

文章编号:1001-4810(2009)02-0181-08

贵州茂兰峰丛草地洼地小流域侵蚀产沙的 ^{137}Cs 法研究

何永彬^{1,3}, 李 豪^{1,3}, 张信宝^{1,2}, 严冬春^{1,3}, 文安邦¹

(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;

3. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要:在贵州茂兰峰丛洼地区的工程碑草地洼地典型小流域进行了洼地沉积泥沙 ^{137}Cs 示踪分析研究。研究结果表明:(1)草地洼地土壤剖面属于堆积土壤剖面, 土壤剖面中 ^{137}Cs 浓度分布特征反映了泥沙堆积与表层土壤侵蚀的信息。受岩土分布、微地形的影响, ^{137}Cs 初始沉降后出现不均匀再分布, 面积活度的空间变化较大, 变异系数为1.35, 不能表征土壤侵蚀状况。(2)根据草地洼地典型堆积农耕地土壤剖面A-1的 ^{137}Cs 浓度分布特征, 1963年以来的流域平均堆积泥沙数量是 $16.6\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 流域平均土壤侵蚀速率为 $45.95\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 约占侵蚀产沙数量63.88%的泥沙以地下流失的形式散失;(3)草地洼地小流域内地面土壤流失与地下土壤流失的相对贡献率分别是70.13%和29.87%;(4)以茂兰地区最大成土速率为依据推算出的允许土壤侵蚀量是 $13.51\text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, 草地洼地的土壤侵蚀危险程度极高。

关键词: ^{137}Cs 含量; 堆积剖面; 草地小流域; 侵蚀产沙; 喀斯特峰丛洼地; 茂兰, 贵州
中图分类号:S157.1; S124+.2 **文献标识码:**A

0 引 言

准确、可靠的石漠化山地土壤流失量数值, 对正确认识喀斯特山地石质化和石漠化的过程和机制, 判别喀斯特山地石漠化严重程度, 确定喀斯特山地的允许侵蚀量, 是非常重要的^[1,2]。除土壤侵蚀的径流小区和小流域实测等传统研究方法以外, 放射性同位素 ^{137}Cs 是国内外测定土壤流失量的一种重要方法^[3]。 ^{137}Cs 法已广泛应用于黄土、紫色土、黑土和红壤等均质土壤流失量的测定^[4]。在西南喀斯特地区, 已有初步研究认为, 由于裸岩面积比例高, 核爆期间沉降于喀斯特坡地地面的 ^{137}Cs 尘埃随径流直接流失量大,

以适用于均质土壤的 ^{137}Cs 法来测定喀斯特坡地土壤流失量结果偏大^[5], 现有 ^{137}Cs 示踪方法和估算模型不适用于非均质土壤喀斯特坡地^[6]。

^{137}Cs 法已广泛应用于湖泊、塘库和洪积平原等沉积物的断代和沉降速率的研究。湖泊、塘库沉积中第一个 ^{137}Cs 峰值通常是最大峰值, 指示全球 ^{137}Cs 沉降最多的1963年。根据 ^{137}Cs 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。万国江等在西南地区贵州红枫湖和云南洱海、程海和泸沽湖等湖泊^[7,8], 和张信宝等在川中丘陵区、三峡库区和黄土高原的一些塘库应用了沉积物 ^{137}Cs 法断代^[9,10]。裴建国对广西省马山县12个典型

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2006CB403203, 2007CB407206)、中国科学院知识创新工程项目(kzcx2-yw-306)和中国科学院水土保持研究所国家重点实验室基金项目(10501-109)

第一作者简介: 何永彬(1967—), 男, 在职博士生, 自然地理学专业。E-mail: heybware@sohu.com

通讯作者: 张信宝, 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zxbaoe@imde.ac.cn

收稿日期: 2008-12-21

洼地的实地调查发现,1960—2000 年的平均侵蚀模数为 $14.13 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$,其中1960—1980 年土壤流失深度可达 $0.5 \sim 2 \text{ cm/a}$,侵蚀模数达 $4.7 \sim 19.04 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$,平均为 $9.13 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ ^[11];国外Evan 根据泥沙堆积厚度推算了美国Cookeville 地区3 个非城镇化喀斯特小流域的产沙速率为 $11 \sim 128 \text{ mg/km}^2 \cdot \text{a}$,年平均产沙速率为 $111 \text{ mg/km}^2 \cdot \text{a}$ ^[12]。但有关喀斯特洼地侵蚀产沙的¹³⁷Cs 研究鲜有报道。

