方法对土壤侵蚀状况进行快速大面积调查。该设计方案具有速度快、覆盖面广的特点, 适合于开展全国性或区域性大面积土壤侵蚀现状和侵蚀速率的调查和大区域土壤侵蚀规律的研究。

* 收稿日期: 2001-03-21

作者简介: 韦中亚(1969-), 男, 博士生, 从事地理信息系统方法研究与开发。

1 研究背景概述

放射性核素示踪法是采用多种化学分析方法测量样品中的放射性元素浓度,根据不同部位或不同地段土壤中的放射性元素的分布特征及含量差异,来判测泥沙来源与侵蚀强度分布^[1]。根据所测核素的来源可把核素示踪技术分为天然放射性核素示踪法和人工施放核素示踪法两大类。

一般地,天然放射性核素示踪法所监测的天然放射性核素有二种来源,其一,来源于大气沉降的放射性核素(如 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb),其二是成土母岩中的天然放射性核素(如 ^{226}Ra 、 ^{232}Th)。 ^{137}Cs 是核爆炸产生的放射性核素, ^{210}Pb 是从大气中沉降下来的放射性核素,它们降落到地表后,随着泥沙的侵蚀、输移和沉积而运动,所以可用作土壤侵蚀、泥沙输移和沉积研究的示踪核素^[1~3]。 ^{226}Ra 是土壤中铀系衰变的产物, ^{232}Th 是土壤中原有的,它们都是存在于土壤中的天然放射性核素。它们在土壤剖面或不同母质土壤中的含量分异,可作为不同层次或不同地区侵蚀土壤的示踪核素^[1]。

人工施放核素示踪法则是由人工根据区域土壤侵蚀研究的需要,在一定区域内施放一定剂量的人工核素,通过对降雨和径流作用中放射性核素的观测,研究土壤运移轨迹和土壤侵蚀机理。一般可人工施放的放射性核素包括 ^{56}Mn 、 ^{134}Cs 等。由于这种方法可人为选择核素种类和施放部位,其目的性强,比利用大气沉降或土壤中天然放射性核素测量法灵活^[1],适用于侵蚀强度的分布及小流域的产沙来源等定量研究。

20世纪60年代以来,国内外放射性核素示踪法应用的研究非常活跃。国外的研究始于60年代初的孟泽尔(Menzel)^[5]。孟泽尔等人首先使用放射性核素沉降研究土壤侵蚀,为土壤侵蚀研究开辟了一条新路子,同时也为核示踪技术应用拓宽了应用领域。随着土壤侵蚀定量研究的开展,核示踪技术受到全世界各国科学家的广泛重视,其应用范围愈来愈广。到了70年代初,美国、瑞士、朝鲜、以色列等国专家们利用大气沉降的核素研究农林系统的土壤侵蚀沉积分布,80年代美国诺斯(Knaus)等人利用稳定性同位素示踪研究沼泽地的土壤侵蚀沉积速率,90年代以来,澳大利亚科学家同时利用 ^7Be 、 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 、 ^{226}Ra 、 ^{232}Th 多种核素示踪研究小流域泥沙来源。我国从80年代末开始利用核示踪技术研究土壤侵蚀,张信宝^[3]等人利用 ^{137}Cs 法研究黄土高原农耕

地的土壤侵蚀,杨明义^[6]等利用 ^{137}Cs 法研究了不同坡面土壤侵蚀运移规律,王秀玉^[2]等人利用 ^{210}Pb 法研究鄱阳湖底泥沙沉积,李小龙^[4]等人利用 ^{226}Ra 分析法研究小流域泥沙来源,白占国^[7]等人利用 ^7Be 对南方岩溶地区土壤侵蚀作了研究,马建国^[8]等人利用土壤特征元素法研究土壤中的泥沙运移轨迹。众多研究从不同侧面说明放射性核素示踪方法在土壤侵蚀调查中的应用,同时也尝试了多种核素在示踪技术中的应用。

