

喀斯特峰丛洼地泥沙堆积的¹³⁷Cs示踪研究 ——以丫吉试验场为例

李豪¹ 张信宝^{2,3} 文安邦² 曹建华⁴

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041;
3. 中国科学院地球化学研究所 环境地球化学国家重点实验室 贵阳 550002;
4. 中国地质科学院岩溶地质研究所 国土资源部岩溶动力学重点实验室 广西 桂林 541004)

摘要: 西南喀斯特地区是我国生态环境最脆弱的地区之一, 土壤侵蚀及其造成的石漠化已成为制约该区可持续发展最严重的生态环境问题。但是该区的侵蚀泥沙研究基础薄弱, 利用核素示踪法研究侵蚀泥沙的报道较少。本文以桂林丫吉试验场的峰丛洼地小流域为研究对象, 运用¹³⁷Cs示踪技术定量研究了洼地泥沙堆积速率, 确定了该洼地小流域1963年以来的泥沙堆积速率。初步研究结果表明, 1963~2008年的45年间, 丫吉1号洼地的泥沙堆积速率和堆积模数分别为 $0.104 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $13.68 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。讨论了研究小流域泥沙堆积与地面土壤流失的关系, 认为研究区域近几十年以来的地面水土流失相当轻微, 地面土壤流失速率仅为10余 $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

关键词: 喀斯特峰丛洼地; 泥沙堆积; ¹³⁷Cs示踪; 丫吉试验场

中图分类号: P512.31; S157; S124+.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-9250(2016)01-0057-07 **doi:** 10.14050/j.cnki.1672-9250.2016.01.008

¹³⁷Cs(Cesium-137) 是一种人工放射性核素, 其半衰期为30.17年。¹³⁷Cs是核裂变的产物, 主要来源于20世纪50~70年代的大气层核武器试验, 环境中仪器可测知的¹³⁷Cs沉降始于1954年, 1958年至1968年是¹³⁷Cs的主要沉降期, 其中沉降的峰值时期是1963年, 到70年代后沉降量急剧减少。¹³⁷Cs主要随降水沉降到地面, 降落到地表后迅速被表层土壤颗粒紧密吸附, 基本不被雨水淋溶和植物吸收, 其后的运移主要为伴随土壤或泥沙颗粒的物理运动, ¹³⁷Cs沉降后的再分布, 主要是土壤侵蚀、泥沙输移和沉积的结果。作为一种公认的优良示踪同位素, ¹³⁷Cs自上世纪80年代以来已经广泛应用于塘库、湖泊等沉积物断代研究, 取得了一系列丰硕的成果^[1-11]。现行的¹³⁷Cs示踪法测定湖库等沉积物沉积速率的方法主要为峰值深度判别法, 其基本原理为: 无扰动湖库沉积物剖面的¹³⁷Cs浓度深度分布曲线形态呈单峰型, 剖面中的¹³⁷Cs浓度最大峰值对应于¹³⁷Cs沉降量最大的1963年沉积, 根据¹³⁷Cs最大峰值浓度层位的剖面深度和1963年以来的沉积时间,

可以求算这一期间的平均沉积速率。

我国西南喀斯特山区是典型的生态环境脆弱区, 以土壤侵蚀为主要特征的土地退化与石漠化已成为制约该地区发展最严峻的生态环境问题^[12]。但是长期以来, 西南喀斯特地区的侵蚀泥沙问题没有得到足够重视, 研究基础较薄弱, 许多问题还有待解决。目前, 在该区利用核素示踪法研究侵蚀泥沙的报道仍然较少。

峰丛洼地是亚热带喀斯特地区常见的一种地貌形态, 在我国有广泛的分布。大部分峰丛洼地为独立的封闭流域, 峰丛构成流域的分水岭, 封闭的洼地包围于峰丛之中。地貌特征决定了峰丛洼地的产流产沙具有明显的向心聚集性, 洼地是坡面产沙的汇集中心, 部分泥沙随径流进入落水洞进而到达地下管、洞系统, 剩余的产沙则堆积于洼地内。因此, 整个洼地可视为天然的大型泥沙池或塘库, 是利用¹³⁷Cs示踪技术研究泥沙堆积的良好场所。部分洼地小流域雨季时洼地内排水不畅, 只有少量泥沙从落水洞流失, 洼地的泥沙堆积量与小流域地面

收稿日期: 2015-04-10; 改回日期: 2015-07-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403203); 四川省教育厅科研项目(14ZB0009)。

第一作者简介: 李豪(1980-), 男, 博士, 讲师, 主要从事土壤侵蚀与水土资源可持续利用的研究。E-mail: lihao80@163.com.