茂兰自然保护区是以世界上仅存的原生成片的中亚热带喀斯特常绿落叶阔叶混交林为保护主体的国家级自然保护区,地貌属于峰丛洼地、峰丛漏斗和峰丛槽谷所组成的典型裸露锥状喀斯特^[13]。自然保护区内,森林植被保存很好,但保护区周边草坡很常见,这些草坡多是在抗战和解放后“大跃进”期间由于森林植被大量遭受砍伐形成的。因此,外围草坡流域土壤侵蚀速率的可靠确定,对阐明茂兰自然保护区森林植被保护土壤和防止水土流失的作用具有重要的科学价值。

2007—2008 年期间笔者在黔南茂兰自然保护区外围的工程碑洼地,开展了¹³⁷Cs 法测定沉积速率的研究,采用¹³⁷Cs 断代法,确定核爆以来洼地泥沙沉积厚度,计算洼地泥沙堆积量,讨论小流域的土壤流失速率。本文报导的是此项研究的初步结果。

1 ¹³⁷Cs 法测定洼地泥沙堆积侵蚀速率的基本原理

在理想单一的小流域,由泥沙土壤剖面¹³⁷Cs 特征估算侵蚀产沙的相关模型主要有三种。

1.1 农耕地剖面的堆积侵蚀模型^[14]

由于耕作扰动的影响,农耕地土壤剖面中¹³⁷Cs 基本均匀分布于一定深度的土层内。假定犁耕层厚度保持不变,逐年堆积增加的土壤将不断抬高犁耕层的分布高度。同时堆积农耕地剖面不断受耕作的混合、搅拌作用,导致高浓度¹³⁷Cs 均匀分布深度大于犁耕层厚度。根据¹³⁷Cs 的时标特征,¹³⁷Cs 均匀分布的剖面深度和犁耕层厚度之差,为1963 年以来的堆积厚度,估算自1963 年以来采样点平均堆积泥沙速率 $w(\text{t/km}^2 \cdot \text{a})$ 的模型是:

$$w = \frac{10\,000x_m\gamma S_1}{NS_0} \quad (1)$$

式中 x_m 是土壤剖面的泥沙堆积厚度(cm), γ 是土芯容重(g/cm^3), S_1 是泥沙淤积面积(km^2), S_0 是流域

面积(km^2), N 是自1963 年以来的年数^[15]。

1.2 非农耕地流域表层土壤侵蚀产沙模型

沉积泥沙剖面¹³⁷Cs 分布与侵蚀环境变化和土壤侵蚀带来的泥沙¹³⁷Cs 含量有关。沉积泥沙剖面中峰值浓度¹³⁷Cs 出现在剖面中下部,是接受了核爆期间高浓度¹³⁷Cs 沉降所致。沉积剖面中第一个¹³⁷Cs 浓度峰值往往表征¹³⁷Cs 沉降最大的1963 年。在后期,沉积泥沙剖面接受了含有低浓度¹³⁷Cs 泥沙颗粒沉积,¹³⁷Cs 浓度自剖面表层到峰值深度表现出逐步增加趋势。

假定年均土壤侵蚀速率为常数,流域土壤颗粒组成与泥沙颗粒组成未发生分异,流域土地利用和泥沙输移比未出现变化,Zhang 建立了由泥沙剖面¹³⁷Cs 浓度分布特征估算1970 年后非农耕地流域表层土壤侵蚀产沙速率模型^[16]:

$$h = -1/\lambda n \ln C_{dn}/C_{d0} \quad (2)$$

式中, h 是地表土壤流失速率(cm/a), C_{dn} 是表土¹³⁷Cs 浓度(Bq/kg), C_{d0} 是土壤层中深度 x 的¹³⁷Cs 浓度(Bq/kg), n 是1970 年以来的年份数, λ 是¹³⁷Cs 浓度剖面形态系数(cm^{-1}),一般为0.25 或0.5。

1.3 流域侵蚀泥沙来源的¹³⁷Cs 示踪方法

对于可划分两种产沙单元的流域,一般可以利用单一核素示踪方法^[17,18]。一个流域内有两种主要源地土壤,这二种土壤的¹³⁷Cs 含量有明显差异,利用混合模型计算这二种土壤的相对产沙量:

$$C_d = C_a \cdot F_a + C_b \cdot F_b$$

$$F_a + F_b = 1 \quad (3)$$

式中; C_d 为坝库淤积泥沙¹³⁷Cs 含量(Bq/kg); C_a 为源地土壤 A 的¹³⁷Cs 含量(Bq/kg); C_b 为源地土壤 B 的¹³⁷Cs 含量(Bq/kg); F_a 为源地土壤 A 的相对来沙量(%); F_b 为源地土壤 B 的相对来沙量(%)。

