

西南喀斯特流域泥沙来源、输移、平衡的思考 ——基于坡地土壤与洼地、塘库沉积物¹³⁷Cs含量的对比

张信宝^{1,2}, 白晓永^{2,3}, 李豪⁴, 冯腾⁵, 彭涛^{2,3},
严东春¹, 何永彬⁶, 鲍玉海¹, 汪阳春¹

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院普定喀斯特生态系统观测研究站, 贵州 普定 562100; 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. 四川农业大学, 成都 611130; 5. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125; 6. 云南大学 云南省地理研究所, 昆明 650223)

摘要: 总结了西南喀斯特地区坡地土壤和洼地、塘库沉积泥沙的¹³⁷Cs比活度资料, 并进行了对比, 分析流域泥沙来源。坡地地面流失轻微的, 汇水面积小于0.5 km²的微小流域, 流域产沙主要源于地下流失(裂隙土)和沟岸侵蚀(沟壁土); 坡地地面流失强烈的, 主要源于坡地地面流失(坡地表层土壤)。地下流失和沟岸侵蚀是小流域和较大流域的主要产沙方式, 且有随着流域面积增大, 产沙贡献率越高的趋势。由于裂隙土和沟壁土都基本不含¹³⁷Cs, ¹³⁷Cs单一示踪法不能区分这两种源地土体的产沙贡献率。建议采用多元示踪法, 研究流域的泥沙来源。区分裂隙土和沟壁土的产沙贡献率, 可考虑尝试磁性法和孢粉法。通过沉积物¹³⁷Cs断代等方法确定洼地、河流滩地和塘库泥沙淤积量, 结合径流小区和水文站输沙量资料, 分析不同类型洼地、河流滩地和塘库的泥沙截留率, 分析河流泥沙输移比。在查明泥沙来源, 泥沙输移比和输沙量(或产沙量)的基础上, 确定流域泥沙平衡, 结合径流研究成果, 建立喀斯特流域产沙模型。

关键词: 喀斯特流域; 泥沙来源; 输移; ¹³⁷Cs含量

中图分类号: X141 文献标识码: A 文章编号: 1672-9250(2017)03-0247-12 doi: 10.14050/j.cnki.1672-9250.2017.03.001

不同于非喀斯特流域, 除地表过程, 喀斯特流域的侵蚀产沙和泥沙输移还存在地下过程。喀斯特坡地的表层岩溶带可视为可以看作为一个布满“筛孔”的石头“筛子”, 溶沟、溶槽和洼地可视为被土壤塞住的形状不一, 大小不等的“筛孔”。除地表侵蚀外, 喀斯特坡地还存在地下漏失。“筛孔”内的土壤, 以土壤蠕滑或被径流侵蚀携带的方式, 充填土下岩石中的孔、裂、洞^[1-2]。由于表层岩溶带“筛孔”发育, 喀斯特坡地地表径流系数低, 据普定和环江径流小区资料, 多不到5%^[3]。“筛孔”内的部分充填土体, 有可能通过管道侵蚀产沙, 被地下径流带人地下管、洞系统。进入地下管、洞系统的径流, 部分以泉的方式出露, 补给沟道径流, 其余的进入地下暗河, 最终汇入地表河流。地下径流携带的部分泥沙可能沉积于地下管、洞系统和地下暗河内,

先期沉积的泥沙也可能重新被径流冲蚀启动。洼地小流域的坡地地表产流携带的泥沙直接或沿沟道短距离运移后, 进入洼地。由于洼地的滞流作用, 进入洼地的泥沙部分沉积于洼地内, 其余的随径流流入落水洞, 进入地下管、洞系统。部分喀斯特地区洪水季节, 区域地下水位上升, 一些洼地的落水洞成为冒水洞, 因此洼地沉积泥沙可能含少量外来泥沙。非洼地小流域, 坡地地表产流携带的泥沙进入沟道后, 被输移进入河流。部分喀斯特地区的河、沟时而出露地表为地上河、沟, 时而落入地下为地下河、沟, 相继交替出现。地表河流的谷地平原, 特别是滩地部分有泥沙淤积发生。

¹³⁷Cs是20世纪50~70年代大气层核试验产生的放射性尘埃, 半衰期30.17年, 主要随降水沉降到地面, ¹³⁷Cs沉降到地面后, 随即被表层土壤强烈吸

收稿日期: 2016-02-28; 改回日期: 2016-12-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0502300、2016YFC0502102); 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2013CB956700); 国家科技支撑计划(2014BAB03B02); 国家自然科学基金(U1612441、41571130074、41571130042); 贵州社会发展科技攻关计划项目(2012-6015、2013-3190、201742920512120000); 中国科学院院地合作项目(2014-3)。

第一作者简介: 张信宝(1946-), 男, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zxbao@imde.ac.cn.

附,基本不被淋溶和植物摄取,其后的运移主要伴随土壤或泥沙颗粒的运动。北半球1963年的 ^{137}Cs 沉降量最大(美国和前苏联签订禁止大气层核试验的前一年,两国开展了大当量的大气层核试验)。上世纪80年代以来, ^{137}Cs 广泛应用于土壤流失量测定,塘库沉积物断代,泥沙来源及其输移的研究^[4-6]。西南喀斯特地区万国江等1990年在贵阳附近的红枫湖开展了沉积物 ^{137}Cs 断代研究^[7],Wang等2008年开展了关岭石板桥水库沉积物的 ^{137}Cs 断代^[8]。笔者的研究团队2006年承担了国家重点基础研究发展计划(973项目)“西南喀斯特山地石漠化与适应性生态系统调控”的“西南喀斯特山地土壤侵蚀过程与水土流失”课题,在贵州普定、茂兰和广西环江等峰丛洼地区,运用 ^{137}Cs 技术开展了比较系统的洼地小流域土壤流失量的研究,也尝试研究了洼地和塘库沉积泥沙的来源^[9-26]。此外,张笑楠、冯腾和蒋忠诚等在广西环江、平果等地,张治伟、付瓦利和魏兴萍等在重庆也开展了喀斯特坡地土壤侵蚀和洼地沉积物断代的 ^{137}Cs 法研究^[27-33]。

查明不同尺度域的流域产沙、输移,确定泥沙平衡,是西南喀斯特关键带研究的重要内容,本文拟通过源地土体、洼地沉积泥沙和塘库沉积泥沙的 ^{137}Cs 比活度资料的汇总和对比分析(大部分源于已发表文献,部分未发表)探讨西南喀斯特流域的泥沙来源,并对今后流域泥沙来源、输移和平衡的研究工作的提出相关建议。

1 ^{137}Cs 本底值样地土壤和不同类型源地土壤的 ^{137}Cs 含量

1.1 ^{137}Cs 本底值

2006~2009期间973课题组在广西环江^[8]、桂

林和贵州龙里^[10]、普定^[13]采集了 ^{137}Cs 本底值。4个样地的特征值和 ^{137}Cs 本底值(表1)。环江、龙里和普定3个样地的 ^{137}Cs 深度分布见图1。环江旱稻田和龙里旱地的 ^{137}Cs 基本均匀分布于深度18cm以内的犁耕层,耕作土的 ^{137}Cs 比活度分别为5.11~5.65 Bq/kg,平均5.38 Bq/kg和4.72~6.63 Bq/kg,平均5.83 Bq/kg,由于 ^{137}Cs 的扩散入渗,犁底层中也有少量 ^{137}Cs 检出。普定草地土壤的 ^{137}Cs 深度分布不同于耕作土,表土层(0~3cm)的 ^{137}Cs 比活度 15.67 ± 1.81 Bq/kg,略低于3~6cm次表层(22.79 ± 2.38 Bq/kg),向下 ^{137}Cs 比活度随深度的增加呈指数衰减,深度15cm以下无 ^{137}Cs 检出。尽管存在样地代表性和部分样地样品数量太少的问题,表1中的值仍大致反映出 ^{137}Cs 本底值自北向南,自东向西递减的趋势。 ^{137}Cs 本底值自北向南递减与美国和前苏联的大气层核试验均在北半球高纬度地区进行有关;自东向西递减与来自低纬印度洋的西南季风气流影响越来越大有关。