2 问题的提出

不论采用天然放射性核素示踪法还是人工施放核素示踪法,也不论测量哪一种核素,各有其利弊:放射性核素铯(^{137}Cs)是一种核爆炸产物,它随降水沉降到地面与土壤颗粒紧密结合,难以被水淋溶,植物也很少吸收,主要随土壤颗粒和移动发生再分布^[6]。同时,放射性核素 ^{137}Cs 半衰期长,因此,核实验散落沉降到地表环境中的 ^{137}Cs 成为研究流域侵蚀的良好示踪剂^[9,11],适用于长历时的侵蚀量估算,在示踪累积性土壤侵蚀过程中显示出良好的效果。但是,核爆炸产物中的 ^{137}Cs 主要集中于表土,而有些地区由于强烈的现代侵蚀表土已侵蚀殆尽; ^{210}Pb 因在土壤中含量甚微,要求测定的条件严格且费工时,故该方法的应用受到很大限制;人工施放天然放射性核素,具有选择性大、适用性强、放射性测量灵敏度高特点,但由于放射性环境污染问题,给实际操作带来诸多不便,因而大大限制了该方法的应用范围^[1];土壤中的天然放射性核素(^{226}Ra 和 ^{232}Th)均来自于成土母质,对于区域性成土母质复杂、土壤剖面分布分异明显的地区来说,该方法是研究土壤侵蚀的有利手段,但对诸如黄土高原地区成土母质均一、元素剖面或区域分异不明显的侵蚀区,该方法则灵敏度低^[10]。

一般地,用于土壤侵蚀研究的核素示踪方法应遵循以下原则:被测核素易于测量;被测核素的含量应与土壤背景值差异明显或土壤中被测核素的背景值易于从测量值中剥离;方法的实施不应有环境危害;从实施工程的成本考虑,所用方法还应具有高效、快速和大面积适用。综合多种因素 ^{137}Cs 元素在反映土壤侵蚀过程中具有独特的优势。常规的核示踪法采用地面作业法,往往在试验小区内按水平和垂直剖面用网格法采集土样。所采集土样经风干、混合、研磨、封装、照射,再利用 γ 能谱仪测量核素浓度。常规地面作业法,由于地面工作量大,效

率难以提高, 对于小流域的研究可以适用, 对于大区域, 乃至全国土壤侵蚀调查则效率太低, 无法适用。有鉴于次, 笔者提出采用航空能谱测量的方法,

可以很好地对地表的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb、²²⁶Ra、²³²Th 等放射性核素进行同步快速大面积监测, 解决了大面积、高效率土壤侵蚀调查问题。

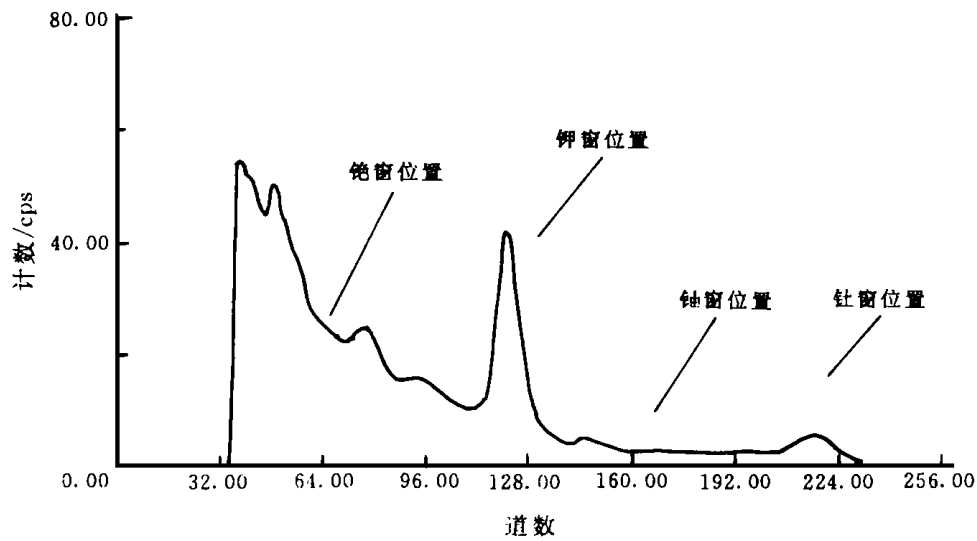


图 1 能谱测量全谱示例

3 土壤侵蚀的航空放射性调查方法

航空伽玛能谱测量是根据放射性核素具有以伽玛射线的方式向外辐射能量的特征, 利用航空伽玛能谱仪测量地球表面土壤和大气中的放射性核素的地球化学含量及其分布的一种方法^[12]。它的特点是速度快, 费用低, 适于大面积开展工作。

航空 γ 能谱测量系统所使用的高灵敏度能谱仪能探测地表射线的幅射强度。它测的是全谱(如图 1 所示), 而¹³⁷Cs 是 0.661 MeV 的单体伽玛射线谱。我们可以从全谱中通过开窗的方法求取¹³⁷Cs 的记数, 通过高度、地形等修正计算出每个测点的¹³⁷Cs 含量, 配合系统提供的三维位置数据求取地表土壤环境相关信息。

