

三峡库区紫色土坡耕地土壤侵蚀的¹³⁷Cs 示踪研究

李豪^{1,2}, 张信宝^{1,3}, 文安邦¹, 史忠林^{1,2}

(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. 中国科学院 研究生院, 北京 100049;
3. 中国科学院 地球环境研究所 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘 要: 坡耕地是三峡库区的重点水土流失区和河流泥沙的主要来源地。采用¹³⁷Cs 示踪技术对三峡库区紫色土坡耕地的土壤侵蚀速率进行了定量研究。结果表明, 新政小流域的¹³⁷Cs 本底值为 1 420.9 Bq/m²; 平均坡度为 11.4° 的缓坡耕地的¹³⁷Cs 面积活度介于 398.5~1 649.6 Bq/m² 之间, 坡长加权平均值为 816.0 Bq/m²; 采用改进的简化质量平衡模型计算了坡耕地的土壤侵蚀速率, 结果得出该坡地的土壤侵蚀模数介于 -3 358.8~4 937.4 t/(km²·a), 其加权平均值为 1 294.6 t/(km²·a)。受犁耕作用的影响, 坡耕地两个坡段的土壤侵蚀速率随坡长增加大致都呈下降趋势, 并在坡段下方出现了堆积。坡耕地土壤侵蚀速率不高的原因, 一方面是由于所研究坡耕地属于缓坡, 坡度较小, 另一方面则是由于当地农民总结出了一套有效防止水土流失的耕作方式, 使得土壤侵蚀强度大大降低。

关键词: 三峡库区; 土壤侵蚀; 坡耕地; ¹³⁷Cs 示踪

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2009)05-0001-06

中图分类号: S157.1, S124+.2

Erosion Rate of Purple Soil on a Cultivated Slope in the Three Gorges Reservoir Region Using ¹³⁷Cs Technique

LI Hao^{1,2}, ZHANG Xin-bao^{1,3}, WEN An-bang¹, SHI Zhong-lin^{1,2}

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China; 2. Graduate University of the CAS, Beijing 100049, China; 3. Xi'an Laboratory of Loess and Quaternary Geology, CAS, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: Cultivated slopes are the major soil loss area and the major river sediment source in the Three Gorges Reservoir region. However, reliable studies of soil erosion and sedimentation in the region are limited and the fundamental research on soil erosion is inefficient. A study was carried out to investigate soil erosion on a cultivated slope in the region using ¹³⁷Cs technique. Preliminary results showed that the ¹³⁷Cs reference inventory of the study catchment was estimated to be 1 420.9 Bq/m². The ¹³⁷Cs inventories of gentle cultivated slope with a mean degree of 11.4° ranged between 398.5 and 1 649.6 Bq/m² and the average value of slope length weighted was 816.0 Bq/m². Soil erosion rate on the cultivated slope was estimated by revised simplified mass balance model. Soil erosion rate on the study slope ranged between -3 358.8 and 4 937.4 t/(km²·a) and the average value of slope length weighted was 1 294.6 t/(km²·a). Influenced by the tillage, soil erosion rates in two slope segments decreased downslope and deposition occurred at the bottom of slope. The lower soil erosion rate is because the cultivated slope has a gentle gradient. On the other hand, a series of tillage method are adopted by the local farmers for preventing soil and water loss efficiently, which greatly reduces soil erosion.

Key words: Three Gorges Reservoir region; soil erosion; cultivated slope; ¹³⁷Cs technique

¹³⁷Cs 是 20 世纪 50—70 年代大气层核试验产生的人工放射性同位素, 半衰期 30.17 a, 可测知的¹³⁷Cs 沉降始于 1954 年, 1958—1968 年是¹³⁷Cs 的主要沉降期, 其中在 1963 年达到峰值, 70 年代以后迅速减少。¹³⁷Cs 主要随降水沉降到地面, 随即被表层土壤紧

密吸附, 基本不被雨水淋溶和植物吸收, 其后的运移主要伴随土壤或泥沙颗粒的运动^[1-3]。¹³⁷Cs 被认为是研究侵蚀泥沙的一种很好的示踪同位素, 目前已广泛应用于无观测资料地区土壤侵蚀速率和湖库、滩地沉积速率的调查研究工作, 具有快速、经济和可靠等优