1.2 坡地表层土壤的 ^{137}Cs 含量

1.2.1 草灌地土壤

2007年,973课题组对广西环江生态站白云岩草灌坡地^[9,12]和贵州清镇王家寨石灰岩草灌坡地^[13]土壤的 ^{137}Cs 空间分布进行了较详细的研究,从坡顶到坡麓布设了一条宽3m的取样带,按一定间隔布置大面积样方(1m×3m),挖取样方内全部土壤作为土壤全样,同时还采集了土壤分层剖面样品。由于土层薄,分层剖面样和土壤全样的取样深度均多不到30cm。长275m,坡度37°的环江坡地共采集了19个土壤全样,平均 ^{137}Cs 比活度12.0 Bq/kg(5.48~24.72 Bq/kg),平均 ^{137}Cs 面积活度 261.1 Bq/m^2 (120.3~992.5 Bq/m²)。长47.3m,

表1 贵州、广西、重庆和广东7个样地的特征值和 ^{137}Cs 本底值

Table 1 Characteristics and ^{137}Cs reference inventories of 7 sampling sites in Guizhou, Guangxi, Chongqing and Guangdong provinces

位置	土地类型	土壤类型	样品数 /个	^{137}Cs 面积活度 /(Bq/m ²)	取样年份	^{137}Cs 面积活度 /(Bq/m ²)(2009年值)	备注
贵州普定	平坦草地	黄壤	15	805.9	2006	752.1	973项目组 ^[13]
广西环江	平整旱地	沙壤土	31	955.3	2006	891.6	同上 ^[8]
贵州龙里	旱稻田	水稻土	19	997.7	2007	952.8	同上 ^[10]
广西桂林	平整旱地	冲积土	10	1 038.4	2009	1 038.4	同上
重庆中梁山	草地	黄壤	2	1 536.8	2007	1 464.7	贾红杰 ^[31]
重庆南川	草地	黄壤	1	1 948.0*	2006	1 818.1	张治伟 ^[30]
广东阳山	草地	石灰土	16	1 433.6	2006	1 338.0	张素红 ^[33]

注: * 值可能偏高。

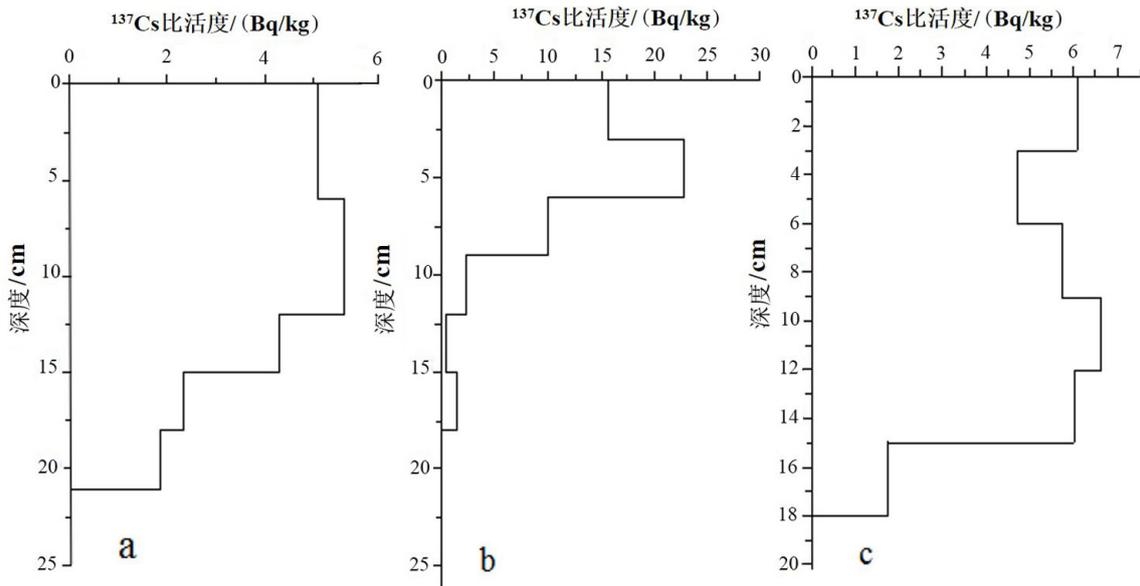


图 1 广西环江旱稻田 (a)、贵州龙里旱地 (b) 和普通草地 (c) ¹³⁷Cs 本底值样地土壤的 ¹³⁷Cs 深度分布

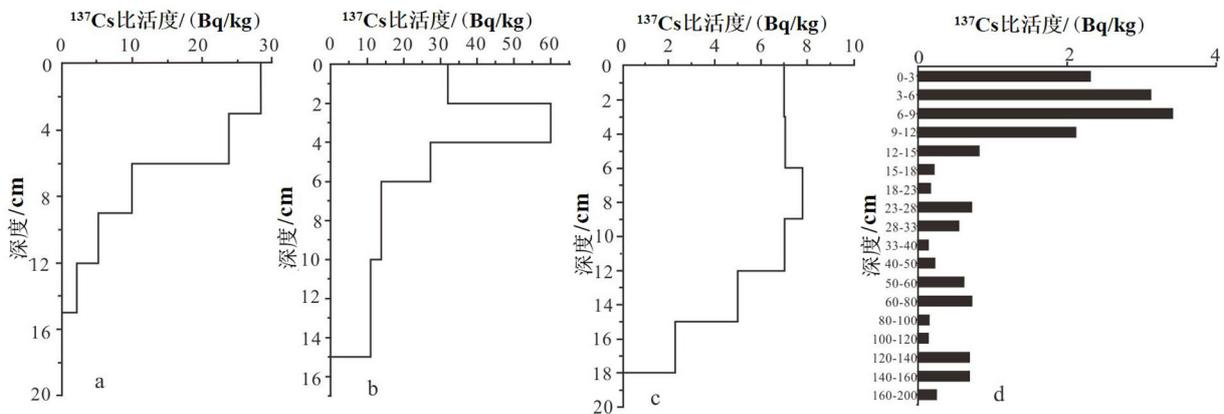
Fig.1 The ¹³⁷Cs depth distributions in the soils based on ¹³⁷Cs reference sites of the rainfed paddy fields in Huanjiang , Guangxi Province (a) , rainfed land in Longli , Guizhou Province (b) and grass land in Puding , Guizhou Province (c)