理论上,存在季节性洪水淹没的喀斯特洼地,如洼地剖面为非农耕地剖面,¹³⁷Cs 峰值深度以上反映的是1963 年以来的地上堆积厚度,沉积物的¹³⁷Cs 含量分布曲线形态和沉积速率的计算方法与湖泊、塘库的情况相同。如洼地剖面为农耕地剖面,土壤剖面¹³⁷Cs 分布与泥沙堆积、犁耕层分布变化及侵蚀泥沙¹³⁷Cs 含量有关,沉积物的¹³⁷Cs 浓度分布曲线形态和泥沙堆积速率的计算方法同堆积农耕地。西南喀斯特地区峰丛洼地发育,其中一些峰丛洼地为封闭的小流域,坡面侵蚀形成的泥沙随径流进入洼地,除从落水洞流失的部分外,其余泥沙全部沉积于洼地内。部分通过落水洞流失泥沙很少的洼地小流域,由于沉积泥

沙量接近于流域的产沙量。所以可以根据洼地泥沙沉积剖面中 ^{137}Cs 浓度分布特征来测算洼地沉积泥沙量,并推算流域的平均侵蚀速率。

2 小流域概况和样品采集测试

2.1 流域概况

工程碑洼地位于茂兰县永康乡东北方向6.3 km的樟木坳,属于茂兰喀斯特森林自然保护区缓冲区。黔南地区一系列近南北向隔槽式褶皱中的茂兰向斜是控制研究区水文地貌的主要地质构造,以褶皱为主,断层次之。工程碑洼地是在茂兰地堑构造东侧正断层的次级断层基础上发育的一个典型的封闭性峰丛洼地。洼地小流域面积0.154 km²,洼地面积610 m²。

流域出露地层为石炭系中统上部的灰白色厚层石灰岩夹少量白云岩和燧石灰岩,以及下部的白色粗粒白云岩。周围峰丛丘陵高程760~880 m,相对高差40~120 m。洼地四周的丘陵坡地,上部多为极陡坡,坡度多大于40°;下部坡度较缓,15°~20°;中部坡地的坡度多为20°~40°。

洼地底部平坦,高程700 m,并发育有3个落水洞。流域地表径流全部汇入洼地,通过洼地土壤入渗和该3个落水洞排入地下暗河。据访问当地群众,喀斯特坡地入渗强烈,一般降水情况下坡地不产流,但暴雨或大暴雨时产生非常陡急的坡面径流,区域地下水位也急剧上升,造成洼地落水洞排水不畅,形成临时性积水。据当地技术人员介绍,洼地落水洞有时不但不排水,反而会冒水。洪水携带泥沙绝大部分沉积于洼地内,部分泥沙从落水洞随径流排入地下暗河。另外,落水洞冒水时也带入少量泥沙沉积于洼地内。

当地气候为亚热带湿润高原气候,年均降水量1 753 mm,雨季(4—9月)降水约占全年降水的80%。现丘陵顶部坡地多为次生林,中下部坡地为草本植被为主的荒草地,植被覆盖率<10%。原始植被破坏后,坡地土壤遭受了强烈的侵蚀,基岩裸露,土层浅薄分散,坡地分布有冲沟。坡地土壤为灰黑色石灰土,多分布于溶沟、溶槽中,坡脚有少量黄壤连片分布,洼地土壤为冲积土,深度可达80 cm以上,为灰褐色和暗褐色,呈块状结构,质地为重壤至中粘土。土层砾石含量约30%。据调查,研究区土壤犁层厚度20 cm。

工程碑草地洼地位置图见图1,工程碑草地洼地流域土地利用状况见图2,工程碑草地洼地洼底样点分布见图3。

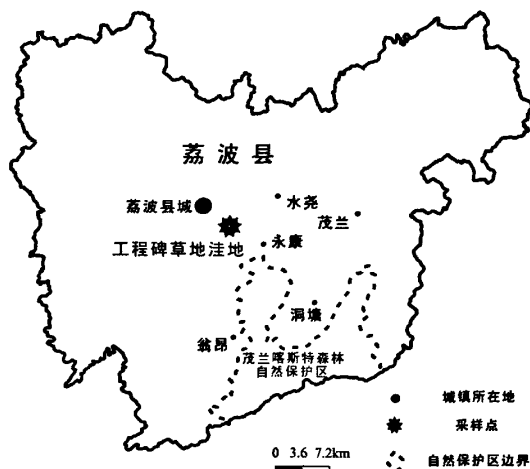


图1 荔波县茂兰自然保护区工程碑草地洼地位置
Fig. 1 Location of the Engineering Monument grass-covered depression in Maolan nature reserve, Libo county