土壤流失量较接近,因此还可以通过洼地的泥沙堆积量与洼地泥沙截留率。推算出该小流域的地面土壤流失量。已有研究成果^[13-16]表明,在资料匮乏的区域,此法不失为一种快速获取喀斯特地区侵蚀泥沙基础数据的有效途径。本文以桂林丫吉试验场的峰丛洼地小流域为例,利用¹³⁷Cs核素示踪技术,对洼地的泥沙堆积与地面土壤流失进行了定量研究,探讨研究区的侵蚀产沙特征,以期为该区水土保持、石漠化治理等工作提供科学的依据。

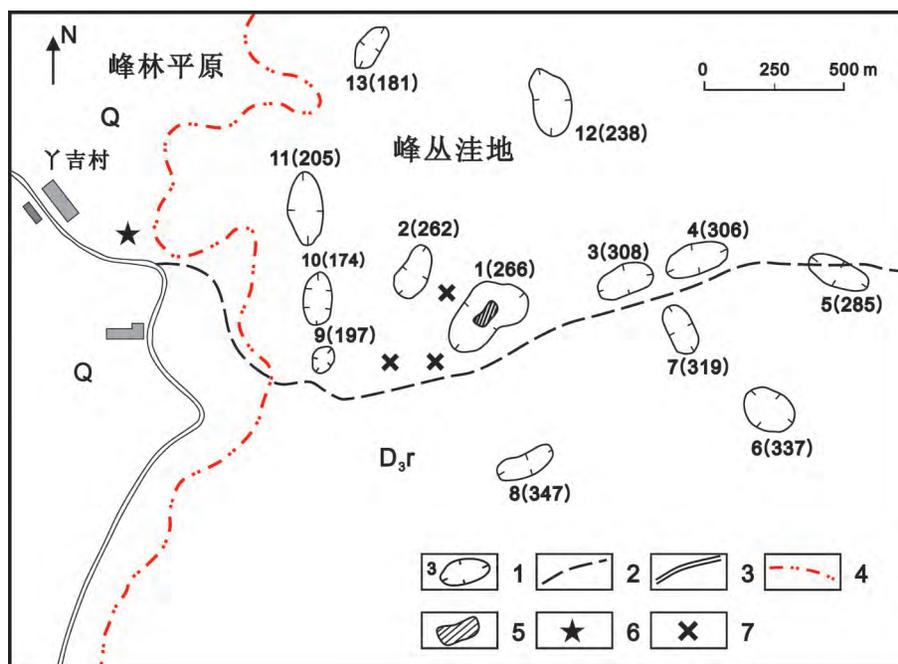
1 研究区概况

本研究以中国地质科学院岩溶地质研究所的桂林丫吉试验场作为研究对象。桂林丫吉试验场建于1986年,目的是研究喀斯特峰丛地区水文地质系统的运行规律^[17]。该试验场位于广西壮族自治区桂林市东南8 km处的丫吉村附近,为一个独立的喀斯特水文地质系统,总面积约2 km²(图1)。场区处在峰丛洼地和峰林平原的交界地带,试验场最高点海拔为652 m,场内洼地底部标高介于250~400 m,而附近的平原面海拔高度为150 m。该试验场是中国南方裸露喀斯特地区具有代表性的峰丛洼地喀斯特系统,场区地层约呈东南5°~10°倾斜,出露地层主要为上泥盆统融县组(D₃r)灰

岩,主要岩石成分为浅灰色致密质纯中厚层泥亮晶颗粒石灰岩^[17]。场区土壤基本为棕色石灰土,洼地内为第四纪冲积层,土壤分布不均匀,坡地一般仅有20~50 cm,洼地则可达到100~200 cm厚度。试验场的植被类型主要为灌丛,高度在120~180 cm之间,覆盖度达60%~80%,主要的物种组成为黄荆、欆木和青冈等。

研究区所在的桂林市属于亚热带季风气候区,主要气候特点为四季分明,热量丰富,光照充足和雨量充沛。根据桂林市气象站1951~2012年的年观测资料,本区多年平均气温为18.9℃,多年平均降雨量为1886 mm,该区从9月至次年3月为旱季,降雨量仅为年降雨量的29.7%,而4月至8月的雨季降雨量占年降雨量的70.3%^[18]。

丫吉试验场场区内分布有数个封闭洼地。本研究选取了具有代表性的1号洼地(25°14'56"N, 110°22'21"E)作为研究对象。1号洼地是一个封闭的峰丛洼地单元,流域汇水面积仅为0.431 km²^[19]。该洼地小流域为典型的喀斯特峰丛洼地地貌,地形起伏较大,最低点位于洼地底部,海拔为266 m,与周围山峰高差达300 m。洼地底部为第四纪冲积层,地形平坦,呈长条形,长轴为东北-西南方向,长约105 m,宽约47 m,面积4459.5 m²,仅占流域土