坡度 22° 的清镇坡地共采集了 13 个土壤全样, 平均 ¹³⁷Cs 比活度 26.1 Bq/kg (9.1 ~ 56.9 Bq/kg) , 平均 ¹³⁷Cs 面积活度 312.0 Bq/m² (144.7 ~ 440.2 Bq/m²) (表 2)。两个坡地土壤的 ¹³⁷Cs 深度分布分别见图 2a、b, 两坡地的比活度虽高 (12.0 Bq/kg , 26.1 Bq/kg) , 但土层薄, 角砾多, <2 mm 粒度的土壤质量厚度仅分别为 20.9 g/cm² 和 16.04 g/cm² , ¹³⁷Cs 面积活度不高, 分别为 261.1 Bq/m² 和 312.0 Bq/m²。两坡地土壤的 ¹³⁷Cs 面积活度远低于 ¹³⁷Cs 本底值, 主要不是土壤流失的缘故, 而是土壤少, 岩石不吸附 ¹³⁷Cs 核爆期间随降水沉降到坡地表面的部分 ¹³⁷Cs 尘埃随未能被土壤吸附, 随径流流失的缘故^[9, 12-13]。

其它草灌坡地土壤的 ¹³⁷Cs 比活度也都较高, 4.79 ~ 19.7 Bq/kg, 表 2 中非农耕地 10 个点的平均值 12.56 Bq/kg。荔波工程碑洼地草坡地土壤的 ¹³⁷Cs 比活度偏低 (4.79 Bq/kg) , 可能是退耕地的缘故。

1.2.2 坡耕地土壤

2007 年 973 课题组对普定陈旗小流域退耕地土壤的 ¹³⁷Cs 空间分布进行了较详细的研究。研究样地为上游垭口附近赵家田村退耕 15 年左右的退耕草灌地, 坡度 12°。土层薄, 大部分厚度小于 20 cm; >2 mm 角砾含量 20% ~ 40%。取样样地面积 3 m × 3 m, 分成 1 m × 1 m 的 9 个样格。每个方格测定裸岩面积率后, 挖取 20 cm 深度内的全部土样。9 个样



a-广西环江生态站草灌地; b-贵州清镇王家寨草灌地; c-贵州普定陈旗退耕地; d-广西环江石灰岩裂隙土

图 2 坡地土壤的 ¹³⁷Cs 深度分布

Fig.2 The ¹³⁷Cs depth distributions in soil of slopes

表2 喀斯特坡地土壤的¹³⁷Cs含量
Table 2 The ¹³⁷Cs concentrations and inventories in soil of karst slopes

取样位置	土地、土壤类型	地质、地形要素	取样方法	样品数 /个	¹³⁷ Cs比活度 /(Bq/kg)	¹³⁷ Cs面积活度 /(Bq/m ²)	取样 年份	备注
非农耕地								
贵州清镇王家寨	草灌地,含角砾 黑色石灰土	石灰岩全坡坡地,坡长 47.3 m,坡度 22°	样方挖土 (1 m×3 m)	13	26.1 (9.1~56.9)	312.0(144.7~ 440.2)	2007	973 课题组 ^[13]
广西环江生态站	草灌地,含角 砾黑色石灰土	白云岩全坡坡地,坡长 275 m,坡度 37°	样方挖土 (1 m×3 m)	19	12.0 (5.48~24.72)	261.1 (120.3~992.5)	2007	张笑楠 ^[27]
广西环江古周 成义屯洼地	林地,石灰土	坡度 35°左右	表土多点混合	3	9.12 (6.39~10.66)	—	2007	973 课题组 ^[10]
广西桂林 丫吉洼地	林地,含角砾黑 色石灰土	石灰岩坡地,坡度 30° ~40°	表土 多点混合	3	19.17 (11.78~24.86)	—	—	973 课题组
广西环江古周	林地,石灰土	坡度 30°左右	土壤剖面法	1	16.9	—	2007	张笑楠 ^[27]
广西环江古周	林地,石灰土	坡度 15.5°~54.5°	土壤剖面法	3	15.2 (5.1~23.5)	949.2 (571.2~1 345.5)	2007	冯腾 ^[28]
广东连州	草灌地,石灰土	—	取样筒	7	9.42	998.03	2006	张素红 ^[33]
普定石人寨洼地	林草地,石灰土	石灰岩坡地 25°~>35°	表土 多点混合	5	5.75 (3.33~9.48)	—	2007	973 课题组 ^[22]
贵州荔波茂兰 坡格洼地	林地	石灰岩坡地 30°~>35°	表土 多点混合	6	7.12 (5.20~8.35)	—	2007	973 课题组 ^[16]
贵州荔波茂兰 工程碑洼地	草地(部分为 退耕地)	石灰岩坡地 15°~30°	表土 多点混合	6	4.79 (1.82~7.32)	—	2007	同上 ^[15]
平均值	—	—	—	—	12.56	—	—	—
其它	—	—	—	—	~	—	—	—
普定陈旗	水稻土	谷地	表土 多点混合	2	4.36 (4.35,4.36)	—	2007	同上
农耕地								
贵州普定 陈旗赵家田	退耕地,含角砾 石灰土	石灰岩坡地,3 m×3 m 地,坡度 12°	样方挖土 (1 m×1 m)	9	6.16 (4.37~8.79)	341.6 (160~554)	2007	973 项目组
重庆市中梁山	菜地黄壤	石灰岩坡地,坡长 220 m, 坡度 10°~35°	土壤剖面法	4	3.8 (3.2~4.1)	—	2009	魏兴萍 ^[32]
同上	撂荒地黄壤	同上	同上	4	2.5 (1.8~3.1)	—	同上	同上
同上	坡耕地,黄壤	石灰岩坡地,坡长 18 m,坡 度 23%	取样筒	8	—	783.0(34.2~ 1 750.1)	2007	贾红杰 ^[31]
重庆南川	坡耕地,黄壤	石灰岩坡地,坡长 40 m,坡 度 11.2°	取样筒	5	—	1 391.5 (1 090.6~1 869.8)	2006	张治伟 ^[30]
重庆南川	坡耕地,黄壤	石灰岩坡地,坡长 40 m,坡 度 25.4°	取样筒	5	—	854.9(540.5~ 1 244.9)	同上	同上
广西环江古周	坡耕地,石灰土	石灰岩坡地,坡度 30°左右	土壤剖面法	1	4.8	—	2007	张笑楠 ^[27]
广西环江古周	坡耕地,石灰土	石灰岩坡地,坡度 24°	土壤剖面法	3	3.3 (2.3~4.3)	754.0 (438.2~1 161.1)	2007	冯腾 ^[28]
广西环江古周 成义屯洼地	梯坡地,石灰土	石灰岩坡地,坡度 15°	表土 多点混合	3	5.53 (4.25~6.29)	—	2007	973 课题组 ^[10]
广东连州	坡耕地	—	取样筒	1	3.46	260.8	2006	张素红 ^[33]
普定石人寨	坡耕地,石灰土	石灰岩垭口坡地,10° ~15°	表土 多点混合	4	1.34 (0.85~1.78)	—	2007	973 课题组 ^[22]
普定陈旗	坡式梯地,石 灰土	石灰岩,10°~15°	表土 多点混合	10	2.64 (1.04~4.37)	—	2007	—
平均值	—	—	—	—	3.72	—	—	—