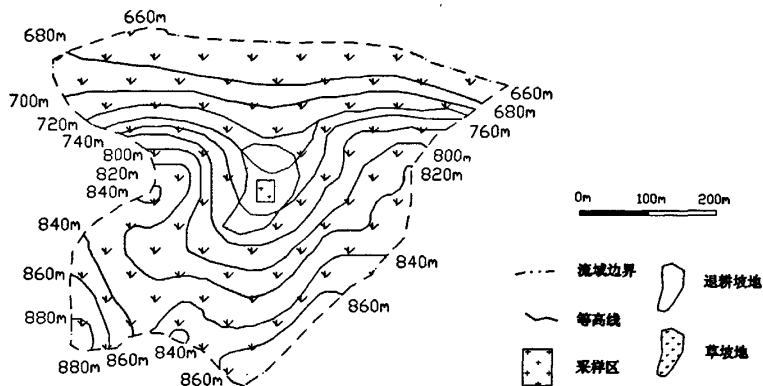


图2 茂兰工程碑草地洼地流域土地利用状况

Fig. 2 The land-use condition in the Engineering Monument grass-covered depression in Maolan

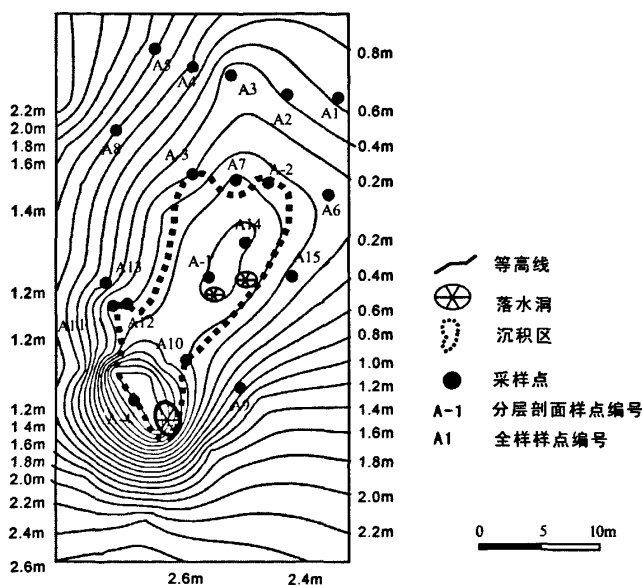


图3 茂兰工程碑草地洼地洼底样点分布图

Fig. 3 The arrangement map of sampling site at the bottom of the Engineering Monument grass-covered depression in Maolan

2.2 ^{137}Cs 样品采集和测试方法

在工程碑草地洼地进行了2次土壤样品采集。2007年3月进行第一次采样:在洼地底部,挖掘一个深度60 cm立坑,按2 cm分层采集沉积泥沙样品30个,另外在流域内用铲刀采集0~3 cm的表层土壤样6个;2007年12月进行第二次采样:首先布置4条间距3 m的网络样带,然后在每个样带上布置点距为2~3 m的采样点7~8个。土壤全样采用直径为6 cm的取样筒手动打入地下约40~60 cm直至石砾层,共采集15个土壤全样。分层土壤剖面样也是采用直径6 cm土钻手动压入土壤层,按10~12 cm的间隔分段获取土芯样品,取样深度直至石砾层,共采集3个土壤剖面样。

另外在茂兰石上森林附近的“水平洞”口的洪水冲刷淤积泥沙中各采集一个表土细土样和粗土样,在地下河出口谷地采集一个水稻田表土样。

采集的样品在中科院成都山地灾害与环境研究所进行预处理。样品经风干、研磨、过筛和称重后送四川大学物理系测试。测定仪器为配备n型高纯锗探头(LOAX HPGe)的低能量、低本底 γ 能谱仪。样品测重>100 g,测试时间>20 000 s,测试误差为 $\pm 5\%$ 。

3 结果与讨论

3.1 土壤剖面 ^{137}Cs 分布

工程碑草地洼地土壤剖面 ^{137}Cs 浓度分布情况见表1。工程碑草地洼地土壤剖面 ^{137}Cs 含量分布见图4。

工程碑草地洼地剖面中 ^{137}Cs 分布范围从剖面表层至40~60 cm深度,沉积土壤剖面中 ^{137}Cs 蓄积峰呈明显易辨单峰, ^{137}Cs 蓄积峰出现在剖面中下部, ^{137}Cs 峰值深度为20~40 cm,接近或大于犁耕层深度(20 cm),说明采样点出现一定堆积,属于堆积农耕地土壤剖面。