3.1 航空伽玛能谱测量系统组成

航空 γ 能谱测量系统是一套用于对天然放射性核素的伽玛射线能量进行动态监测的高精度仪器, 主要包括: 测量部分、导航定位部分和控制收录系统三部分(见图 2)。测量部分采用 GR-800 航空伽玛能谱仪, 配置柱形碘化钠晶体探测器 50 L, 即使在低背景区探测器质量差的条件下也能获得稳定峰值。控制和数据收录系统, 采用模块设计, 易于扩展, 可外扩多种外设。系统可配置多屏幕显示, 在飞行过程中, 监视测量工作进度, 以确保测量的准确性和完整性。导航定位部分采用具有实时差分能力的高精度 Novatel GPS, 可供飞行员以交互方式工作。

3.2 ¹³⁷Cs 的开窗统计分析

按航空测量标准划分将全能级信号模数转换分成 256 级(称 256 道), ¹³⁷Cs 的峰位在 52-59 道附近, ²³²Th 在 201-234 道附近。分别将相关道计数统计累加得到¹³⁷Cs 和²³²Th 等核素的计数率, 通过相关修正后可以计算相应核素的含量。

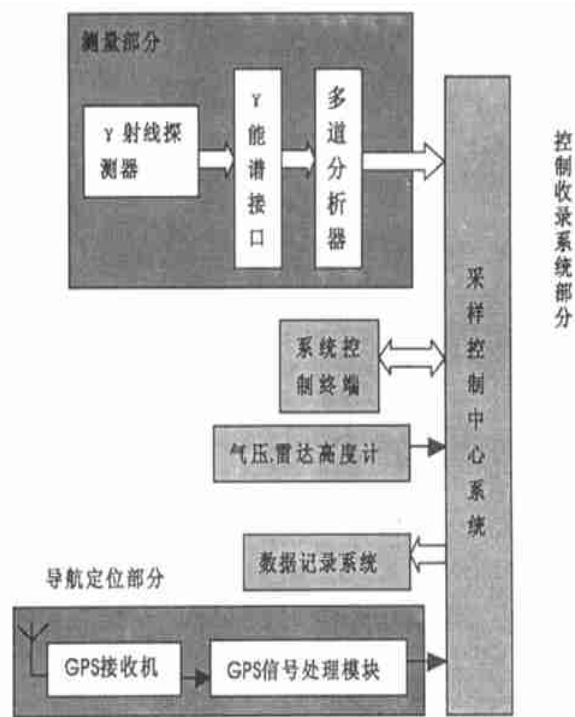


图 2 航空能谱测量系统示意图

3.3 数据修正流程

航空能谱测量数据处理是指能谱测量全谱数据的开窗统计及其修正和土壤侵蚀模型计算得到反映土壤侵蚀速率信息的过程。本节介绍核素 ^{137}Cs 测量数据的修正过程,同时也适合于其他核素的修正。

^{137}Cs 测量数据修正的内容包括:死时间修正、飞机本底和宇宙射线影响的修正、大气氡修正、康普顿散射修正和高度修正等(如图3所示)。

3.3.1 死时间修正 死时间修正是消除仪器设备的系统误差,各窗计数率的死时间修正公式如下:

$$N_c = N_r / (1 - N_r \cdot t) \quad (1)$$

式中: N_c ——修正后的计数率; N_r ——窗记录的原始计数率; N_t ——全谱总计计数率; t ——多道能谱仪处理每个脉冲的平均时间(死时间)。

3.3.2 飞机本底和宇宙射线影响修正 航空测量中使用不同的飞机和仪器,飞机的辐射本底值是不一样的,但是,对确定的一套系统其辐射本底是常数。飞机执行航空能谱测量前,飞机的本底值需要经过测量,以便在数据处理中有效地消除飞机本底的干扰。宇宙射线与纬度和高度有关,对各能量窗的影响与宇宙射线窗计数成线性关系。