点。自 20 世纪 80 年代末以来,国内的一大批学者在黄土高原、长江上游紫色土区、江南丘陵红壤区和东北黑土区等不同地区利用 ^{137}Cs 示踪技术开展了侵蚀泥沙的研究,取得了丰硕的研究成果^[4-11]。

一直以来,三峡库区被认为是长江上游土壤侵蚀较严重的地区之一,水土流失强烈^[12]。该区开发历史悠久,人口密度大,垦殖指数较高,坡地开垦严重,区内的坡耕地占耕地总面积的一半以上^[13]。坡耕地已成为三峡库区的重点水土流失区和河流泥沙的主要来源地,给三峡工程和长江中下游的生态安全造成了极大威胁。但长期以来,三峡库区的侵蚀泥沙研究基础薄弱,可靠的水土流失观测资料较缺乏,水土流失基础研究的报道较少。本文采用 ^{137}Cs 示踪技术对三峡库区传统耕作措施下的紫色土坡耕地的土壤侵蚀强度进行了定量研究,以期查明三峡库区侵蚀产沙现状,为该区水土流失治理和水土保持效益评价工作提供依据。

1 研究区概况

本次研究的坡耕地位于三峡库区中游重庆市忠县石宝镇干流库岸新政村(108°02'25"E,30°24'53"N),中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所忠县试验站核心区虾子岭内。研究区内出露岩层为侏罗系沙溪庙组(J_2s)砂岩、粉砂岩和泥岩,地貌为典型的浅丘地貌,呈西北高东南低山势走向。土壤为沙溪庙组砂岩、粉砂岩和泥岩快速风化形成的中性紫色土。

研究区所在的忠县地处三峡库区腹心地带,属亚热带东南季风气候,具有四季分明,雨量充沛和日照充足等特点。年均气温 19.2℃,无霜期 320 d 左右。研究区多年平均降雨量为 1 150 mm,降雨季节分配不均,4—10 月为雨季,降雨量占全年的 70%。

2 样品采集与测试

取样坡地紧靠核心试验区的径流试验场,与径流试验场平行,坡长 69.5 m,平均坡度 11.4°,属于缓坡耕地。取样采用平行双剖面线法,即沿取样地最大坡度方向,相隔 2~3 m,平行布设两条取样地形剖面线。沿剖面线间隔 3~4 m 平行采集一个土壤样品,土壤样品包括全样和分层样两种,使用荷兰 Eijkelkamp 公司 05.02 型取样钻采集土壤样品。土壤全样取样深度 25—40 cm,大于坡地犁耕层深度;土壤分层样的分层厚度 3~5 cm,取样深度 31 cm,取样坡地的地形剖面图及各取样点的分布如图 1 所示,共采集了 41 个全样和 1 个分层样。

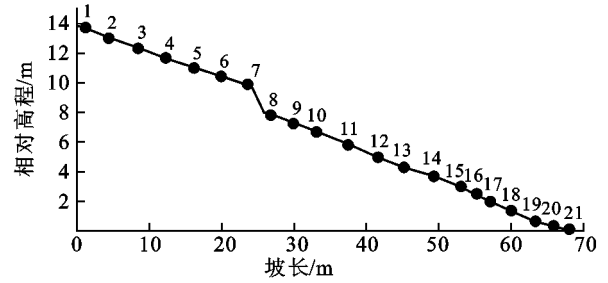


图 1 坡耕地取样点分布示意图

样品的 ^{137}Cs 含量测定在成都山地灾害与环境研究所同位素实验室进行。样品经风干、研磨、过筛(2 mm)、称重后供测试用。用 n 型高纯锗探头(LOAX HPGe)的低能量、低本底能谱仪测定 ^{137}Cs 含量。样品测重 250 g,测试时间 33 000 s,测试误差为 $\pm 5\%$ (95%信度),样品的 ^{137}Cs 含量根据 662 keV 谱峰面积求算。