1. 洼地及其编号,括号内的数字为洼地标高(m) 2. 山间小路 3. 公路
4. 峰林平原与峰丛洼地界线 5. 洼地堆积泥沙取样区域 6. ¹³⁷Cs本底值取样点

图1 桂林丫吉试验场略图及取样位置

Fig. 1 Sketch of Yaji experimental site and sampling location

地总面积的 1.03%。流域内均为茂密的林草地, 主要生长喜钙、耐旱耐贫瘠的灌木和草丛。目前只有山间小路可达该洼地, 崎岖难行, 交通极为不便。小流域内主要是牧场, 并有灌木及茅草供当地居民砍伐作为燃料之用, 近几十年来没有进行过耕作。

2 样品采集与测试

2009年8月, 在丫吉村峰丛边缘的一块无侵蚀林草地采集了 ^{137}Cs 本底值土壤样品。该取样地为孤立岛状台地, 高出周围平原约10 m, 宽阔平坦, 植被茂密, 乔木为人工栽种的经济林, 地面草本植被的覆盖度达80%~90%左右。据调查, 上世纪50年代以来该取样地曾为农耕地, 近10多年退耕后开始栽种经济林, 地块并无灌溉设施, 基本没有侵蚀或堆积发生, 可用作 ^{137}Cs 本底值的取样地。 ^{137}Cs 本底值取样方法为网格法, 网格间隔为3 m×3 m, 使用荷兰Eijkelpamp公司生产的P05.02型土壤钻(内径8.0 cm)一共采集了9个土壤全样, 取样深度均大于30 cm以保证剖面中的 ^{137}Cs 全部采集。此外, 还在网格中心位置采集了一个土壤分层剖面样, 取样深度28 cm, 分层厚度3 cm。

同时, 在丫吉1号洼地内的不同位置采集了5个土壤分层剖面(图2)。在洼地中央位置(YJ-C)采用开挖剖面法, 按2 cm间隔分层采集连续土壤剖面分层样, 取样面积18 cm×18 cm, 取样深度38 cm, 共采集了19个土壤分层样。在洼地四周用荷兰Eijkelpamp公司的P05.02型土壤钻(内径8.0 cm)采集了4个土壤分层剖面, 分层厚度为8~12 cm, 取样深度40~41 cm。

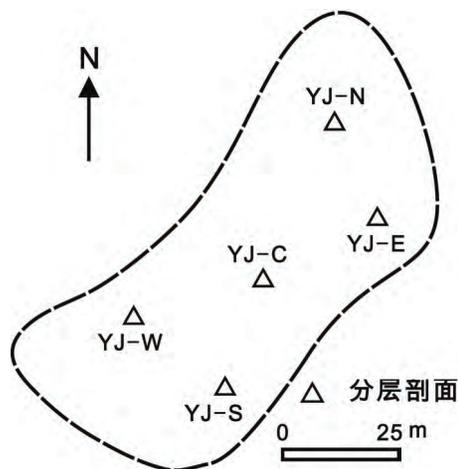


图2 丫吉1号洼地土壤剖面取样点示意图

Fig. 2 Sampling location in the sediment profiles in No. 1 depression of Yaji experimental site

土壤样品的 ^{137}Cs 含量在中国科学院成都山地灾害与环境研究所同位素实验室进行测定。样品经风干、研磨、过筛(2 mm)和称重, 封闭于样品盒中20天后, 取粒径小于2 mm部分供测试用。采用配备n型高纯锗探头(LOAX HPGe)的低能量、低本底 γ 能谱仪, 根据661.7 KeV谱峰面积测算了样品的 ^{137}Cs 含量。样品测重 ≥ 250 g, 测试时间 $\geq 50\ 000$ s, 测试误差为 $\pm 5\%$ (95%信度)。

3 结果与分析

3.1 研究区域 ^{137}Cs 本底值

^{137}Cs 本底值取样点位置及测试结果如图3a所示。本底值样地的10个土壤剖面的 ^{137}Cs 面积活度介于757.5~1271.4 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, 平均值1038.4 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, 变异系数为17.9%。据当地老乡介绍, 该地块自50年代以来一直为旱作耕地, 约10年前改种药用乔木。土壤分层剖面的 ^{137}Cs 深度分布与老乡的描述相符(图3b), 呈农耕地分布形态, 0~15 cm深度内 ^{137}Cs 含量基本一致, 平均为4.93 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; 往下 ^{137}Cs 含量有所降低, 15~19.5 cm和19.5~23.5 cm层位 ^{137}Cs 含量分别为3.88和2.66 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, 23.5 cm以下层位基本不含 ^{137}Cs , 剖面 ^{137}Cs 面积活度为1162.4 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 。本次研究采用了10个取样点 ^{137}Cs 面积活度的平均值1038.4 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ 为研究区域 ^{137}Cs 本底值。