3.3.3 大气氡修正 大气氡修正是对大气中的氡气衰变子体在铯、钍及其它能量窗的影响进行修正,修正的相关系数通过标准源模型校准而得。

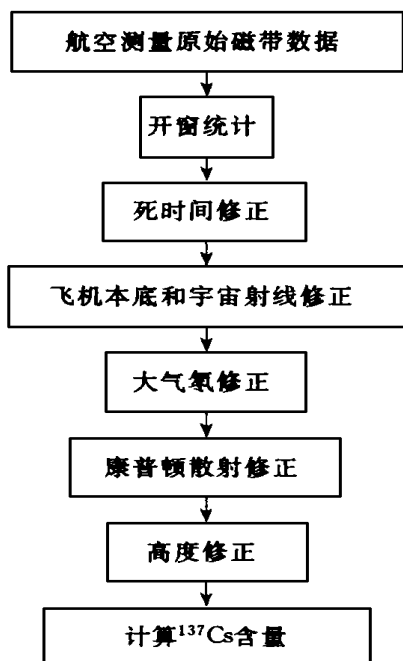


图3 数据处理流程图

3.3.4 康普顿散射修正 康普顿散射修正的目的是要剥离其它放射性核素对 ^{137}Cs 窗的贡献,通过标准模型测试得到单位钾、铀、钍浓度对铯窗的贡献

值,再以相应钾、铀、钍浓度修正铯窗计数率是当前可行的方法。

3.3.5 高度修正 以上计算所得是飞机飞行高度 ^{137}Cs 记数,为得到对应地表土壤中 ^{137}Cs 的浓度,还需将计算结果换算到地球表面的对应值。这个过程称为高度修正。

3.4 土壤侵蚀模数计算

不同侵蚀类型区和不同的土壤侵蚀动力条件, ^{137}Cs 在土层中的水平分布和垂直分布也不同,因此,用 ^{137}Cs 法计算土壤侵蚀量的计算模型也不同。目前尚没有文献研究航空测量 ^{137}Cs 法侵蚀量计算模型,现有 ^{137}Cs 法土壤侵蚀量计算公式以估算为主。下面介绍两个国内外典型计算公式。

Lowance等^[13]在估算农林系统沉积时提出公式(2):

$$\text{总沉积量}(t) = (C - Z) \cdot A / W_d \quad (2)$$

式中: C ——沉积区 ^{137}Cs 含量; Z —— ^{137}Cs 背景值(Bq/m^2); A ——沉积区面积; W_d ——沉积区 ^{137}Cs 平均浓度(Bq/kg)。

每年的沉积量由公式(3)计算:

$$\text{沉积量} S = \frac{C - Z}{(N - 1954)W_d} \cdot 10^3 (\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}) \quad (3)$$

式中: N ——采样年份。

国内周维芝等^[6]在前人的基础上根据农耕地土壤侵蚀的动力条件特点和 ^{137}Cs 的尘降期多年统计数据,作如下几点考虑和假设:(1) ^{137}Cs 在犁耕层中呈均匀分布;(2)1956~1970年是 ^{137}Cs 大量尘降期,耕层 ^{137}Cs 有输入又有流失,而1970年后无输入,只有流失;(3)某一点年平均 ^{137}Cs 流失百分数($\lambda\%$)在长时间段为一定值。提出了 ^{137}Cs 法计算农耕地侵蚀量数学模型(公式(4)):

$$X_n = \frac{Z}{15} \cdot (1 - \lambda\%)^{n-70} \frac{(1 - \lambda\%) - (1 - \lambda\%)^{16}}{1 - (1 - \lambda\%)^{16}} \quad (4)$$

式中: X_n ——第 n 年测得的土壤 ^{137}Cs 含量(Bq/m^2); Z —— ^{137}Cs 的输入背景值(Bq/m^2); $\lambda\%$ ——某一点年均 ^{137}Cs 流失百分比, $\lambda\% = h/H$ (h 为耕层流失厚度; H 为犁耕层的深度,单位 cm)。

侵蚀模数的计算公式如公式(5):

$$M = 10000 \cdot H \cdot D \cdot \lambda\% \quad (5)$$

式中: M ——侵蚀模数($\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$); H ——犁耕层的深度(cm); D 为土壤容重(g/cm^3)。

以上公式中 ^{137}Cs 背景值 Z 的观测是长期性的工作,国外Wright等^[14]对全球 ^{137}Cs 沉降作了统计。公式(4)中考虑了 ^{137}Cs 的大量尘降期和无尘,但对1985年后的苏联切尔诺贝利核电站爆炸事件^[14]的影响未考虑在内,实际应用中还应给予考虑。

4 当前研究和应用的重点

核示踪土壤侵蚀定量评价的研究需要以理论为指导, 通过实践进一步发展理论。所以生产工作是推进理论研究的动力; 理论研究必须以生产工作为基础, 对应用科学来说, 尤为重要。根据我国水土保持工作的需要和放射性能谱测量的实际情况, 近期航空能谱土壤侵蚀测量研究的迫切任务主要包括以下几个方面理论和应用的研究:

4.1 多种地貌类型对比研究

我国地貌类型完整, 对于开展多种地貌对比研究很有意义, 选择不同地貌类型和不同侵蚀类型的区域进行对比研究, 探索不同侵蚀区 ^{137}Cs 法计算模型和泥砂迁移规律是开展航空土壤侵蚀调查的理论保障。在大范围内多次至少是两次航空测量, 采用不同年代的数据, 结合土壤的一些基本信息, 进行比较分析, 得出随时间的推移土壤的流失、沉积等变化情况, 得出沙漠化进程、速度等情况。对于 ^{137}Cs 含量大于背景值的位点, 则表明其沉积显著, 其净侵蚀量即为该点的沉积量。多年来 ^{137}Cs 含量发生明显增加的位点, 则表明其沉积显著, 反之, 可以认为侵蚀严重。对比研究通过对 ^{137}Cs 变迁过程的数学模拟分析, 可重建

流域侵蚀过程, 对于重建区域污染历史也具有重要意义。

4.2 区域土壤侵蚀速率调查

目前我国已完成全国范围不同比例尺(1:25万~1:10万)的测量面积375.8万 km^2 , 累计789.2万测线公里的航空伽玛能谱测量。该资料是核工业航测遥感中心严格按照《中华人民共和国核行业标准》(EJ/T 1032—1996)近50年的航空测量结果。在多种地貌类型对比研究的基础上, 开展区域土壤航空 ^{137}Cs 法普查, 充分开发已有 ^{137}Cs 数据资料对水土保持工作具有深远意义。

4.3 侵蚀剧烈地区产沙中心的确定和大江大河产沙来源分析

铯法调查流域泥沙来源是通过不同源地表层土壤和坝库淤积泥沙 ^{137}Cs 含量的对比, 或 ^{137}Cs 浓度的多期测量值比较, 结合流域土地利用现状, 分析不同类型源地的相对来沙量来判测泥沙的来源及运移轨迹。利用大区域航空能谱测量结果, 结合一定的地面验证, 分析坝库淤泥以及大江、大河的淤积的泥砂来源, 重建古河道的发育史, 用于防砂、防洪的宏观决策意义重大。

参考文献

- [1] 李雅琦, 田均良, 刘普灵. 土壤侵蚀研究中核示踪技术的应用[J]. 中国水土保持, 1998(2).
- [2] 王秀玉, 曾而康, 万玉松, 等. 应用 ^{210}Pb 测定鄱阳湖泥沙的沉积速率[J]. 核技术, 1987, 10(27).
- [3] 张信宝, 李小龙, 王成华, 等. 黄土高原小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究[J]. 科学通报, 1989, 34(3).
- [4] 李小龙, 苏春江, 白立新, 等. 小流域泥沙来源的 ^{226}Ra 分析法[J]. 山地研究, 1995, 13(3).
- [5] Menzel R. G. Transport of strontium - 90 in runoff[J]. Science Washington: 1960, (3): 499~ 500.
- [6] 杨明义, 田均良, 刘普灵. ^{137}Cs 测定法研究不同坡面土壤侵蚀空间的分布特征[J]. 核农学报, 1999, 13(6).
- [7] 白占国, 万国江, 王长生, 等. 黔中岩溶山区表土 ^{7}Be 的分布特征及其侵蚀示踪研究[J]. 自然科学进展, 1997, 7(1).
- [8] 马建国, 柴之芳, 毛雪英, 等. 可活化稳定性同位素示踪法研究泥沙运动初探[J]. 核技术, 1990, 3(10).
- [9] Ritchie JC, McHenry JR. Application of radioactive fall out cesium - 137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns A review [J]. J. Enviro. Qual, 1990(19): 215~ 233.
- [10] 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).
- [11] 景可, 卢金发, 梁季阳, 等. 黄河中游侵蚀环境特征变化趋势[M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997. 9.
- [12] Technical report series Airborne gamma ray spectrometer surveying international atomic energy agency[J]. Vienna, 1991. 323.
- [13] Lowance R, McIntyre S, Lance C. Erosion and deposition in a field /forest system estimated using caesium - 137 activity [J]. J. Soil Water Conservation, 1988(2): 195~ 198.
- [14] S. M. Wright, B. J. Howard, P. Strand, T. Nylen, M. A. K. Sickel Prediction of ^{137}Cs deposition from atmospheric nuclear weapons tests within the arctic[J]. Environmental pollution 1999, 104: 131~ 143.