

用Cs-137 示踪法研究浙江天台县典型坡面的土壤侵蚀规律^①

聂国辉^{1,2}, 叶永棋¹, 叶碎高¹, 开美玲³

(1 浙江省水利河口研究院, 杭州 310020; 2 浙江广川工程咨询有限公司, 杭州 310020;

3 杭州市江干区河道监管中心, 杭州 310025)

摘 要: Cs-137 示踪法具有简单、快速、准确的优点, 已广泛应用于土壤侵蚀研究。本文在非耕地土壤侵蚀模型的基础上, 在浙江省天台县典型区域内, 得出Cs-137 基准值为 2382.02 Bq/m², 土壤Cs-137 剖面分布函数为 $Cs = 243.73e^{-0.113z}$, 同时分析了非耕地典型坡面上不同部位的侵蚀与沉积规律。结果表明: 土壤侵蚀主要发生在土壤表层 20 cm 以内的范围, 坡地土壤净流失上部大于中下部, 在距坡脚附近有土壤沉积现象。坡面不同部位的土壤侵蚀速率并不随着坡长的增加而简单地增大, 而是随地表植被结构和覆盖度的不同而变化。

关键词: Cs-137 示踪法; 典型坡面; Cs-137 背景值; 浙江省天台县

中图分类号: S159

Cs-137 系全球分布的一种人工放射性核素, 自大气沉降至地表后立即被土壤胶体颗粒强烈吸附, 并主要是伴随着土壤颗粒的机械运动而迁移, 土壤中的Cs-137 的流失量与土壤流失量密切相关, 通过Cs-137 在土壤剖面中的分布量与土壤Cs-137 的本底值可判断取样点是受侵蚀还是沉积。国外利用核示踪技术研究土壤侵蚀已有 40 余年历史, 如Simpson等^[1]对Hudson河下游沉积的研究、Brown等^[2]对Willamette流域农地侵蚀的研究、Wallbrink等^[3]对澳大利亚Canberra区域土壤运移的研究。我国则是从上世纪 80 年代起开展此项研究^[4], 如张信宝等^[5]在我国北方黄土地区及四川省的开拓性研究, 在建模和小流域应用研究方面均取得了许多有益的成果; 白占国等^[6]亦采用了Cs-137 法对石灰岩地区的土壤侵蚀进行了研究; 杨浩等人^[7]在江西省余江县中国科学院红壤生态实验站根据非耕作土的不同定量模型对土壤侵蚀模数进行了估算。由于本项研究区域所处的地理位置、气候条件、土壤等因素与中国科学院红壤生态实验站相似, 因此本文参考杨浩等人^[7]的非耕作土土壤侵蚀模型, 借助Cs-137 示踪法对天台县典型坡面的土壤侵蚀状况进行了估算, 以求能为对本地区水土保持规划制定和水土保持措施的配置起到参考作用。

1 研究区概况

浙江天台县属浙东丘陵山区, 境内山脉连绵, 丘

陵起伏, 四周崇山环抱, 重峦叠嶂, 是一个典型的山区盆地, 有“八山半水分半田”之称。按地质构造、岩性及地貌类型等因素划分, 全县可分为东北华顶中山区、西北里石门低中山区、西南大雷山中山区、东南赤峰低山丘陵区和中部盆地区。本地区属亚热带季风气候区, 四季分明, 雨量丰富, 热量充足, 多年平均降水量 1300~1600 mm。全县土壤主要有红壤、黄壤、岩性土、潮土、水稻土 5 个土类, 11 个亚类, 41 个土属。东北、西南中山区多为黄壤。典型坡面位于天台县东北华顶中山区的石梁镇, 境内山脉连绵, 重峦叠嶂, 取样现场没有农田, 离村庄也较远, 人为扰动比较少。据实地观测, 研究区内有 1~3 cm 的枯枝落叶层, 坡面水土流失轻微。取样点地理坐标东经 121°02.760', 北纬 29°15.263', 最高点海拔 816 m。取样点为疏林地, 以松、柏树为主, 间或有小灌木, 坡中、上部基本无草生长, 坡下部杂草较多, 郁闭度在 0.35 左右, 在坡脚处植被又有所减少。土壤类型为黄壤, 地表坡度约 14.5°。