3.2 洼地取样点剖面 ^{137}Cs 的深度分布

洼地土壤中的 ^{137}Cs 来源于核爆期间大气直接沉降于洼地的 ^{137}Cs 尘埃和被堆积泥沙带来的 ^{137}Cs 核素。理论上, 在无泥沙堆积的洼地, 土壤中的 ^{137}Cs 全部来源于大气直接沉降, 土壤剖面的 ^{137}Cs 面积活度等于当地的本底值; 有泥沙堆积的洼地土壤中, 除大气直接沉降外, 还有部分 ^{137}Cs 来源于沉积的泥沙, 沉积剖面的 ^{137}Cs 面积活度大于当地的本底值。

5个洼地取样点剖面的 ^{137}Cs 面积活度介于1256.6到1828.5 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$ (表1), 变异系数为19.4%。丫吉的 ^{137}Cs 本底值为1038.4 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, 5个取样点的 ^{137}Cs 面积活度均大于当地 ^{137}Cs 本底值, 分别为本底值的122.7%、121.0%、176.1%、166.4%和135.1%, 说明各取样点均发生了泥沙堆积。

5个洼地取样点的 ^{137}Cs 深度分布如图4所示。其中, 中央取样点剖面(YJ-C)的 ^{137}Cs 面积活度为1273.6 $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, ^{137}Cs 深度分布为典型的非耕作土壤形态。 ^{137}Cs 基本分布在0~26 cm深度内, 剖面中

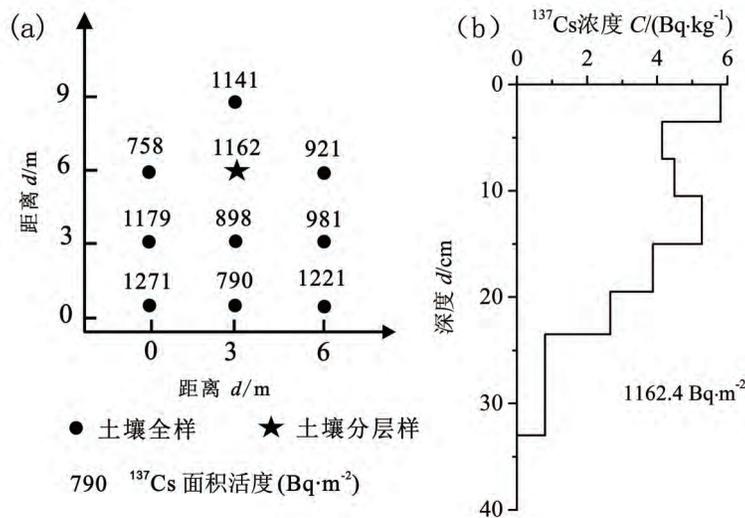


图3 丫吉 ^{137}Cs 本底值样点面积活度空间分布 (a) 和本底分层样的 ^{137}Cs 深度分布 (b)

Fig. 3 The ^{137}Cs inventories of the sampling locations at the reference plot (a) and ^{137}Cs depth distributions in the reference profile (b)