格¹³⁷Cs比活度介于4.37~8.79 Bq/kg,平均6.16 Bq/kg。¹³⁷Cs面积活度介于160~554 Bq/m²,平均341.6 Bq/m²。土层较厚处土壤剖面的¹³⁷Cs深度分布见图2c,¹³⁷Cs基本均匀分布于深度16 cm的犁耕层土层内。表2中9个点的农耕地¹³⁷Cs比活度平均值3.72 Bq/kg,其它点的值1.34~5.53 Bq/kg,均低于赵家田村值。表2中9个点的农耕地¹³⁷Cs面积活度,重庆南川最高1391.5 Bq/m²,最低广东连州260.8 Bq/m²,分别为当地¹³⁷Cs本底值的71.4%和18.2%。喀斯特坡地农耕地¹³⁷Cs面积活度低于本底值,可能既有核爆期间土壤未能吸附全部大气沉降的¹³⁷Cs的缘故,也有¹³⁷Cs随土壤流失而流失的缘故。

1.3 裂隙土的¹³⁷Cs含量

碳酸盐岩表层岩溶带,岩层裂隙发育,多充填有土状物质。石灰岩表层岩溶带。粗脉状土体充填的垂向裂隙发育(土脉),宽带从不足1 cm到>1 m不等,深度从数cm到的土壤数m不等。土脉间距数十cm到数m不等。白云岩表层岩溶带,细裂隙密布,宽度数mm到数cm不等,也多为土状物质充填,深度>1 m的鲜见不多。石灰岩表层岩溶带裂隙土的单位面积量多于白云岩。

2009年冯腾在广西环江一新修道路断面分层采集了4个石灰岩裂隙土剖面样^[28],测定了¹³⁷Cs含量,其中深度最大的裂隙土剖面的¹³⁷Cs深度分布(图2d),¹³⁷Cs比活度深度分布为非扰动土形态,¹³⁷Cs峰值比活度(3.1 Bq/kg)分布于3~9 cm次表层,向下随深度增加而急剧减少直至15 cm。深度15 cm以下土层断续含有的少量¹³⁷Cs(<0.6 Bq/kg),应该是含¹³⁷Cs粘土颗粒随径流向入渗所致。

2 喀斯特流域泥沙来源的初步认识

2.1 ¹³⁷Cs示踪法确定泥沙来源的基本原理

¹³⁷Cs分布于表层土壤,深度20 cm以下土层基本不含¹³⁷Cs,可以利用以下的混合模型计算表层土对流域产沙的贡献率。

$$A = X/Y \quad (1)$$

式中,A为表层土对流域产沙的贡献率;X为径流泥沙(或沉积泥沙)的¹³⁷Cs比活度;Y为表层土¹³⁷Cs比活度(Bq/kg)。

上世纪80年代以来,不仅国外^[4,35-39],国内也有不少流域泥沙来源的¹³⁷Cs示踪研究成功范例,如黄土高原沟间地和沟谷地的相对产沙量^[40-43]和川中丘陵区^[44]、云南东川小江流域的泥沙来源^[45]。

地面流失(坡地表层土壤),地下漏失(岩石孔、裂、洞充填的土体,文中统称裂隙土)和沟岸侵蚀(沟壁土)是喀斯特流域的三种主要产沙方式。喀斯特坡地土壤,无论是非耕作土还是耕作土都含¹³⁷Cs,平均比活度分别为12.56 Bq/kg和3.46 Bq/kg,而裂隙土和沟壁土产沙基本不含¹³⁷Cs,通过径流泥沙(或沉积泥沙)与表层土壤¹³⁷Cs比活度的对比,因此可以定性或定量确定喀斯特地区坡地表层土壤对流域产沙的贡献。

2.2 洼地小流域洼地泥沙来源

2.2.1 耕作洼地

2006~2009年973课题组在贵州普定/荔波和广西环江等峰丛洼地地区,选择容易发生积水的6个洼地^[10,14-16,18,22],开展了洼地沉积物¹³⁷Cs法断代,反演小流域坡地侵蚀速率的研究(表3)。除普定石人寨小流域外,其余5个洼地1963年以来的泥沙沉积厚度介于2~18 cm,流域侵蚀速率介于1.0~55.8 t/(km²·a)^[10,14-16,18]。由于文化大革命后当地村社疏于管理,1979年左右石人寨洼地小流域毁林开荒严重,导致强烈的坡地土壤侵蚀和洼地泥沙沉积。1979年以来洼地沉积泥沙厚度74.1 cm,流域平均侵蚀速率2315 t/(km²·a)^[22]。这6个洼地均为农田,沉积泥沙和耕土层土壤年年犁耕混合,如1963年以来的泥沙沉积厚度不大,即使洼地土壤的¹³⁷Cs比活度也难以表征近年沉积泥沙的¹³⁷Cs比活度。只有普定石人寨洼地,1979年以来平均沉积泥沙厚度74.1 cm,是犁耕层深度(20 cm)的数倍,原犁耕层的¹³⁷Cs比活度对表层土的¹³⁷Cs比活度影响不大,因此通过洼地表层土与坡地土壤的¹³⁷Cs比活度的对比,分析洼地沉积泥沙来源。石人寨小流域的土地利用,5个孔的位置、¹³⁷Cs特征值和¹³⁷Cs、黏粒(<0.002 mm)含量的深度分布见图3。

洼地5个孔表层土的¹³⁷Cs比活度介于1.99~4.44 Bq/kg,平均2.80 Bq/kg。此值介于坡耕地和林草地土壤的¹³⁷Cs比活度之间,分别为1.34 Bq/kg和5.75 Bq/kg,很好地说明了洼地沉积泥沙主要来源于坡耕地和林草地表层土壤。位于西坡灌草地坡脚下方的孔B比活度最高,4.44±0.53 Bq/kg;东坡坡耕地坡脚下方的孔D最低,1.99 Bq/kg;南、北坡坡脚下方的孔E、C和洼地中部的孔A,比活度分别为2.25、3.11和2.20,介于孔B和孔D之间。洼地表层土的¹³⁷Cs比活度明显受相邻坡地土地类型影响,这很好地说明了坡地流失的土壤,主要堆积

表3 1963年以来洼地沉积泥沙的¹³⁷Cs含量、厚度和流域侵蚀速率
Table 3 The ¹³⁷Cs concentrations and thicknesses of the depression sediments deposited and estimated erosion rates of the catchments since 1963

洼地名称	位置	取样年份	洼地面积/ 流域面积 /ha	土地利用	孔数 /个	平均面积活度 /本底值 /(Bq/m ²)	表土层(10 cm) ¹³⁷ Cs比活度 /(Bq/kg)	1963年以来 洼地沉积厚度 /cm	1963年以来 流域侵蚀速率 t/(km ² ·a)
石人寨 ^[22]	贵州 普定	2007~ 2008	0.22/5.4	次生林和草地占 75% , 其余为耕地	5	7 692.9	3.58	74.1*	2315*
中坝 ^[14]	贵州普定	同上	0.40/36	较茂密的次生林	8	1 246.76	5.18	6	19.3
马官 ^[18]	贵州 普定	同上	0.44/45	较茂密的次生林 , 少量耕地	6	1350	4.78	8	22.6
坡格 ^[16]	贵州荔波	同上	0.07/42.6	较茂密的原始森林	8	952.1	5.11	2	1.0
工程碑 ^[15]	贵州 荔波	同上	0.06/15.4	较茂密的 次生林和草地	4	3916.1	6.0	18	20.7
古周 ^[10]	广西 环江	2007~ 2009	0.44/41.8	下部陡坡(25°~35°) 的 1/3 为坡耕地 余者和 上部极陡坡(>45°) 为茂密的森林	7	2 001.5	3.79	16.4	55.8
丫吉	广西桂林	2009	0.45/43.1	茂密的次生林	5	1 497.8/1 038.4	7.42	4.57	13.0