2 研究方法

2.1 样品采集及测试

在研究区域选定典型坡面, 用地形剖面线来控制整个坡面。首先沿坡面方向(垂直于等高线方向)每 20 m 布设一个等高采样带, 到坡脚为止, 整个坡面共 9 个等高采样带, 分别代表坡上部(上、中、下)、坡

^①基金项目: 浙江省科技厅项目(2005F12030)资助。

作者简介: 聂国辉(1975—), 男, 辽宁朝阳人, 工程师, 主要从事水土保持方案编制、土壤侵蚀和生态环境研究。E-mail: nigelxihu@163.com

中部(上、中、下)和坡下部(上、中、下)。在每个等高采样带上,取 3 个样点,其中一个样点在剖面控制线上,另外两个样点分别在剖面控制线两侧各 1 m 处。每个样点分 3 层取样,取样深度应大于含 Cs-137 土层的深度,取样间距为 10 cm,取样深度为 30 cm。每个样品重量为 500~800 g 左右,野外采集到的样品就地去除大石块、草根等,留足备用,取回后自然风干后过 2 mm 筛。采样时间为 2007 年 11 月 9 日至 11 日。

土壤样品委托中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所进行 Cs-137 活度测定。使用美国堪培拉公司 γ 谱仪系统,探测器为 BE5030 型,可测量 γ 射线能量范围为 3keV~3MeV,系统使用 Canberra747E 铅室,壁厚为 10 cm,使用 DSA-1000 数字化谱仪,Genie-2000 谱分析软件分析谱数据。该谱仪系统是中国农科院所属的国际原子能机构比对网络实验室(IAEA-ALMERA)的主要仪器之一。运行该谱仪系统测定样品 48 h,低能端核素测定值与约定真值的最大相对偏差为 3%。高能端的核素测定 24 h,测定值与约定真值的最大相对偏差为 4.3%。测定时间为 80000~86400 s,样品重复测试结果相对误差 $\pm 4.7\%$ 。Cs-137 活度由能谱中能量为 661.6 keV 的 γ 射线全能峰计数获得,该谱仪系统采用无源效率刻度方法(LabSOCS)对样品进行效率刻度。

2.2 研究方法

Cs-137 示踪法研究土壤侵蚀与沉积的步骤为:①采集土样,测定样品中的Cs-137 活度;②确定研究区域的背景值 C_{ref} (Bq/m²);③确定模型来估算土壤流失量与沉积量。假定Cs-137 在小流域均匀沉降,以 C_{ref} 为参照,当土壤剖面中的实测Cs-137 活度 $C_t < C_{\text{ref}}$,表明该剖面存在土壤流失,而 $C_t > C_{\text{ref}}$,意味着有土壤沉积。

Cs-137 总量采用下式计算:

$$C_t = \sum_{i=1}^n 10^3 \times C_i \times B_{di} \times D_i \quad (1)$$

式中: C_t 表示样点的Cs-137 总量(Bq/m²); i 为采样层序号; n 为采样层数; C_i 为 i 采样层的Cs-137 活度(Bq/kg); B_{di} 为 i 采样层的土壤体积质量(容重)(t/m³); D_i 为第 i 取样层的深度(m)。

选择一个没有变化的土壤剖面作为标准,建立该标准剖面中Cs-137 质量活度与深度的函数方程 $C_{\text{ref}} = F(z)$ ($0 \leq z \leq H$),再假设侵蚀剖面的实测Cs-137 质量活度与深度的变化亦满足此方程 $C_t = F(z)$ ($h \leq z \leq H$),

然后解两方程得 h 与变化量 ΔC 的函数关系,以此作为估算模型。国内外诸多研究表明,Cs-137 在非耕作土中呈指数分布^[8],我们的实测结果亦与此结论一致,因此,设标准剖面中Cs-137 质量活度的垂直分布函数为:

$$F(z) = ae^{-bz} \quad (a, b > 0) \quad (2)$$

则 Cs-137 流失量 ΔC (Bq/m²) 为:

$$\Delta C = C_{\text{ref}} - C_t = \int_0^H Df(z)dz - \int_h^H Df(z)dz = \int_0^h Df(z)dz \quad (3)$$