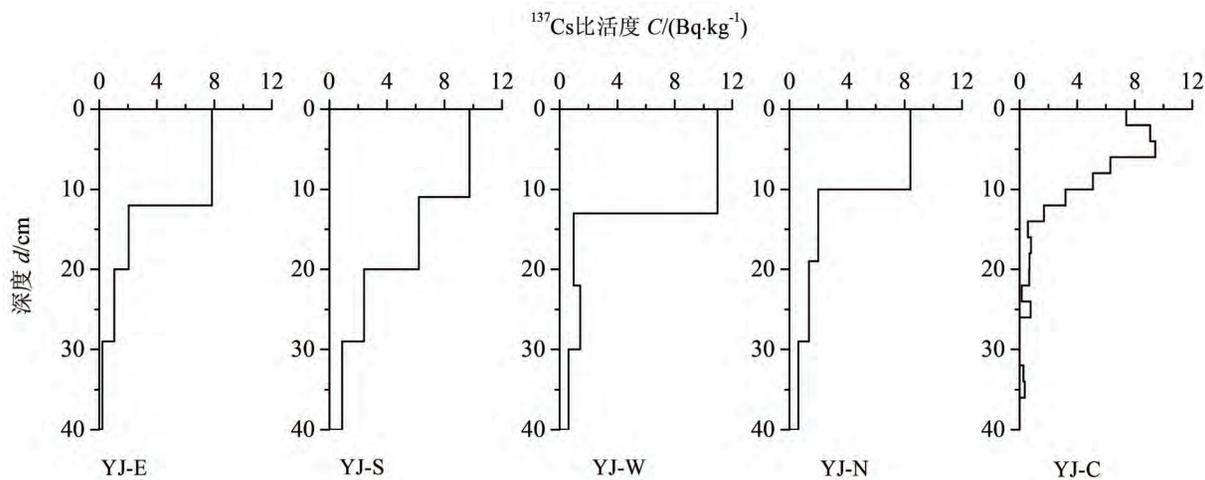


图4 洼地取样点剖面的 ^{137}Cs 深度分布

Fig. 4 ^{137}Cs depth distributions in 5 cores around the depression

表1 洼地5个取样点的 ^{137}Cs 与堆积特征
Table 1 Summary of the characteristic of ^{137}Cs and deposition of cores in the depression

样点编号	取样深度 /cm	^{137}Cs 面积活度 /($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}$)	容重 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1963~2008年	1963~2008年
				的泥沙堆积厚度/cm	的泥沙堆积速率 /($\text{cm}\cdot\text{a}^{-1}$)
YJ-C	38	1273.6	1.262	2.51	0.055
YJ-E	40	1256.6	1.247	2.36	0.053
YJ-S	40	1828.5	1.354	7.86	0.175
YJ-W	41	1728.0	1.378	6.74	0.150
YJ-N	41	1402.6	1.233	3.98	0.089

^{137}Cs 浓度的峰值出现在深度 4~6 cm 的次表层处, 其值为 $9.43 \pm 0.44 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$, 此深度向下, ^{137}Cs 含量迅速降低, 剖面深度 14 cm 以下的层位 ^{137}Cs 含量较低, 平均仅为 $0.49 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$; 深度 26 cm 以下基本不含 ^{137}Cs , 仅有个别层位检出 ^{137}Cs ; 此深度向上, 剖面的 ^{137}Cs 含量逐渐降低, 剖面顶层 0~2 cm 的 ^{137}Cs 含量为 $7.42 \pm 0.39 \text{ Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。其余 4 个剖面的 ^{137}Cs 面积活度介于 $1256.6 \sim 1828.5 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-2}$, 它们的 ^{137}Cs 深度分布基本一致, ^{137}Cs 主要分布在 0~10 cm 深度范围内, 往下 ^{137}Cs 含量急剧下降, 30 cm 以下仅含微量的 ^{137}Cs 。以 ^{137}Cs 面积活度最大、沉积最强烈的 YJ-S 孔为例, 该剖面表层 0~11 cm 层位的 ^{137}Cs 浓度达

到了 $9.73 \pm 1.18 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而 29 ~ 40 cm 深度的¹³⁷Cs 含量仅为 $0.9 \pm 0.18 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

3.3 洼地泥沙堆积速率的计算

目前, 已有部分喀斯特洼地泥沙堆积的研究成果见诸报端。相关研究报道中^[16, 19-20], 研究对象主要为农耕型洼地, 即洼地底部平坦的泥沙堆积区已开发为农田。对于此类型的洼地, 剖面中¹³⁷Cs 分布的深度和犁耕层深度的差值, 可以认为是地块 1963 年以来的堆积厚度, 据此可计算该洼地 1963 年以来的平均堆积速率^[19]。

本研究的洼地近 50 年以来未进行过耕作, 属无扰动非农耕类型, 泥沙堆积速率无法采用上述方法获得, 可通过测定无扰动沉积物沉积速率的方法进行计算。除 YJ-C 取样点外, 其余 4 个取样点剖面分层较粗(分层厚度达 8 ~ 12 cm), 剖面中 1963 年¹³⁷Cs 蓄积峰未能清晰显示; 另一方面, 本研究洼地泥沙堆积速率较低(如 YJ-C 剖面¹³⁷Cs 浓度的峰值仅出现在 4 ~ 6 cm 深度), 剖面中¹³⁷Cs 向下扩散和迁移的特性以及采样精度的影响, 有可能使得洼地泥沙堆积速率的计算结果存在一定的误差^[20-21]。基于以上两点的考虑, 本文没有采用经典的¹³⁷Cs 峰值深度判别法, 而是通过¹³⁷Cs 质量平衡模型计算丫吉洼地的泥沙堆积速率。