注: * 值可能偏高。

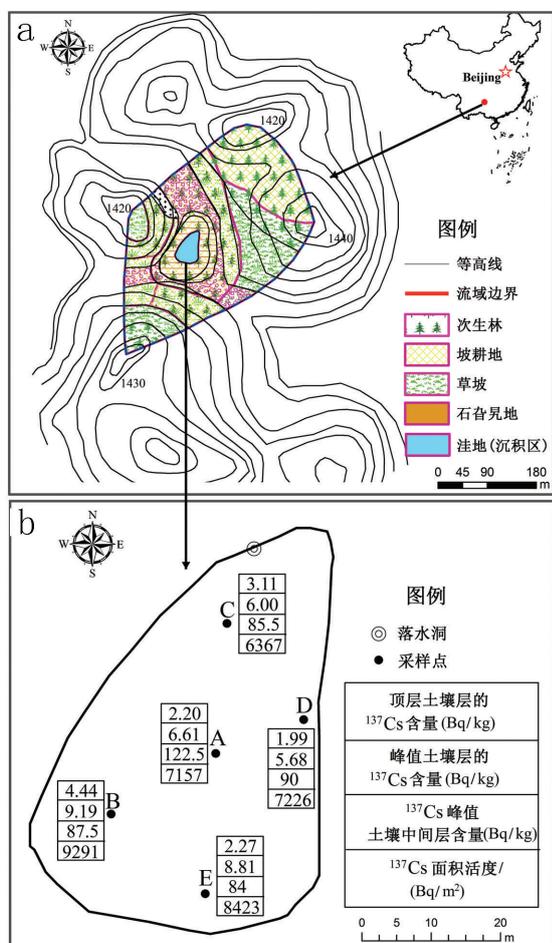


图3 石人寨洼地小流域土地利用现状 (a) ,
¹³⁷Cs 采样孔位置和¹³⁷Cs 特征值 (b)

Fig.3 Present land use condition (a) , location of cores sample and ¹³⁷Cs characteristics of cores (b) in Shirenzhai catchment

于坡脚下方的洼地,虽经犁耕的横向运移混合作用,¹³⁷Cs比活度仍和上方坡地土壤密切相关。由上可见,石人寨洼地的沉积泥沙主要来源于坡地表层土壤,不含¹³⁷Cs的裂隙土和沟壁土无明显贡献。除古周洼地外,其余4个洼地表层土的¹³⁷Cs比活度介于3.58~6.0 Bq/kg,与本底值农田样地犁耕层的¹³⁷Cs比活度相当(5.38 Bq/kg,5.83 Bq/kg),也表明不含¹³⁷Cs的裂隙土和沟壁土来沙无足轻重。古周洼地表层土¹³⁷Cs比活度3.79 Bq/kg,是¹³⁷Cs比活度较低的坡耕地来沙比重较大的缘故。由上可见,以洼地沉积泥沙为代表的洼地小流域产出泥沙主要来源于坡地表层土壤,裂隙土(地下漏失)和沟壁土(沟壁侵蚀)的贡献无足轻重。

2.2.2 非耕作洼地

桂林丫吉1号洼地为经常发生积水的非耕作洼地,坡地为1958年砍伐后自然恢复的较完密林地。2009年973课题组在洼地内采集了5个孔的泥沙剖面样品,洼地内5个孔的位置和中央剖面的¹³⁷Cs深度分布见图5。和一般耕作洼地土壤中¹³⁷Cs基本呈均匀分布不同,丫吉1号洼地土壤的¹³⁷Cs深度分布为典型的非耕作土壤形态,¹³⁷Cs峰值比活度9.25 Bq/kg位于深度4~6 cm的次表层,向下,¹³⁷Cs比活度随着深度的增加呈指数衰减,深度16 cm以下土层基本不含¹³⁷Cs,0~2 cm表层泥沙的¹³⁷Cs比活度7.42 Bq/kg。根据5个孔的平均¹³⁷Cs比活度与本底值的差值和表层土壤的¹³⁷Cs比活度及土壤容重,求得1963年以来洼地平均泥沙沉积厚度4.57 cm,再根

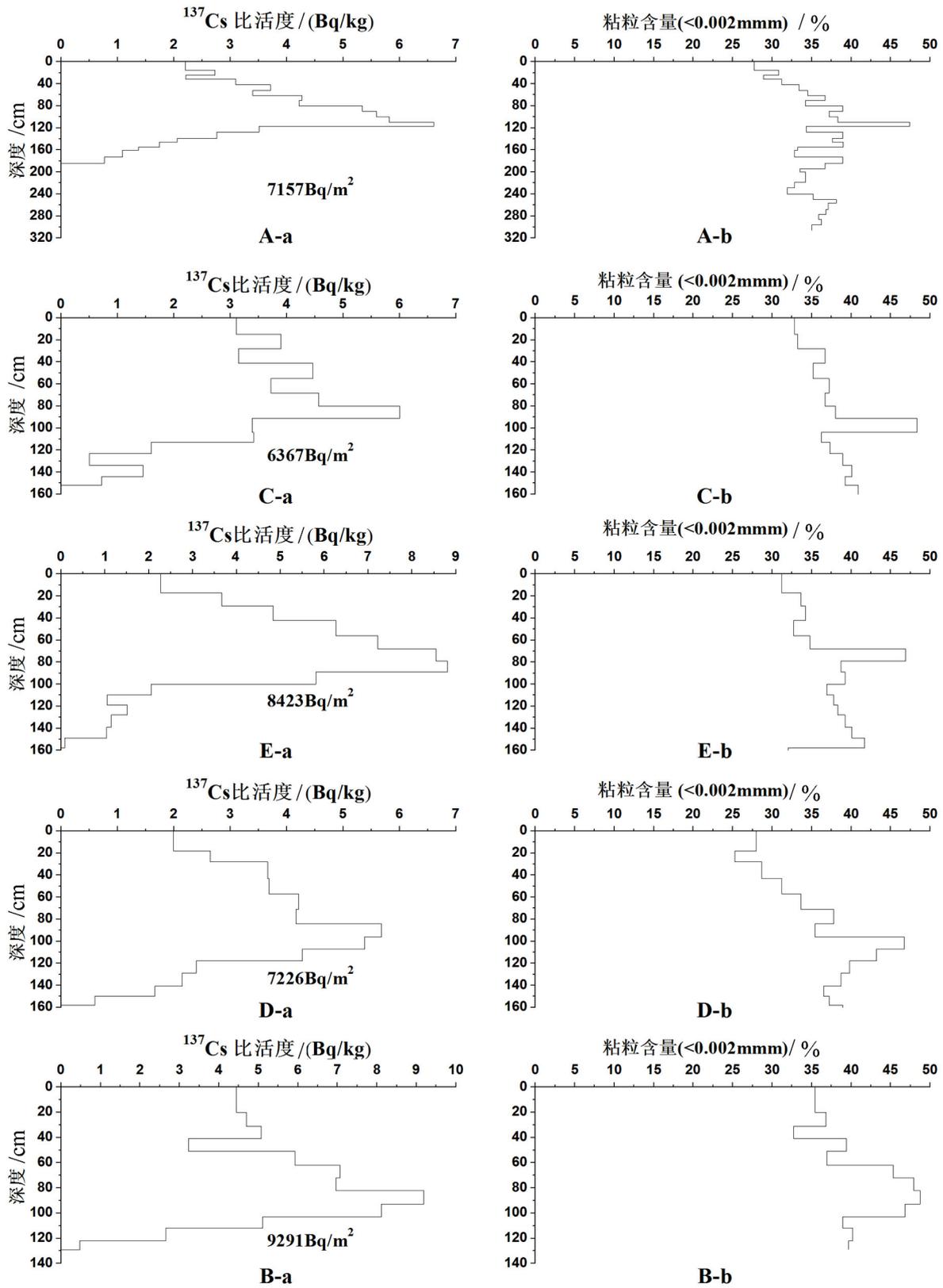


图 4 石人寨洼地 5 个孔的¹³⁷Cs和黏粒 (<0.002 mm) 含量的深度分布

Fig.4 Depth distributions of ¹³⁷Cs and clay (<0.002 mm) of five cores in Shirenzhai Depression