对上式求解可得 t 年来土壤侵蚀总厚度 h (mm) 为:

$$h = (-1/b) \times \ln [1 - (C_{\text{ref}} - C_t) \times b / (a \times D)] \quad (4)^{[9]}$$

式中: H 为Cs-137 分布深度 (mm); D 为土壤体积质量 (g/cm³); a 为土壤表层的Cs-137 活度 (Bq/kg); b 为Cs-137 质量活度衰减系数 (mm⁻¹); z 为土壤深度 (mm)。

由(4)式求出土壤流失总厚度 h 后, t 年来土壤平均流失厚度 h_r (mm)和相应的年均侵蚀速率即土壤侵蚀模数 E_r (t/(km²·a))为:

$$h_r = h/t = h / (T-1963) \quad (5)^{[9]}$$

$$E_r = D \times h_r \times 104 \quad (6)$$

式中: T 为采样年份, $T > 1963$ 年,1963年为 Cs-137 输入最大年份。

3 结果与分析

3.1 Cs-137 背景值的确定

一般而言,基准点应是历史上(40 余年来)基本未受到侵蚀或沉积的地点。基准点的选择对于Cs-137 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。国内外现有的这方面研究通常把未受到侵蚀或沉积的大面积平坦山顶和非耕作平地选作基准点。浙江人口众多,经济发达,很难找到几十年未受扰动、没有发生侵蚀和沉积的平坦地表。综合各种因素考虑,经过现场踏勘,我们在天台县的天台山国家风景名胜区内附近选取一处作为土壤侵蚀基准点,即Cs-137 背景值取样点,该处对外交通不便,地广人稀,人为扰动极少,在坡地顶部且基本处于自然状态的平坦地面,经检测分析,Cs-137 基准值为 2382.02 Bq/m²。

由于Cs-137 尘埃随大气沉降至地表后立即被土壤胶体颗粒强烈吸附,并主要是伴随着土壤颗粒的机械运动而迁移^[10],从位于参照点上测得的Cs-137 活度也与此值相近,因此所定背景值是较可靠的。考虑到Cs-137 沉降与降水有关^[11],而浙江省的降水远多于西

北地区, 故其Cs-137 沉降量大于我国其他研究者^[2]在西北地区所测的Cs-137 沉降量, 这也是符合Cs-137 沉降规律的。

3.2 土壤侵蚀计算

根据对研究区域内非耕作土壤的 Cs-137 剖面分布特征的 origin 统计回归分析结果和 Cs-137 本底值, 得出土壤 Cs-137 剖面分布函数为:

$$Cs = 243.73e^{-0.113z} \quad (7)$$

式中: Cs 为土壤的Cs-137 活度 (Bq/kg) (Bq, 放射性活度的国际单位, 以法国物理学家贝可勒尔 (1852—1908) 命名, 当放射性核素在 1 s内衰变 1 次时, 其放射性活度规定为 1 贝可勒尔); z 为深度 (m)。经统计分析, 由 $R^2 = 0.9782$ (相关系数 $r = 0.9890$, $n = 57$), 可

知理论模型与取样数据高度相关。

3.2.1 Cs-137 在坡面的分布特征 根据上面建立的模型, 我们在天台县石梁镇选取了具有代表性的坡面进行取样、检测。采集样品经过烘干、碾磨、过筛及称重后, 送至中国农科院进行 Cs-137 活度检测, 最后根据检测结果分析该坡面的土壤侵蚀、沉积速率。

由表 1 可以看出天台石梁镇典型坡面 Cs-137 的分布情况, 其 Cs-137 活度由坡上至坡的中下部逐渐增大, 在坡下-上这个位置达到最大值, Cs-137 活度为 4618.9 Bq/kg, 此后又呈下降趋势。在此坡面上, 在距坡顶 100 ~140 m 处 Cs-137 活度最大。

表 1 天台县石梁镇典型坡面 Cs-137 分布情况 (Bq/m²)