测定沉积物沉积速率的¹³⁷Cs 质量平衡法由 Walling 等于 20 世纪 90 年代提出并进行了改进, 当时主要用于调查英国 Exe 和 Culm 等一些河流河漫滩沉积物的沉积速率^[22-24]。使用质量平衡法研究泥沙沉积速率, 除需采集沉积物剖面外, 还需确定研究区域的¹³⁷Cs 本底值(Reference inventory)。该法通过对比河漫滩沉积物与本底值剖面的¹³⁷Cs 总量差异, 结合分析沉积物中的¹³⁷Cs 平均浓度, 可以计算 1954 年以来河漫滩沉积物的沉积厚度, 并进而计算沉积物的沉积速率。张信宝提出了一种简化的计算沉积物沉积速率的¹³⁷Cs 质量平衡模型^[21], 可通过该模型计算本研究的洼地泥沙堆积速率。该模型的假设是:¹³⁷Cs 沉降主要发生于 20 世纪 50 ~ 70 年代, 其中¹³⁷Cs 最大沉降量出现在 1963 年, 1963 年以前和以后的沉降量基本相等, 因此, 假设¹³⁷Cs 全部沉降于 1963 年。通过该模型计算泥沙堆积速率的表达式如下:

$$h_c = \frac{100(A - A_0)}{\bar{C} \cdot \gamma} \quad (1)$$

$$R = \frac{h_c}{n - 1963} \quad (2)$$

式中: h_c 为 1963 年以来泥沙堆积的厚度(cm); A 为取样点的¹³⁷Cs 面积活度($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$); A_0 为研究区域的¹³⁷Cs 本底值($\text{Bq} \cdot \text{m}^{-2}$); \bar{C} 为 1963 年以来堆积泥沙的平均¹³⁷Cs 浓度($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$); γ 为堆积泥沙的容重($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); R 为洼地泥沙堆积速率($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$); n 为取样年份(a)。

该模型中的一个主要参数是 1963 年以来堆积泥沙的平均¹³⁷Cs 浓度 \bar{C} , 下面讨论并确定 \bar{C} 的取值。洼地中央取样点剖面(YJ-C)的¹³⁷Cs 面积活度为 $1273.6 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中 0 ~ 2 cm 和 2 ~ 4 cm 层位的¹³⁷Cs 面积活度分别为 $157.1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $332.1 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, 即该剖面深度 2 cm 和 4 cm 以下层位的¹³⁷Cs 面积活度分别为 $1116.5 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $784.4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, 据此我们认为, 中央取样点剖面中相当于研究区¹³⁷Cs 本底值 $1038.4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 的位置应位于 2 ~ 4 cm 深度之间, 具体为 $2 + (4 - 2) \times (1116.5 - 1038.4) / 332.1 = 2.47 \text{ cm}$, 此深度可以认为是该取样点 1963 年以来的堆积泥沙厚度。洼地中央取样点剖面的泥沙堆积厚度为 2.47 cm, 和该剖面分层厚度 0 ~ 2 cm 相近, 据此, 我们初步确定取中央取样点剖面表层 0 ~ 2 cm 深度泥沙的¹³⁷Cs 浓度作为 1963 年以来堆积泥沙的平均¹³⁷Cs 浓度, 即 \bar{C} 取值 $7.42 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 以此用于计算各取样点的泥沙堆积速率。

取 $A_0 = 1038.4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$, $\bar{C} = 7.42 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, 采用上述简化质量平衡模型, 通过公式(1)和(2)计算了丫吉 1 号洼地各取样点 1963 ~ 2008 年间的泥沙堆积速率(表 1)。表 1 的计算结果中, 中央取样点(YJ-C) 1963 年以来的堆积泥沙厚度为 2.51 cm, 该值与分层面积活度判别法的计算值 2.47 cm 差别很小, 考虑到分层面积活度判别法和简化质量平衡模型这两种方法的原理是一样的, 为统一起见, 5 个取样点均采用简化质量平衡模型的计算结果。由表 1 的计算结果, 求算了丫吉洼地 1963 年以来的泥沙平均堆积厚度为 4.69 cm; 泥沙平均堆积速率为 $0.104 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3.4 洼地泥沙堆积模数的计算

根据研究洼地各取样点的泥沙平均堆积厚度、洼地底部堆积区域的面积、小流域面积等参数, 计算了丫吉 1 号洼地小流域 1963 ~ 2008 年间的泥沙堆积量和堆积模数。小流域面积为 0.431 km^2 ; 洼地底部堆积区域的面积为 4459.5 m^2 ; 洼地泥沙容