以分层厚度2 cm取样的A-1土壤剖面为例,土壤剖面中 ^{137}Cs 主要分布在0~44 cm的范围内,44 cm以下 ^{137}Cs 浓度极微。 ^{137}Cs 含量的峰值出现在32~34 cm,为 $(7.28 \pm 0.87)\text{Bq/kg}$ 。 ^{137}Cs 浓度在0~34 cm的土壤剖面中介于 $(4.55 \pm 0.55)\text{Bq/kg}$ 和 $(6.62 \pm 0.87)\text{Bq/kg}$ 之间,变化趋势属稳定增加。自34~48 cm, ^{137}Cs 浓度呈指数急剧下降,由 $(6.62 \pm 0.87)\text{Bq/kg}$ 减少到 $(0.25 \pm 0.05)\text{Bq/kg}$,平均下降速率为 $0.455\text{Bq/kg} \cdot \text{cm}$ 。自48~60 cm, ^{137}Cs 浓度随深度增加而逐步平缓下降至微量。

表 1 工程碑草地洼地土壤剖面¹³⁷Cs 浓度分布情况

Tab. 1 The vertical distribution of ¹³⁷Cs concentration in the Engineering Monument grass-covered depression

钻孔号	A-1	A-2	A-3	A-4
微地形	洼地底部	缓坡脚	陡坡脚	“落水洞”附近
取样深度/cm	60	60	40	60
1963 年 ¹³⁷ Cs 蓄积峰深度/cm	34	40	20	20
1963 年 ¹³⁷ Cs 峰值浓度/Bq/kg	7.28	22.06	5.43	4.38
¹³⁷ Cs 面积活度/Bq/m ²	689.67	9 454.72	2 888.26	1 736.13
表层 ¹³⁷ Cs 浓度 Bq/kg	5.58	7.5	5.2	3.86
草地表土样 ¹³⁷ Cs 浓度/Bq/kg	浓度变化范围(1.82±0.35)~(7.32±0.86)Bq/kg, 平均值 4.79Bq/kg。			

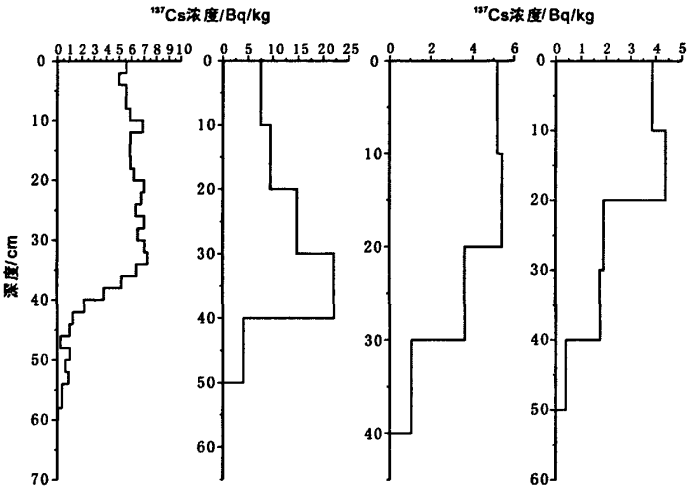


图 4 工程碑草地洼地分层样土壤剖面¹³⁷Cs 含量分布图

Fig. 4 Vertical distribution map of ¹³⁷Cs concentration along the layered soil profile of the Engineering Monument grass-covered depression

工程碑草地洼地土壤剖面中¹³⁷Cs 浓度峰值、¹³⁷Cs 浓度峰值的分布深度、土壤剖面表层¹³⁷Cs 浓度存在明显差异,说明工程碑草地洼地中不同的沉积点接受了含有不同¹³⁷Cs 浓度的泥沙沉积,并且泥沙沉积厚度不均匀。

位于坡脚地带 A-2 剖面的¹³⁷Cs 浓度和面积活度都异常高,¹³⁷Cs 峰值浓度达 22.06 Bq/kg,¹³⁷Cs 面积活度 9 454.72 Bq/m²,是本底值的 6.67 倍,说明 A-2 剖面在“核爆”期间接受了含有高浓度¹³⁷Cs 的坡地侵蚀物的堆积,致使 A-2 剖面中¹³⁷Cs 浓度从峰值深度至表层剧减,难以判断泥沙剖面的堆积特征,所以 A-2 剖面不能用作典型泥沙沉积剖面。同样位于坡脚地带的 A-3 与 A-4 剖面中¹³⁷Cs 峰值都出现在 10~20 cm 深度范围,¹³⁷Cs 浓度峰值以上范围内¹³⁷Cs 基本均匀分布,但没有明显的泥沙沉积特征,所以 A

-3 与 A-4 剖面也不能用作典型泥沙沉积剖面。相比之下,位于洼地底部的 A-1 剖面中¹³⁷Cs 浓度峰值以上高浓度¹³⁷Cs(>4Bq/kg)呈均匀分布,具有典型耕作扰动的堆积泥沙剖面特征。