Table 1 Distribution of Cs-137 in typical slope, Shiliang Town, Tiantai County

剖面深度 (cm)	坡上-上	坡上-中	坡上-下	坡中-上	坡中-中	坡中-下	坡下-上	坡下-中	坡下-下
0 ~ 10	141.7	244.4	483.6	486.6	577.6	1683.5	2584.0	1385.4	1453.4
10 ~ 20	141.7	201.5	341.9	606.2	850.6	1427.4	1836.0	1167.0	373.1
20 ~ 30	136.5	273.0	339.3	67.2	63.3	421.2	198.9	335.4	0.0
合计	419.9	718.9	1164.8	1160.0	1491.5	3532.1	4618.9	2887.7	1826.5

Cs-137 在表层土壤中的垂直分布特征是离地表越近, Cs-137 活度越高, 同时 Cs-137 活度变化范围也越大; 在剖面深度 30 cm 处, 从坡上至坡下, Cs-137 活度变化不明显; 在剖面深度 20 cm 处, Cs-137 活度变化则明显趋大; 在剖面深度 10 cm 处最为明显。研究表明, 该区域土壤侵蚀主要发生在距土壤表层 20 cm 以内的范围, 20 cm 以下土层受到侵蚀的机会大大减少。

在垂直于等高线方向, Cs-137 活度由坡的上部至坡的中下部逐渐增大, 在距坡脚附近有极值出现, 此后又呈下降趋势, 分析原因应该与“坡下部杂草较多, 在坡脚处植被又有所减少”的植被变化有关。

3.2.2 坡面土壤侵蚀特征 根据坡面 Cs-137 活度分布情况, 计算该坡面土壤侵蚀量、土壤侵蚀深度, 结果见表 2。

表2 天台县石梁镇典型坡面水土流失计算结果

Table 2 Soil and water loss at different locations in typical slope, Shiliang town, Tiantai County

项目	坡上-上	坡上-中	坡上-下	坡中-上	坡中-中	坡中-下	坡下-上	坡下-中	坡下-下
C_t	419.90	718.90	1164.80	1151.11	1480.06	3504.93	4583.37	2865.52	1826.50
h	10.94	8.10	5.09	5.17	3.46	-2.97	-5.09	-1.40	1.96
h_r	0.25	0.18	0.12	0.12	0.08	-0.07	-0.12	-0.03	0.04
E_r	320.80	237.53	149.19	151.49	101.34	-87.01	-149.33	-41.19	57.48

注: 表格中 C_t 为土壤表层的Cs-137 活度 (Bq/kg); h 为 1963 年以来土壤累积侵蚀 (负值表示此处为淤积) 深度 (mm); h_r 为年均土壤侵蚀 (淤积) 深度 (mm); E_r 为土壤侵蚀模数 ($t/(km^2 \cdot a)$)。

从表 2 可以看出, 坡面土壤侵蚀主要发生在坡的上部, 从坡上-上部到坡下-上部, 土壤中的 Cs-137 含量增加, 反映在土壤流失上, 由坡上-上部到坡中-中

部, 土壤流失量渐减; 此后土壤中的 Cs-137 含量渐减, 土壤流失量增加。在坡地上部, 土壤以净流失为主, 在坡的中下部除土壤流失外, 还接受坡面上部流

失的土壤,因而在相同坡度下,坡地土壤净流失上部大于中下部。在坡中-下部至坡下-中部,还有土壤沉积现象。

计算该坡面多年来的平均土壤侵蚀强度,坡上-上部最大,为 $320.80 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,从坡上-上部到坡中-中部,土壤流失量渐减;此后有沉积现象,在坡下-上部沉积最大,为 $149.33 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,此后土壤由沉积转为侵蚀,但侵蚀强度不大。该坡面总的土壤侵蚀强度为 $82.26 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。

本项研究出现“由坡上部至坡下部土壤侵蚀量渐减”的现象,主要是由于坡面植被的变化,该坡面植被是以松、柏树为主的疏林地,坡中、上部树木较多,但树下基本无草生长,坡下部树木较为稀疏,杂草较多。虽然坡下部树木较为稀疏但由于树下有杂草覆盖,起到很好保持水土作用,上面的土壤侵蚀流失到有杂草的地方逐渐沉积下来。并且草本植物的变化是由坡上至坡下逐渐增加的,因此反映在 Cs-137 活度上是逐渐变大、土壤侵蚀量渐减。从整个坡面侵蚀强度变化看,地表植被的变化明显影响了侵蚀强度的分异,表明地表植被(乔、草组合)是防止土壤侵蚀的重要因素之一。