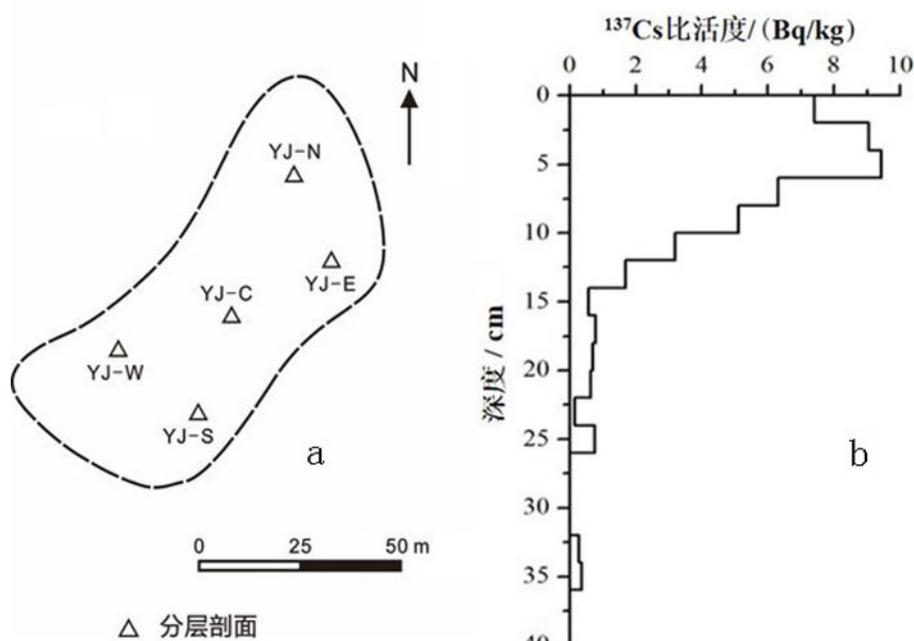


图5 桂林丫吉1号洼地5个取样孔的位置(a)及中央孔的 ^{137}Cs 深度分布(b)

Fig.5 Location of five sampling cores (a) and ^{137}Cs depth distribution of the central core in No. 1 Yaji depression, Guilin

据洼地面积和流域面积,进一步求得1963年以来的流域平均侵蚀速率为 $13.0 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,表层泥沙的 ^{137}Cs 比活度 $7.42 \text{ Bq}/\text{kg}$ 仅为林地土壤 $19.17 \text{ Bq}/\text{kg}$ (表2)的38.7%。这表明地下流失和沟壁侵蚀是流域的主要产沙方式,洼地沉积泥沙主要来源于不含 ^{137}Cs 的裂隙土和沟壁土,林地的侵蚀速率远低于流域平均值 $13.0 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,可能仅为此值的1/3。沟壁土和裂隙土的贡献比例,无法作出判断。

2.3 非洼地小流域塘库泥沙来源

2.3.1 贵州普定陈旗小流域

贵州普定陈旗小流域汇水面积 1.3 km^2 ,出露岩层为向下游缓倾的三叠系中统关岭组灰岩和泥灰岩。流域为丘陵地貌,无洼地。坡地中下部为梯式坡地,中上部为次生阔叶林,沟头堰口附近为灌草地,谷地内为稻田。坡地土壤为黄色石灰土,谷地为水稻土。坡地中下部有季节性泉水出露,沟道内有多处冒水洞,沟口有一长流上升泉。泉的下方有一个小池塘,面积不足1亩。2007年,在泉和池塘之间的沟道内,布设了一个水文观测点。流域内布置了幼林、阳坡灌丛地、梯式坡地、阴坡灌草地、火烧迹地、复合植被等6个面积 $580 \sim 2477 \text{ m}^2$ 不等的坡面径流小区,径流系数均低于0.05。我国西南岩溶坡地典型的土地利用类型,建立了6个径流小区。973课题组2007年采集了沟口池塘沉积泥沙剖面样品(图6),2008年收集了3个小区5次沉积池内

的泥沙样品(表4)。坡式梯地径流池泥沙的平均 ^{137}Cs 比活度 $3.04 \text{ Bq}/\text{kg}$,和坡式梯地土壤的 $2.64 \text{ Bq}/\text{kg}$ (表2)非常接近,显然径流池泥沙来源于坡地土壤,径流池泥沙的 ^{137}Cs 比活度可以代表坡地土壤的 ^{137}Cs 比活度,因此其他径流小区径流池泥沙的 ^{137}Cs 比活度也可以代表相应土地利用类型土壤的 ^{137}Cs 比活度。沟口池塘沉积泥沙的 ^{137}Cs 深度分布见图6。取样最深层位 $96 \sim 86 \text{ cm}$ 的 ^{137}Cs 比活度 $3.51 \text{ Bq}/\text{kg}$,向上呈随深度减少而降低的趋势。表层 $0 \sim 8 \text{ cm}$ 的 ^{137}Cs 比活度 $1.48 \text{ Bq}/\text{kg}$,与出水口监测点2008年收集的径流泥沙的 $1.59 \text{ Bq}/\text{kg}$ 相当。取两

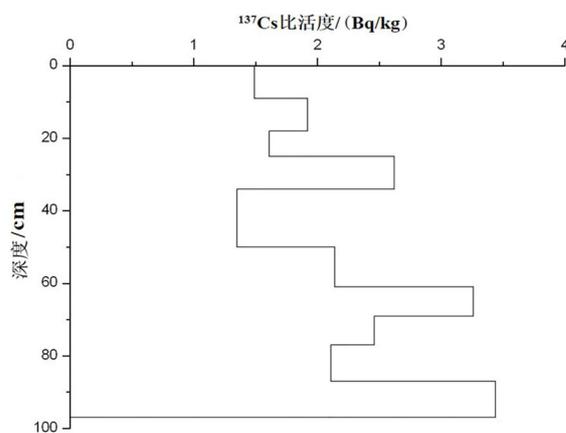


图6 陈旗沟口池塘沉积泥沙的 ^{137}Cs 深度分布

Fig.6 The ^{137}Cs depth distribution of pond sediments in Chenqi Catchment

表 4 陈旗径流小区径流池泥沙的¹³⁷Cs比活度

Table 4 The ¹³⁷Cs concentrations in sediments collected from Chenqi runoff plot tanks