3.2 土壤样品¹³⁷Cs 面积活度空间分布特征

工程碑草地洼地样点¹³⁷Cs 浓度和面积活度见表 2。

在工程碑草地洼地中的 19 个泥沙采样点中,1 个点未检测出¹³⁷Cs,18 个样点¹³⁷Cs 的浓度在 0.93~9.7 Bq/kg 之间变化。其中 2 个点的¹³⁷Cs 浓度<1 Bq/kg,5 个点介于 1~2 Bq/kg,6 个点介于 2~4 Bq/kg,5 个点>4 Bq/kg,平均浓度为 3.06 Bq/kg。18 个样品中 10 个样品¹³⁷Cs 浓度小于平均浓度,¹³⁷Cs 浓度的大小和空间分布出现较大变化。根据小流域各采样点的¹³⁷Cs 含量分布与洼地底部地形图进行比较,¹³⁷Cs 含

表2 茂兰工程碑草地洼地采样点¹³⁷Cs 含量状况

Tab. 2 ¹³⁷Cs content at the sampling points in the Engineering Monument grass-covered depression, Maolan

钻孔号	采样点 ¹³⁷ Cs 浓度 /Bq/kg	采样点 ¹³⁷ Cs 面积活度 /Bq/m ²
A-1	4.03	1 585.4
A-2	9.7	9 454.72
A-3	3.76	2 888.26
A-4	1.69	1 736.13
A1	1.17	439.48
A2	5.17	1 645.55
A3	3.21	810.39
A4	2.77	766.23
A5	0.95	283.25
A6	1.66	592.24
A7	1.72	437.51
A8	2.78	810.1
A9	0	0
A10	1.04	386.72
A11	5.18	2 074.02
A12	2.32	811.22
A13	2.22	779.24
A14	7.29	2 368.03
A15	0.93	332.72

量分布主要受土壤异质性和微地形因素的控制。草地洼地¹³⁷Cs 比活度>4 Bq/kg 的采样点分布在洼地内冲沟出口和洼地底部,而¹³⁷Cs 浓度<4 Bq/kg 的取样点都分布在洼地四周边坡上,总体上从洼地边缘到落水洞,¹³⁷Cs 含量呈减少趋势,说明在流水侵蚀作用下,洼地边缘出现较明显的土壤侵蚀,这与实际的土壤厚度与土石分布情况是一致的。另外在“核爆”期间由于接受了附近基本不吸附¹³⁷Cs 的裸露岩石流失的高浓度¹³⁷Cs,出现位于洼地坡脚地带和岩岗近旁样点A-2 的¹³⁷Cs 异常值情况。

工程碑草地洼地的19 个采样点中,¹³⁷Cs 面积活度变化在283.25 ~9 454.72 Bq/m² 之间。其中有5 个孔介于300~500 Bq/m²;6 个孔介于500~1 000 Bq/m²;3 个孔介于1 000~2 000 Bq/m²,3 个孔介于2 000~3 000 Bq/m²,只有1 个孔含量为9 454.72 Bq/m²,另外一个孔未有¹³⁷Cs 检出。不计未有¹³⁷Cs 检出的孔,平均面积活度为1 566.73 Bq/m²,18 个土壤样品中¹³⁷Cs 面积活度低于平均面积活度的土壤样品有

11 个,工程碑草地洼地面积活度的变异系数为1.35,反映了洼地¹³⁷Cs 初始沉降后的不均匀再分布特征。

综上,草地洼地采样点的¹³⁷Cs 含量在¹³⁷Cs 初始沉降后浓度变异与面积活度的空间变异较大,¹³⁷Cs 面积活度不能表征土壤侵蚀状况,现有参照对比¹³⁷Cs 本底值的土壤侵蚀定量模型不适用于估算非均质土壤的喀斯特洼地土壤侵蚀。但通过洼地沉积剖面¹³⁷Cs 的含量分布特征可以推算洼地泥沙堆积和地表土壤侵蚀状况。

3.3 泥沙堆积速率和表层土壤侵蚀速率

堆积农耕地剖面受耕作扰动、搅匀的影响,土壤剖面¹³⁷Cs 基本均匀分布在一定深度内。土壤剖面中犁耕层以上的高浓度¹³⁷Cs 反映了1963 年以来的泥沙堆积情况。高浓度¹³⁷Cs 分布深度与犁耕层厚度的差值,是1963 年以来的泥沙堆积厚度。根据A-1 典型堆积土壤剖面¹³⁷Cs 含量分布特征,高浓度¹³⁷Cs (>4 Bq/kg)的分布深度范围是0~38 cm,自1963 年以来泥沙堆积厚度是18 cm,运用公式(1),推算出1963 年以来的草地洼地泥沙堆积速率为16.6 t/km²·a。