4 结论

(1) Cs-137 在表层土壤中的垂直分布特征是离地表越近,Cs-137 活度越高,同时 Cs-137 活度变化范围也越大。研究表明,该区域土壤侵蚀主要发生在距土壤表层 20 cm 以内的范围,20 cm 以下土层受到侵蚀的概率大大降低。

(2) 研究区坡面土壤侵蚀主要发生在坡的上部,由坡上部至坡下部土壤流失量渐减,坡地土壤净流失上部大于中下部。在距坡脚附近有土壤沉积现象,此后又有少量土壤侵蚀。研究区土壤侵蚀强度不大。

(3) 土壤侵蚀速率并不随着坡长的增加而简单地增大,而是呈现复杂的变化,这种变化与植被状况关系密切。

参考文献:

- [1] Simpson HJ, Olsen CR, Triver RM, Williams SC. Man made radionuclides and sedimentation in the Hudson river estuary. Science, 1976, 194: 1979-1982
- [2] Browo KB, Cutshall NH, Kling GF. Agricultural erosion indicated by ^{137}Cs redistribution: I. Levels and distribution of ^{137}Cs activity in soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 45: 1184-1190
- [3] Wallbrink PJ, Olley JM, Murry AS. Measuring soil movement using ^{137}Cs : Implications of reference site variability. IASH, 1994: 1-9
- [4] 李雅琦, 田均良, 刘善灵. 土壤侵蚀研究中核示踪技术的应用. 中国水土保持, 1998 (12): 31-33
- [5] 张信宝, DL 赫吉特, DE 沃林. ^{137}Cs 法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究. 地球化学, 1991, 20 (3): 212-218
- [6] 白占国, 万国江, 刘东生, 黄荣贵. 散落核素 ^7Be 和 ^{137}Cs 在洱海和红枫湖沉积物中蓄积对比. 地球化学, 2002, 31(2): 113-118
- [7] 杨浩, 杜明远, 赵其国, 阳捷行, 八田珠郎. 基于 Cs-137 地表富集作用的土壤侵蚀速率的定量模型. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1999, 5(3): 42-48
- [8] 中国科学院地理研究所. 沙漠地貌的起源与研究方法. 北京: 科学出版社, 1962: 114-154
- [9] 张燕, 张洪, 杨浩, 唐翔宇, 彭补拙. 用 ^{137}Cs 法探讨苏南坡地的土壤侵蚀. 水土保持学报, 2002, 16(2): 53-56
- [10] 杨明义, 杜明远, 赵其国, 阳捷行, 八田珠郎. 利用 Cs-137 示踪农业耕作土壤侵蚀速率的定量模型. 土壤学报, 2000, 40(3): 296-305
- [11] Johnson LC. Soil loss tolerance: Fact or myth. J. Soil and Water Cons., 1987, 42 (3): 155-160

Soil Erosion Law Based on Cs-137 Tracer Method in Typical Slope, Tiantai County, Zhejiang Province

NIE Guo-hui^{1,2}, YE Yong-qi¹, YE Sui-gao¹, KAI Mei-ling³

(1 Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China; 2 Zhejiang Guangchuan Engineering Consulting Co.Ltd., Hangzhou 310020, China; 3 Jianggan District Watercourse Supervision Center of Hangzhou, Hangzhou 310025, China)

Abstract: Cs-137 tracer method is simple, rapid and accurate, which has been widely used in soil erosion research. This article, taking Tiantai County as an example on the basis of non-farming soil erosion model, obtained the background value of Cs-137 (2382.02 Bq/m²) and soil Cs-137 profile distribution function ($243.73e^{-0.113x}$), and also analyzed soil erosion and deposit law in different positions simultaneously. The results showed that soil erosion mainly occurred in the topsoil within 20 cm and the net loss of topsoil was higher than those of the middle and below slope locations, soil deposition occurred in the neighborhood of the foot - slope. Soil erosion rate at the different locations in the slope didn't increase with the length of slope simply, but changed with the surface vegetation structure and coverage.

Key words: Cs-137 tracer method, Typical slope, The background value of Cs-137, Tiantai County of Zhejiang Province