3 结果与分析

3.1 研究区域 ^{137}Cs 本底值

^{137}Cs 本底值是运用 ^{137}Cs 示踪技术研究土壤侵蚀的基础。确定研究区域 ^{137}Cs 本底值,可以此判断地块是否发生侵蚀或堆积,及计算地块的侵蚀或堆积强度。新政小流域人类活动强烈,流域内没有符合本底值取样条件的地块,无法取得可靠的 ^{137}Cs 本底值。通过实地勘察,我们选择了距新政村小流域约 5 km 的一个土丘,在丘顶的天然马尾松林地内采集了 ^{137}Cs 本底值的土壤样品。该马尾松林地自然生长已有 50 a 以上,基本没有受到人类活动干扰。在该本底值取样地,共采集了 1 个土壤分层样和 6 个全样,取样方法同坡地。土壤分层样剖面的 ^{137}Cs 深度分布如图 2 所示,表层土壤(0—4 cm) ^{137}Cs 浓度最高,达到了 8.05 Bq/kg,随深度的增加 ^{137}Cs 浓度呈迅速下降的趋势,深度 18 cm 以下土层基本不含 ^{137}Cs ,分层样剖面 ^{137}Cs 面积活度为 1 430.6 Bq/m²。采集的 7 个本底值样品 ^{137}Cs 面积活度介于 1 170.9~1 650.0 Bq/m²,平均值为 1 420.9 Bq/m²,变异系数为 13.3%。我们认为,此次采集的石宝镇新政村 ^{137}Cs 本底值是可靠的,采用 7 个取样点 ^{137}Cs 面积活度的平均值 1 420.9 Bq/m² 为研究区域 ^{137}Cs 本底值。

3.2 土壤侵蚀量计算模型的选择

目前,利用 ^{137}Cs 计算农耕地土壤侵蚀量的模型很多,其中以质量平衡模型为主,是目前应用范围较广的一种模型。质量平衡模型建立在对 ^{137}Cs 沉降、

再分配与土壤流失过程认识的基础上,同时考虑¹³⁷Cs在沉降期间沉降通量的年际变化对估算土壤侵蚀速率的影响,计算结果更加准确、可靠,其中以Zhang等(1989)建立的简化质量平衡模型及其改进形式的应用最为广泛。

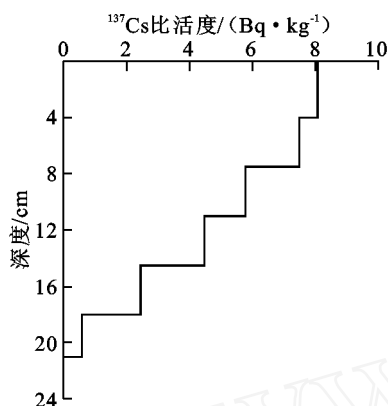


图2 新政村本底值分层样¹³⁷Cs深度分布

Zhang等^[14](1989)根据¹³⁷Cs沉降主要发生于20世纪50—70年代,其中1963年¹³⁷Cs沉降量最大,1963年前后沉降量基本相当,假设¹³⁷Cs全部沉降于1963年,提出了质量平衡简化模型,其表达式为。

$$A = A_0 \left(1 - \frac{H}{H}\right)^{N-1963} \quad (1)$$

式中: A ——侵蚀取样点¹³⁷Cs面积活度(Bq/m²); A_0 ——¹³⁷Cs本底值(Bq/m²); H ——为犁耕层厚度(cm); H ——年土壤流失厚度(cm); N ——采样时的年份。

在此基础上,Zhang等^[15](1999)考虑到¹³⁷Cs沉降期间,坡面上地表径流直接带走的部分¹³⁷Cs对侵蚀量计算的影响,提出有效本底值的概念,用坡面径流系数对区域本底值进行修正,将公式1改进为以下形式:

$$A = A_0 \times (1 - R) \times \left(1 - \frac{H}{H}\right)^{N-1963} \quad (2)$$

式中: R ——坡面径流系数; $A_0 \times (1 - R)$ ——坡面径流系数修正后的有效本底值。

从实际应用来看,国内大多数研究者在计算土壤侵蚀量时都选择了简单易用且精度较高的简化质量平衡模型及其改进形式。本文采用改进的简化质量平衡模型(公式2)计算坡耕地土壤侵蚀量。

当取样点的¹³⁷Cs面积活度大于本底值时,说明该点发生了土壤堆积。Lowance^[16](1988)在使用¹³⁷Cs法估算农林系统土壤沉积时提出了以下模型:

$$S = 1000 \times \frac{C - N}{W_d(N - 1954)} \quad (3)$$

式中: S ——取样点土壤堆积模数[t/(km²·a)]; C ——堆积取样点¹³⁷Cs面积浓度(Bq/m²); Z ——径流系数修正后的有效本底值(Bq/m²); W_d ——为堆积取样点¹³⁷Cs比活度(Bq/kg); N ——采样年份。