重取 5 个取样点测试结果的平均值 $1.27 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ 。洼地泥沙堆积模数由下式计算:

$$m = \frac{\gamma \cdot h_c \cdot S_d}{S_c(n - 1963)} \quad (3)$$

式中, m 为泥沙堆积模数 ($\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) γ 为土壤容重 ($\text{t} \cdot \text{m}^{-3}$) h_c 为泥沙堆积厚度 (m) S_d 为洼地底部堆积区域的面积 (m^2) S_c 为小流域面积 (km^2) n 为采样年份 (a)。

通过计算得到, 丫吉 1 号洼地小流域 1963 ~ 2008 年间的泥沙堆积量和泥沙堆积模数分别为 265.6 t 和 $13.68 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。在丫吉当地开展的调查得知, 由于洼地的滞流作用, 进入洼地的泥沙大部分沉积于洼地内, 其余小部分随径流流入落水洞, 进入地下管、洞系统。丫吉洼地的泥沙截留率没有进行系统研究, 根据之前在贵州普定、广西环江等地的研究成果^[14-15], 研究洼地的泥沙截留率取值介于 0.7 ~ 0.9, 丫吉洼地流域状况与这些洼地接近, 若取其平均值 0.8 计算, 则洼地的地面土壤流失模数为 $13.67 / 0.8 = 17.10 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。该初步研究结果表明, 由于丫吉试验场区内的森林植被自上世纪 50 年代以来基本未遭破坏, 因此洼地的地面水土流失相当轻微, 与之前相关研究取得的结论^[25] “西

南喀斯特地区植被未遭受破坏的坡地土壤地面流失速率低于 $20 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ”是一致的。

4 结 论

1) 通过在桂林市丫吉村峰丛边缘无侵蚀林草地的实地采样, 经过测试与分析, 确定研究区域¹³⁷Cs 本底值为 $1038.4 \text{ Bq} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

2) 在丫吉试验场 1 号洼地内采集了 5 个典型位置土壤剖面样品, 根据各取样点的¹³⁷Cs 含量和深度分布特征, 通过简化的¹³⁷Cs 质量平衡模型计算了该洼地小流域 1963 ~ 2008 年间的泥沙堆积厚度和泥沙堆积速率分别为 4.69 cm 和 $0.104 \text{ cm} \cdot \text{a}^{-1}$; 同时, 综合洼地取样点泥沙堆积厚度、洼地堆积区域面积与小流域面积等参数, 计算了小流域 1963 年以来的泥沙堆积量和堆积模数分别为 265.6 t 和 $13.68 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

3) 上述研究结果表明, 桂林丫吉试验场 1 号洼地的地面水土流失相当轻微, 与之前相关研究取得的结论“西南喀斯特地区原始植被未遭受破坏的坡地土壤地面流失速率低于 $20 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ”是一致的。

参 考 文 献

- [1] Ritchie J C, McHenry J R, Gill A C. Dating recent reservoir sediments[J]. *Limnology and Oceanography*, 1973, 18: 255-264.
- [2] 万国江, 林文祝, 黄荣贵, 等. 红枫湖沉积物¹³⁷Cs 垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪[J]. *科学通报*, 1990, 35(19): 1487-1490.
- [3] Zhang X, 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 Degradation and Development*, 1997, 8(1): 1-6.
- [4] Walling D E, Owens P N, Leeks G J L. Rates of contemporary overbank sedimentation and sediment storage on the floodplains of the main channel systems of the Yorkshire Ouse and River Tweed, UK[J]. *Hydrological Processes*, 1999, 13(7): 993-1009.
- [5] Terry J P, Garimella S, Kostaschuk R A. Rates of floodplain accretion in a tropical island river system impacted by cyclones and large floods[J]. *Geomorphology*, 2002, 42(3-4): 171-182.
- [6] 齐永青, 张信宝, 贺秀斌. 川中丘陵区和三峡地区小流域侵蚀产沙的塘库沉积¹³⁷Cs 断代[J]. *地理研究*, 2006, 25(4): 641-648.
- [7] 张信宝, 温仲明, 冯明义, 等. 应用¹³⁷Cs 示踪技术破译黄土丘陵区小流域坝库沉积赋存的产沙记录[J]. *中国科学(D 辑)*, 2007, 50(2): 254-260.
- [8] 文安邦, 张信宝, 李豪, 等. 云南楚雄九龙甸水库沉积剖面¹³⁷Cs、²¹⁰Pb_{ex} 和细粒泥沙含量的变化及其解译[J]. *泥沙研究*, 2008, 6: 17-23.
- [9] 李春梅, 王红亚. 省西南部麦岗水库沉积物的¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb 测年与沉积速率研究[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 215-219.
- [10] 王小雷, 杨浩, 丁兆运, 等. 云南抚仙湖近现代沉积速率变化研究[J]. *地理学报*, 2011, 66(11): 1551-1561.
- [11] 柴社立, 高丽娜, 邱殿明, 等. 吉林省西部月亮湖沉积物的²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 测年及沉积速率[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2013, 43(1): 134-141.
- [12] 许月卿. 土地利用变化的土壤侵蚀效应评价: 西南喀斯特山区的一个研究案例[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 1-3.
- [13] 白晓永, 张信宝, 王世杰, 等. 普定冲头峰洼地泥沙沉积速率的¹³⁷Cs 法测定[J]. *地球与环境*, 2009, 37(2): 142-146.
- [14] 张信宝, 白晓永, 刘秀明. 洼地沉积的¹³⁷Cs 法断代测定森林砍伐后的喀斯特小流域土壤流失量[J]. *中国科学(D 辑)*, 2011, 41(2): 265-271.
- [15] 李豪, 张信宝, 白晓永, 等. 桂西北喀斯特丘陵区峰丛洼地小流域泥沙堆积的¹³⁷Cs 示踪研究[J]. *泥沙研究*, 2010, 1: 17-24.