径流小区	面积/m ²	径流系数	产沙模数/(t/km ²)	取样时间	¹³⁷ Cs比活度/(Bq/kg)
坡式梯地(4号池)	2 112.93	0.68 ^[23]	7.93 ^[23]	2008.7.6	2.94
同上	同上			2008.7.6	3.13
退化阳坡灌丛(5号池)	2 477.31	4.53 ^[23]	62.25 ^[23]	2008.7.24	2.80
同上	同上			2008.7.26	3.21
阴坡灌草(6号池)	1 974.11	3.08 ^[23]	2.24 ^[23]	2008.7.6	5.63
出水口监测点	1.3 km ²	—	—	2008. 6.12、7.6、7.26 和 8.4 的混合样	1.59

值的平均值 1.54 Bq/kg 表征陈旗小流域输出泥沙的¹³⁷Cs比活度, 此值仅分别为坡式梯地径流池泥沙的 50.7%, 退化阳坡灌丛的 51.2% 和阴坡灌草的 27.4%。显然, 陈旗小流域的输出泥沙不仅仅来源于坡地表层土壤, 还来源于基本不含¹³⁷Cs的沟壁土和裂隙土(含其他地下孔、洞、隙中的土体)。流域输出泥沙的¹³⁷Cs比活度仅为坡式梯地和退化阳坡灌丛径流池泥沙一半左右, 远低于阴坡灌草, 沟壁土和裂隙土应不低于 50%。沟壁土和裂隙土的贡献比例, 无法作出判断。

2.3.2 其他小流域泥沙¹³⁷Cs比活度

2008 年, 973 课题组采集了贵州普定贾官堡冒水洞沉积泥沙, ¹³⁷Cs比活度 2.22 Bq/kg; 六谷冒水洞沉积泥沙, 未检出¹³⁷Cs; 荔波坡格洼地附近石上森林“平洞地下河”出口泥沙, 1.43 Bq/kg^[15-25]; 广西环江长沙所生态站小水库表层沉积泥沙, 1.80 Bq/kg。以上值与陈旗小流域的 1.54 Bq/kg 相近, 低于坡耕地耕作土平均¹³⁷Cs比活度 3.72 Bq/kg 和

草灌地的 12.56 Bq/kg。不含¹³⁷Cs的裂隙土和沟壁土占流域产沙的贡献大概不少于 50%。

3 较大流域水库泥沙来源

3.1 麻窝山沟流域

2012 年, 笔者在贵州威宁县麻窝山沟的岩溶盆地(大洼地)内采集了 6 个土壤-泥沙的分层剖面样品(图 7)^[46]。该沟流域面积 16.29 km², 盆地面积 0.74 km², 1958 年前盆地内全为农田, 没有湖泊, 沟道径流经落水洞进入地下暗河流出。由于修路、砍伐森林等原因, 水土流失加剧, 1958 年落水洞阻塞, 盆地下部低洼地段积水成湖, 1968 年开始修建泄流洞, 1973 年打通, 湖泊消失, 复为农田。图 6 中的 DJ3、4、5 位于盆地的下部, 是 1958~1973 年期间的沉积泥沙剖面。深度 0~40 cm 土层的平均 ¹³⁷Cs 活度 0.99 Bq/kg(0.93~1.04 Bq/kg), 渠道开挖剖面湖相沉积 4 个样品的 ¹³⁷Cs 比活度平均值也是 0.99 Bq/kg(0.72~1.32 Bq/kg)。0.99 Bq/kg 远

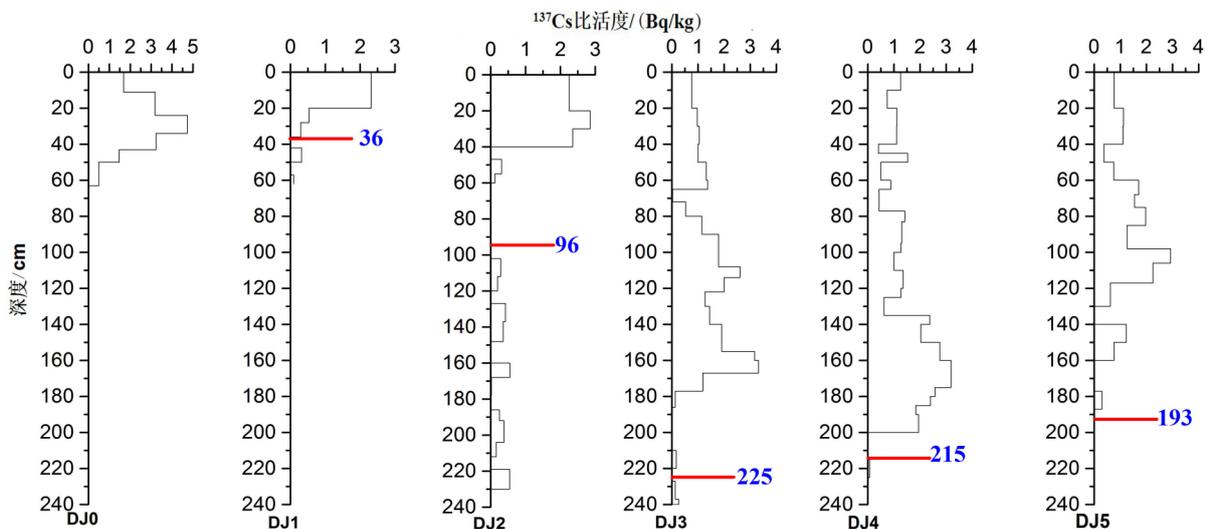


图 7 麻窝山岩溶盆地沉积物的¹³⁷Cs 深度分布

Fig.7 The ¹³⁷Cs depth distributions in sediments from Mawoshan karst depression

低于现今的坡耕地和草灌地土壤的 ^{137}Cs 比活度,也肯定远低于当时这些土壤的 ^{137}Cs 比活度。显然,地下流失和沟岸侵蚀是流域的主要产沙方式,流域泥沙主要来源于裂隙土和沟壁土。

3.2 其他大流域

2008年,973课题组采集的贵州普定青山水库表层底泥的 ^{137}Cs 比活度为 1.97 Bq/kg ;夜郎湖表层底泥的为 1.20 Bq/kg ($1.04\sim 1.54$)。2004年采集的关岭石板桥水库沉积物表层泥沙的 ^{137}Cs 比活度 1.8 Bq/kg ;从参考文献[7]的附图分析,1990年采集的贵阳红枫湖沉积物表层泥沙的 ^{137}Cs 比活度接近于0。与现今的坡耕地和草灌地土壤的 ^{137}Cs 比活度相比较,显然,地下流失和沟岸侵蚀也是这些流域的主要产沙方式,流域泥沙主要来源于裂隙土和沟壁土。

4 结论与建议

4.1 结论

1) 西南喀斯特地区的 ^{137}Cs 背景值变动于 $752.1\sim 1464.7\text{ Bq/m}^2$ (2009年值),呈自北向南,自东向西递减的趋势。自北向南递减与美国和前苏联的大气层核试验均在北半球高纬度地区进行有关;自东向西递减与来自低纬印度洋的西南季风气流影响越来越大有关。