本文采用Lowance模型(公式3)计算坡耕地土壤堆积量。

3.3 模型参数的确定

应用改进的简化质量平衡模型求算坡耕地土壤侵蚀量,还须确定以下两个参数:坡面径流系数和犁耕层深度。

由于研究区缺乏实测资料,我们采用邻近区域地质、地貌、土壤等立地条件相似的坡地观测资料作为参照,确定坡面径流系数。史东梅等^[17](2005)在重庆涪陵区开展的有关植物篱护坡作用的研究中,坡度为13.3和13.6°坡耕地,传统种植方式条件下,测定的坡面径流系数介于0.20~0.31,平均为0.27;卢喜平等^[18](2005)在重庆南沱镇研究了经济作物种植方式的坡地水土流失特征,土壤类型是沙溪庙组发育的中性紫色土,14°退耕坡耕地测定的坡面径流系数介于0.14~0.35,平均为0.24;万丹^[19](2007)在重庆渝北区木耳镇对紫色土不同土地利用方式下土壤侵蚀和氮磷流失进行了研究,观测的15°坡耕地坡面径流系数为0.11~0.22,平均为0.18;齐永青^[20](2006)在重庆开县春秋小流域运用¹³⁷Cs示踪技术研究了流域坡耕地土壤侵蚀强度,该研究确定的坡面径流系数为0.30。本研究坡耕地的坡度为11.4°,土壤类型为侏罗系沙溪庙组的紫色土,与上述几位学者研究的坡耕地相似,综合考虑新政小流域取样坡耕地立地条件,选择0.30作为本研究的坡面径流系数。

另一个参数是犁耕层深度。通过询问当地农民得知,取样坡耕地的耕作方式为人力翻耕。以往研究中,坡耕地的犁耕层深度多取15—20 cm^[5, 7-8, 20]。由于犁耕混合作用,¹³⁷Cs均匀分布在犁耕层内,故可通过土壤分层样剖面¹³⁷Cs深度分布确定犁耕层深度。坡耕地取样点20 cm分层样¹³⁷Cs深度分布属于堆积农耕地分布形态(图3),¹³⁷Cs分布深度要大于犁耕层深度,且犁耕层以下深度的¹³⁷Cs浓度通常较上部要高。该土壤剖面中¹³⁷Cs分布在0—31 cm深度内,其中0—19 cm深度内¹³⁷Cs含量基本一致,平均值2.89 Bq/kg。19—31 cm层位的¹³⁷Cs平均含量达到了4.31 Bq/kg,高于0—19 cm层位。显然犁耕层位于20 cm层位,因此我们确定本研究的坡耕地犁耕层深度为20 cm。

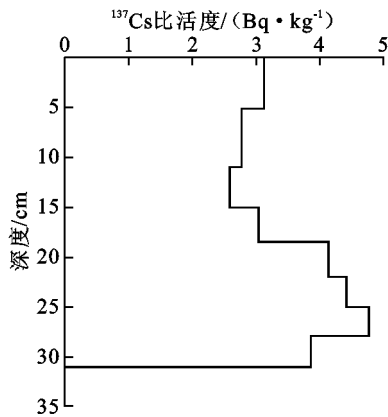


图3 取样点 20 土壤分层样¹³⁷Cs 深度分布

3.4 ¹³⁷Cs 面积活度顺坡变化

坡耕地各取样点的¹³⁷Cs 面积活度见表 1。采用坡长加权平均法求算了地块平均¹³⁷Cs 面积活度。坡长加权平均法以取样点所代表的坡长作为权重因子对各取样点的¹³⁷Cs 面积活度进行加权计算,得到地块的平均¹³⁷Cs 面积活度。其计算公式如下:

$$\bar{A} = (A_1 \times L_1 + \sum_{i=1}^n A_i (L_i - L_{i-1})) / L \quad (4)$$

式中: \bar{A} ——坡长加权平均的¹³⁷Cs 面积活度(Bq/m²); A_i ——第*i*个取样点的¹³⁷Cs 面积活度(Bq/m²); L_i ——*i*点的坡长(m); n ——取样点个数; L ——总坡长(m)。