A-1 土壤剖面中¹³⁷Cs 峰值浓度出现在32~34 cm,剖面表层至¹³⁷Cs 峰值深度范围内¹³⁷Cs 浓度变化逐步增加,表层¹³⁷Cs 浓度为5.58 Bq/kg,¹³⁷Cs 峰值浓度为7.28 Bq/kg,拟合确定的土壤剖面¹³⁷Cs 浓度减少速率(C_{dn}/C_{d0})为0.96。取λ 为0.25,运用公式(2),自1970 年以来起算,草地洼地小流域表土自然侵蚀速率是0.005 cm/a;按土壤容重0.919 g/cm³ 进行换算,草地洼地表土自然侵蚀速率为45.95 t/km²·a。

相应地,根据工程碑草地洼地的表层土壤侵蚀速率和泥沙堆积速率的数量对比情况,通过落水洞等途径的土壤地下漏失比例约为侵蚀产沙数量的63.88% 左右。

3.4 地表土壤流失与地下土壤流失比例

喀斯特地区特有的“双层结构”决定了喀斯特土壤侵蚀的特殊性,普遍存在通过“落水洞”、“竖井”和表层喀斯特深大裂隙等途径从地下流失情况^[9]。洼地小流域内侵蚀泥沙的两种来源是坡地表层土壤和裂隙深层土壤。但来源于流域内林地和坡地(含沟岸)表层土壤侵蚀比地下流失所产出泥沙含有较高的¹³⁷Cs;而深层土壤通过表层喀斯特深大裂隙从地下流失产出的泥沙基本不含¹³⁷Cs。因此根据源地表层土壤和地下河流悬沙或淤沙的¹³⁷Cs 含量(表3),利用配比法可以求算地面土壤流失和地下裂隙土壤流失的相对贡献率。工程碑草地洼地的地面土壤流失与地下裂隙土壤流失的相对贡献率分别是70.13%和29.87%。

表3 工程碑草地洼地土壤的 ^{137}Cs 浓度Tab. 3 ^{137}Cs concentration of the soil in the Engineering Monument grass-covered depression

采样点	土壤样品	平均 ^{137}Cs 浓度/Bq/kg
工程碑草地洼地	地面表土样	4.787 2
石上森林“平洞	泥沙细颗粒	0.4
地下河”出口	泥沙粗颗粒	1.43
谷地水稻田	水稻田表土	4.03

3.5 草地洼地流域的土壤侵蚀危险程度

按照茂兰自然保护区内有关地层岩石结构及化学组成分析资料,平均溶蚀速率为 0.5 m/a 、岩石比重为 2.7 g/cm^3 ,平均酸不溶物比例为 1% ,土壤容重为 0.919 g/cm^3 ^[19],则在这类碳酸盐岩分布区每年最大可形成土壤厚度为 0.015 mm/a ,相当于每年增加土壤质量 $13.51\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$ 。以茂兰地区最大成土速率为土壤允许侵蚀量,明显小于草地洼地小流域自然侵蚀速率 $45.95\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$,所以在草被覆盖条件下,坡地是不可能形成连续的土被覆盖。只有在低洼洼地与谷地等局部地区才可能出现较厚层土壤堆积。即使在有较厚层土壤堆积的低洼洼地与谷地,由于土壤地下流失的影响,土壤侵蚀危险程度也比较高,喀斯特山地“石漠化”的趋势难以逆转。

4 结 语

(1)草地洼地土壤剖面属于堆积土壤剖面,土壤剖面中 ^{137}Cs 含量分布特征反映了泥沙堆积与表层土壤侵蚀的信息。受岩土分布和微地形的影响, ^{137}Cs 初始沉降后再分布不均匀, ^{137}Cs 高浓度样点分布在洼地底部、冲沟口和坡脚地带,并且受裸岩影响,存在 ^{137}Cs 含量的异常点。 ^{137}Cs 面积活度的空间变化较大,变异系数为 1.35 ,不能表征土壤侵蚀状况。

(2)洼地底部的A-1土壤剖面为典型泥沙沉积剖面。自1963年以来,工程碑草地洼地小流域土壤侵蚀速率为 $45.95\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$,工程碑草地洼地的平均堆积泥沙数量为 $16.6\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$,说明约占侵蚀产沙数量 63.88% 的泥沙是通过落水洞从地下漏失的。