- [16] 何永彬,李豪,张信宝,等. 贵州茂兰峰丛森林洼地泥沙堆积速率的¹³⁷Cs示踪研究[J]. 地球与环境,2009,37(4):366-372.
- [17] 袁道先,戴爱德,蔡五田,等. 中国南方裸露型岩溶峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究—以桂林丫吉村为例[M]. 桂林: 广西师范大学出版社,1996: 1-4.
- [18] 郭小娇,姜光辉,汤庆佳,等. 典型岩溶石山包气带洞穴水流的水文过程浅析[J]. 中国岩溶. 2014,33(2):176-183.
- [19] 章程,蒋勇军,Lian Yan-qing,等. 利用 SWMM 模型模拟岩溶峰丛洼地系统降雨径流过程—以桂林丫吉试验场为例[J]. 水文地质工程地质,2007,3: 10-14.
- [20] 万国江. ¹³⁷Cs 及 ²¹⁰Pb_{ex} 方法湖泊沉积计年研究新进展[J]. 地球科学进展. 1995,10(2):188-192.
- [21] 张信宝,曾奕,龙翼. ¹³⁷Cs 质量平衡法测算青海湖现代沉积速率的尝试[J]. 湖泊科学,2009,21(6):827-833.
- [22] Walling D E, Bradley S B. Rates and patterns of contemporary floodplain sedimentation: A case study of the River Culm, Devon, UK[J]. Geographical Journal, 1989, 19(1): 53-62.
- [23] Walling D E, He Q. Interpretation of caesium-137 in lacustrine and other sediments: The role of catchment-derived inputs[J]. Hydrobiologia, 1992, 235/236: 219-230.
- [24] Walling D E, He Q. Use of fallout ¹³⁷Cs in investigations of overbank sediment deposition on river floodplains[J]. Catena, 1997, 29(3): 263-282.
- [25] 张信宝,王世杰,曹建华. 西南喀斯特山地的土壤硅酸盐矿物物质平衡与土壤流失[J]. 地球与环境,2009,37(2): 97-102.

Assessment of Sediment Rate of a Karst Hill Peak-cluster Depression Catchment Using ¹³⁷Cs Technique—A Case Study on Yaji Experimental Site

LI Hao¹, ZHANG Xinbao^{2,3}, WEN Anbang², CAO Jianhua⁴

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 4. Key Laboratory of Karst Ecosystem and Treatment of Rocky Desertification, Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: The Karst area of southwest China is one of the regions having the most fragile ecological environment in China. Soil erosion and rocky desertification caused by the former are considered as the most severe environmental concern in this region. However, the reliable studies on soil erosion and sediment in this region are limited and few studies using radionuclide tracing technique have been conducted in Karst environments. A study on sediment depositional rate was undertaken in a hill peak-cluster depression catchment in Yaji experimental site in Guilin City by using ¹³⁷Cs technique and the sediment depositional rate was assessed. The average sediment deposition rate and specific sediment yield of the depression were estimated to be 0.104 cm·a⁻¹ and 13.68 t·km⁻²·a⁻¹, respectively for the period from 1963 to 2008. Results indicate that the surface soil loss rate was slight in Karst mountain area having dense forest vegetation.

Key words: karst hill peak-cluster depression; sediment deposition; ¹³⁷Cs tracing technique; Yaji experimental site