由表 1 可见,本研究坡耕地各取样点的¹³⁷Cs 面积活度介于 398.5 ~ 1 649.6 Bq/m² 之间,坡长加权平均值为 816.0 Bq/m²。本研究坡耕地坡长 68 m,在坡中部 26 m 处,有一高约 2 m 的陡坎,将整个坡面分为 A, B 2 个坡段。

坡段 A,位于坡面 0 ~ 26 m 段,坡度 9.7°,各取样点的¹³⁷Cs 面积活度介于 398.5 ~ 1 649.6 Bq/m²,基本呈顺坡增加的趋势,坡段最下方取样点 7 的¹³⁷Cs 面积活度达到了 1 649.6 Bq/m²,大于研究区域的¹³⁷Cs 本底值,说明有部分泥沙堆积于此。坡耕地土壤发生运移的作用主要包括两种:地表径流和犁耕。地表径流把土壤带到地块以外;犁耕作用则将坡地上部的土壤搬运到坡地下部,且搬运的土壤全部堆积在农耕地内^[21]。坡段 A 的坡长较小,径流侵蚀作用有限,¹³⁷Cs 面积活度的空间分布主要受犁耕搬运作用的影响,地表径流侵蚀作用随坡长增加而增强的程度不足以抵消犁耕的搬运作用,使得该坡段取样点¹³⁷Cs 面积活度大致呈顺坡增加的趋势。

坡段 B,位于坡面 26 ~ 69 m 段,坡度 10.6°,各取样点的¹³⁷Cs 面积活度介于 536.2 ~ 1 127.0 Bq/m²

m²,¹³⁷Cs 面积活度随坡长增加大致呈先上升而后略为下降的趋势。这可能是由于该坡段上部径流侵蚀相对较弱,¹³⁷Cs 再分布主要受犁耕作用的影响,使得¹³⁷Cs 面积活度随坡长增加而上升;而坡段下部随着坡长的增加,径流侵蚀作用有所增强,使得坡脚处的¹³⁷Cs 面积活度反而较坡地中上部低。取样点 8 的¹³⁷Cs 面积活度相对略高(756.7 Bq/m²),可能是上方坡段 A 部分携沙径流经过陡坎进入该坡段后,泥沙在此有所堆积所致。此外,个别取样点并不符合上述规律,如取样点 6 和 20(¹³⁷Cs 面积活度分别为 481.9 和 1 021.9 Bq/m²),与相邻样点存在较大的差异,这可能与坡地微地貌、无规律犁耕等因素有关,使得¹³⁷Cs 在坡面的空间分布出现一定的波动。

3.5 坡耕地土壤侵蚀速率

根据 Zhang 等的改进简化质量平衡模型(公式 2)计算了坡耕地土壤侵蚀速率,坡面径流系数取 0.30,坡耕地犁耕层厚度取 20 cm,耕层土壤容重取 1.2 t/m³;根据 Lowance 模型(公式 3)计算了取样点 7,15,16,18 和 20 的坡耕地土壤堆积速率,计算结果见表 1。该计算结果为取样点的点土壤侵蚀(堆积)速率,采用了坡长加权平均法求算地块平均侵蚀速率。其计算方法与公式 4 类似。

坡耕地土壤侵蚀速率的顺坡变化如图 4 所示。由于犁耕作用的影响,坡耕地坡段 A 的土壤侵蚀速率随坡长增加大致呈下降趋势,从坡顶取样点 1 的 4 937.4 t/(km²·a)下降到中部点 4 的 1 617.3 t/(km²·a),坡段最下方的取样点 7 发生了堆积,土壤堆积速率为 3 358.8 t/(km²·a);坡段 B 的土壤侵蚀速率随坡长增加也大致呈下降趋势,在取样点 15,16,18 和 20 处都发生了少量的堆积,但在坡脚处由于流水侵蚀作用有所加强,土壤侵蚀速率较该坡段中部有所增加,如取样点 21 的土壤侵蚀速率达到了 1 082.6 t/(km²·a)。与¹³⁷Cs 面积活度的空间分布基本一致,由于微地貌、无规律犁耕等因素的影响,该坡地土壤侵蚀速率的空间分布也出现了一定的波动。如取样点 6 和 20 的土壤侵蚀(堆积)速率分别为 3 920.0 和 -147.2 t/(km²·a),与相邻的取样点存在较大的差异。由表 1 可见,平均坡度为 11.4°的坡耕地年均侵蚀(堆积)厚度介于 -0.280 ~ 0.411 cm,加权平均为 0.108 cm,相应的土壤侵蚀(堆积)模数介于 -3 358.8 ~ 4 937.4 t/(km²·a),加权平均为 1 294.6 t/(km²·a)按水利部 2008 年颁布的土壤侵蚀分类分级标准(SL 1990—2007)^[22],此研究地块属