(3)利用配比法初步推算出工程碑草地洼地小流域内地面土壤流失与地下土壤流失的相对贡献率分别是 70.13% 和 29.87% 。

(4)以茂兰地区最大成土速率为依据推算出的允

许土壤侵蚀量是 $13.51\text{ t/km}^2\cdot\text{a}$,工程碑草地洼地的土壤侵蚀危险程度极高。

参考文献

- [1] 曹建华,袁道先,裴建国,等著.受地质条件约束的中国西南岩溶生态系统[M].北京:地质出版社,2005.1-9.
- [2] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等.西南岩溶山地坡地石漠化分类刍议[J].地球与环境,2007,35(2):188-192.
- [3] Zapata, F. (ed.) Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides[M]. Dordrecht, the Netherlands: Kluwer. 2002. 5-10.
- [4] 冯明义,文安邦.中国侵蚀泥沙 ^{137}Cs 示踪法研究进展[J].水土保持学报,2002,16(2):61-64.
- [5] 张治伟,傅瓦利,张洪,等.岩溶坡地土壤侵蚀强度的 ^{137}Cs 法研究[J].山地学报,2007,25(3):302-308.
- [6] 严冬春,文安邦,鲍玉海,等.黔中高原岩溶丘陵坡地土壤中 ^{137}Cs 分布[J].地球与环境,2008,36(4):342-347.
- [7] 万国江,林文祝,黄荣贵,等.红枫湖沉积物 ^{137}Cs 垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪[J].科学通报,1990,35(19):1490-1493.
- [8] 徐经意,万国江,王长生,等.云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的垂直分布及其计年[J].湖泊科学,1999,11(2):110-116.
- [9] 齐永青,张信宝,贺秀斌,等.川中丘陵区 and 三峡地区小流域侵蚀产沙的塘库沉积 ^{137}Cs 断代[J].地理研究,2006,25(4):641-648.
- [10] 张信宝,温仲明,冯明义,等.应用 ^{137}Cs 示踪技术破译黄土地丘陵区小流域坝库沉积赋存的产沙记录[J].中国科学(D辑),2007,37(3):405-410.
- [11] 裴建国,李庆松.典型岩溶峰丛山区土地利用与水土流失[J].水土保持通报,2006,26(2):94-99.
- [12] Evan A H, Stephen G S. Sediment storage and yield in an urbanized karst watershed[J]. Geomorphology. 2005, 70: 85-96.
- [13] 周政贤.茂兰喀斯特森林考察报告[C]//周正贤主编.茂兰喀斯特森林考察集.贵阳:贵州人民出版社,1987.1-20.
- [14] 贺秀斌,张信宝, D. E. Walling. 基于湖库沉积剖面 ^{137}Cs 变化的流域表层侵蚀速率计算模型[J].自然科学进展,2005,15(4):495-498.
- [15] 俞锦标,杨立铮,章海生,等著.中国喀斯特发育规律典型研究——贵州普定南部地区评价及其开发利用[M].北京:科学出版社,1990.41-47,114-116.
- [16] Zhang, X., D. E. Walling. Characterizing land surface erosion from cesium- 137 profiles in lake and reservoir sediments[J]. Environment Quality, 2005, 34: 514-523.
- [17] 张信宝,李少龙,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(3):210-213.
- [18] 文安邦,张信宝,王玉宽,等.长江上游云贵高原区泥沙来源的 ^{137}Cs 法研究[J].水土保持学报,2000,14(2):25-27,103.
- [19] 毛志中,张波.茂兰喀斯特森林区地质特点[J].贵州农学院学报,1987,2(2):51-63.

^{137}Cs method study on soil erosion and sediment yield in grass-covered peak cluster depression in Maolan, Guizhou

HE Yong-bin^{1,3}, LI Hao^{1,3}, ZHANG Xin-bao^{1,2}, YAN Dong-chun^{1,3}, WEN An-bang¹

(1. *Institute of Mountain Hazards and Environment, CAS, Chengdu, Sichuan 610041, China;*

2. *State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment,*

CAS, Xi'an, Shanxi 710075, China; 3. Graduate School, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract: Sand and clay sediments are studied by means of ^{137}Cs tracing test in typical grass-covered peak cluster depression in Maolan, southern Guizhou. It proves that: The grass-covered soil profile in depression is formed by accumulation, and the ^{137}Cs concentration variation with the depth of the profile reflects the information of sediment accumulation and surface soil erosion. Affected by earth-rock distribution and micro topography, the spatial redistribution of the ^{137}Cs after primary fallout is uneven, and ^{137}Cs inventories occurs greater spatial variation with the variation coefficient being 1.35, which shows that the ^{137}Cs inventory can not characterize the status of soil erosion. According to the ^{137}Cs concentration distribution along a typical profile A-1, the sediment accumulation rate and the natural surface soil erosion rate are respectively $16.6 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ and $45.95 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$, which shows that about 63.88% of the eroded surface soil is removed by way of underground loss. The relative contribution ratio of surface soil loss and underground soil loss are respectively 70.13% and 29.87%. By comparison to the utmost soil formation rate $13.51 \text{ t/km}^2 \cdot \text{a}$ in Maolan, the risk of soil erosion in the Engineering Monument grass-covered depression is higher.

Key words: ^{137}Cs content; accumulated profile; grassland small catchment; soil erosion and sediment yield; peak cluster depression; Maolan, Guizhou