于轻度侵蚀。本研究中的坡耕地土壤侵蚀速率不高,一方面是由于本研究的坡耕地属于缓坡,坡度较小,平均坡度仅为 11.4°。另一方面的原因则是当地农民在生产实践中总结出一套有效防止水土流失的耕作方式。通过在坡耕地内开挖了数条等高排水沟,把整个长坡地块分割为若干个短坡地块,缩短了坡长,每个短坡地块的坡长在 10~15 m 左右,同时两侧分别开挖了顺坡排水沟。该耕作方式有效的防止了水土流失,使得土壤侵蚀强度大大降低。

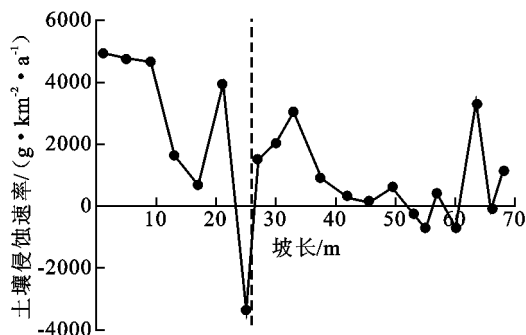


图 4 坡耕地土壤侵蚀速率的顺坡变化

表 1 取样坡耕地¹³⁷Cs 面积活度、年均侵蚀厚度与土壤侵蚀模数

坡段	取样点编号	坡长/m	¹³⁷ Cs 面积活度/(Bq·m ⁻²)	年均侵蚀厚度/cm	土壤侵蚀模数/(t·km ⁻² ·a ⁻¹)
A	1	1.0	398.5	0.411	4 937.4
	2	5.0	412.8	0.396	4 749.3
	3	9.0	422.5	0.385	4 625.2
	4	13.0	738.7	0.135	1 617.3
	5	17.0	882.5	0.054	651.5
	6	21.0	481.9	0.327	3 920.0
	7	25.0	1 649.6	- 0.280	- 3 358.8
B	8	27.0	756.7	0.124	1 487.0
	9	30.0	687.1	0.167	2 009.0
	10	33.0	569.2	0.252	3 024.9
	11	37.5	845.5	0.074	884.1
	12	42.0	946.8	0.022	268.6
	13	45.5	977.2	0.008	96.4
	14	49.5	893.2	0.049	586.2
	15	53.0	1046.0	- 0.024	- 286.6
	16	55.0	1 127.0	- 0.062	- 739.2
	17	57.0	929.6	0.031	368.8
	18	60.0	1 126.7	- 0.059	- 713.9
	19	63.5	536.2	0.279	3 347.0
	20	66.0	1 021.9	- 0.012	- 147.2
	21	68.0	815.2	0.090	1 082.6
加权平均			816.0	0.108	1 294.6

注: *负数表示该取样点发生堆积。

4 结 论

在三峡库区忠县石宝镇新政小流域开展了紫色土坡耕地土壤侵蚀强度的¹³⁷Cs 示踪研究,初步研究结果表明。

(1) 新政小流域人类活动强烈,流域内无法取得可靠的¹³⁷Cs 本底值。因此本研究选择在距新政小流

域约 5 km 的一块丘顶天然马尾松林地内采集¹³⁷Cs 本底值的土壤样品,确定研究区域¹³⁷Cs 本底值为 1 420.9 Bq/m²。

(2) 采用改进的简化质量平衡模型计算了坡耕地的土壤侵蚀速率。土壤侵蚀速率顺坡变化分段分析结果表明,由于犁耕作用的影响,坡耕地两个坡段的土壤侵蚀速率随坡长增加大致都呈下降趋势,并在

坡段下方出现了堆积。平均坡度为 11.4 的缓坡耕地的¹³⁷Cs 面积活度介于 398.5 ~ 1 649.6 Bq/m² 之间,坡长加权平均值为 816.0 Bq/m²;相应的土壤侵蚀模数介于 - 3 358.8 ~ 4 937.4 t/(km²·a) 加权平均为 1 294.6 t/(km²·a)

(3) 本研究中的坡耕地土壤侵蚀速率不高,一方面是由于本研究的坡耕地属于缓坡,坡度较小;另一方面的原因则是当地农民总结出一套有效防止水土流失的耕作方式。通过在坡耕地内开挖等高排水沟,把整个长坡地块分割为若干个短坡地块,同时两侧分别开挖了顺坡排水沟。该耕作方式有效的防止了水土流失,使得土壤侵蚀强度大大降低。

[参 考 文 献]

- [1] Zapata F. Handbook for the Assessment of Soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides [M]. New York/Boston/Dordrecht/London/Moscow: Kluwer Academic Publisher, 2002:3-9.
- [2] Zapata F. The use of environmental radionuclides as tracers in soil erosion and sedimentation investigations: recent advances and future developments [J]. Soil & Tillage Research, 2003, 69: 3-13.
- [3] 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]. Journal of Environmental Quality, 1990, 19: 215-233.
- [4] 张信宝,李少龙,王成华,等. ¹³⁷Cs 法测算梁峁坡农耕地土壤侵蚀量的初探[J]. 水土保持通报, 1988, 8(5): 18-22.
- [5] 张信宝,赫吉特 D L,沃林 D E. ¹³⁷Cs 法测算黄土高原土壤侵蚀速率的初步研究[J]. 地球化学, 1991, (3): 212-218.
- [6] 杨明义,田均良,刘普灵. ¹³⁷Cs 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): 368-372.
- [7] 文安邦,张信宝,王玉宽,等. 长江上游紫色土坡耕地土壤侵蚀¹³⁷Cs 示踪法研究[J]. 山地学报, 2001, 19(s): 56-59.
- [8] 文安邦,张信宝,王玉宽,等. 长江上游 ¹³⁷Cs 法土壤侵蚀量研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(6): 1-3.
- [9] 方华军,杨学明,张晓平,等. ¹³⁷Cs 示踪技术研究坡耕地黑土侵蚀和沉积特征[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1376-1382.
- [10] 唐翔宇,杨浩,曹慧,等. ¹³⁷Cs 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):4-7, 11.
- [11] 濮励杰,赵姚阳,金平华,等. ¹³⁷Cs 示踪红壤丘陵区坡地土壤侵蚀的研究:以江西丰城市为例[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(6):562-567.
- [12] 中华人民共和国水利部. 全国水土流失公告[R]. 2002, 北京.
- [13] 钟冰,唐治诚. 三峡库区水土流失及其防治[J]. 水土保持研究, 2001, 8(2):147-149.
- [14] 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]. Hydrological Sciences, 1990, 35(3): 243-252.
- [15] Zhang X, Walling D E, He Q. Simplified mass balance models for assessing soil erosion rates on cultivated land using Caesium—137 measurements [J]. Hydrological Sciences, 1999, 41(1):33-45.
- [16] Lowrance R, McIntyre S C, Lance C. Erosion and deposition in a field/ forest system estimated using cesium - 137 activity[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1988, 43(2):195-199.
- [17] 卢喜平,史东梅,吕刚,等. 紫色土坡地果草种植模式的水土流失特征研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(2):21-25.
- [18] 史东梅,卢喜平,刘立志. 三峡库区紫色土坡地桑基植物篱水土保持作用研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(3):75-79.
- [19] 万丹. 紫色土不同利用方式下土壤侵蚀及氮磷流失研究[D]. 重庆:西南大学, 2007.
- [20] 齐永青. 小流域侵蚀泥沙的¹³⁷Cs 法研究:以三峡库区开县春秋小流域为例[D]. 成都:中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 2006.
- [21] 张信宝,李少龙,Quine T A,等. 犁耕作用对¹³⁷Cs 法测算农耕地土壤侵蚀量的影响[J]. 科学通报, 1993, 38(22):2072-2076.
- [22] 中华人民共和国水利部. SL 190—2007, 土壤侵蚀分类分级标准[S]. 北京:2008.