2) 喀斯特坡地表层土壤的 ^{137}Cs 比活度高,9个点的坡耕地耕作土和10个点草灌地表层土壤的平均 ^{137}Cs 比活度分别为 3.72 Bq/kg 和 12.56 Bq/kg 。高于黄土高原黄土^[34-37]和川中丘陵区^[38-41]同类土壤的值。其原因主要是喀斯特坡地土层薄的缘故,如广西环江生态站和贵州清镇王家寨, $<2\text{ mm}$ 粒度的土壤质量厚度仅分别为 20.9 g/cm^2 和 16.04 g/cm^2 。贵州清镇王家寨和广西桂林丫吉坡地表层土壤的高 ^{137}Cs 比活度,分别为 26.1 和 19.17 Bq/kg ,可能是两坡地为厚层质纯石灰岩的缘故。除土层稍厚的坡地外,喀斯特坡地 ^{137}Cs 面积活度低,如广西环江生态站和贵州清镇王家寨,分别为 261.1 Bq/m^2 和 312.0 Bq/m^2 ,仅为为本底值的 27.1% 和 38.7% 。坡地土壤的 ^{137}Cs 面积活度低,主要不是土壤流失的缘故,而是土壤少,岩石不吸附 ^{137}Cs ,核爆期间随降水沉降到坡地表面的部分 ^{137}Cs 尘埃随未能被土壤吸附,随径流流失的缘故。

3) 峰丛洼地区森林植被完好的坡地土壤侵蚀速率很低,多小于 $10\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$;森林植被一旦遭

到严重破坏,土壤大量流失,侵蚀速率可骤然升高至数千 $\text{t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$;土壤流失殆尽的石漠化坡地,侵蚀速率也不高,多低于 $50\text{ t}/(\text{km}^2\cdot\text{a})$ 。

4) 地面流失(坡地表层土壤)、地下流失(裂隙土)和沟岸侵蚀(沟壁土)是西南喀斯特流域的主要产沙方式。坡地表层土壤和洼地沉积泥沙的 ^{137}Cs 比活度对比分析表明:不同微小流域(如文中的洼地小流域,流域面积不足 0.5 km^2)的主要产沙方式存在差异,有的是地面流失,如坡地地面流失强烈的普定石人寨洼地小流域;有的是地下流失和沟岸侵蚀,如坡地地面流失轻微的桂林丫吉1号洼地森林小流域。坡地表层土壤和非洼地流域塘库沉积泥沙的 ^{137}Cs 比活度对比分析表明:地下流失和沟岸侵蚀是小流域和较大流域的主要产沙方式,而且有随着流域面积增大,产沙贡献率越高的趋势。由于裂隙土和沟壁土都基本不含 ^{137}Cs , ^{137}Cs 示踪不能区分这两种源地土体的贡献率。

5) 由于洼地的滞流作用,进入洼地的泥沙部分沉积于洼地内,部分随径流入落水洞,进入地下管、洞系统。经常发生积水的洼地,泥沙截留率高;反之,则低。洼地的泥沙截留率没有系统研究,973课题组根据引用水库与沉沙池的拦沙效率研究成果,研究洼地的泥沙截留率取 $0.7\sim 0.9$ ^[42]。除洼地外,河、沟谷地平原,特别是滩地部分也常有泥沙淤积发生。此外,喀斯特洼地和河、沟谷地平原的泥沙淤积的相关研究鲜见。

4.2 今后工作建议

1) 开展不同尺度域的流域泥沙来源的研究。通过源地土体和不同尺度汇水面积塘库沉积泥沙和河流悬移质泥沙(大、中、小)的多元示踪法对比,分析确定不同源地土体对河流泥沙的贡献率,特别是区分地下流失(裂隙土)和沟岸侵蚀(沟壁土)的贡献率,及其尺度效应。坡地表层土壤、裂隙土和沟壁土都是同源碳酸盐岩风化产物,常量和微量元素含量可能差别不大,化学元素多元示踪未必有效。区分裂隙土和沟壁土的贡献率,可考虑尝试磁性法和孢粉法。其理由是:前者是地下与地表的氧化还原环境条件差别较大,氧化铁的赋存状态可能不同;后者裂隙土时代久远,孢子花粉腐蚀殆尽,含量极微,而沟壁土时代较近,孢粉含量高。 ^{10}Be 也是一种有潜力的示踪物,但过于昂贵。

2) 开展不同尺度域的流域泥沙输移比研究。采用 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 等核素断代法,调查不同流域环境

和土地利用状况,不同滞流程度洼地的泥沙淤积量,结合径流小区和小流域水文站输沙量资料,分析不同类型洼地的泥沙截留率。采用¹³⁷Cs和²¹⁰Pb等核素断代法,调查不同类型洼地的泥沙淤积量,结合大中型水库淤积量和河流水文站输沙量资料,

分析河流泥沙输移比。

3) 建立喀斯特流域产沙模型。选择研究程度较高的流域,在基本查明泥沙来源,泥沙输移比和输沙量(或产沙量)的基础上,确定流域泥沙平衡,结合径流研究成果,建立喀斯特流域产沙模型。

参 考 文 献

- [1] 张信宝,王世杰,贺秀斌,等. 碳酸盐岩风化壳中的土壤蠕滑与岩溶坡地的土壤地下漏失[J]. 地球与环境, 2007, 35(3): 202-205.
- [2] 张信宝,刘再华,王世杰,等. 锥峰和塔峰溶丘地貌的表层喀斯特带径流溶蚀形成机制[J]. 山地学报, 2011, 29(5): 529-533.
- [3] 彭韬,王世杰,张信宝. 喀斯特坡地地表径流系数监测初报[J]. 地球与环境, 2008, 36: 152-157
- [4] Zapata F. Handbook for the assessment of soil erosion and sedimentation using environmental radionuclides [M]. 2002, Dordrecht/Boston/London: Kluwer Academic Publisher.
- [5] Zhang X, Li S, Wang C *et al.* Use of caesium-137 measurements to investigate erosion and sediment sources within a small basin in the Loess Plateau of China [J]. Hydrological Processes, 1989, 3: 317-323.
- [6] Walling D E, Quine T A. Use of Caesium-137 as a tracer of erosion and sedimentation: Handbook for the application of the Caesium-137 technique [M]. Exeter University, 1993.
- [7] 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): 1490-1493.
- [8] Wang H Y, Huo Y Y, Zeng L Y, *et al.* A 42-yr soil erosion record inferred from mineral magnetism of reservoir sediments in a small carbonate-rock catchment, Guizhou Plateau, Southwest China [J]. J Paleolimnol. 2008, 40(3): 897-921
- [9] 李豪,张信宝,王克林,等. 桂西北倒石堆型岩溶坡地土壤¹³⁷Cs分布特点[J]. 水土保持学报. 2009, 23(3): 42-47.
- [10] 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.
- [11] Li H, Zhang X, Wang K L, *et al.* Assessment of sediment deposition rates in a karst depression of a small catchment in Huanjiang, Guangxi, southwest China, using the cesium-137 technique [J]. Journal of soil and water conservation. 2010, 65(4): 223-232.
- [12] Li H, Zhang X B, Wang K L, *et al.* ¹³⁷Cs Redistribution on Carbonate Rock Slopes with Thin Stony Soil in Northwest Guangxi, SW China. Pedosphere.
- [13] 严冬春,文安邦,鲍玉海,等. 黔中高原岩溶丘陵坡地土壤中的¹³⁷Cs分布[J]. 地球与环境, 2008, 36(4): 342-346.
- [14] Yan D C, Zhang X B, Wen A B, *et al.* Assessment of sediment yield in a small karst catchment by using ¹³⁷Cs tracer technique, 2012, 27(4): 547-554.
- [15] 何永彬,李豪,张信宝,等. 贵州茂兰峰丛草地洼地小流域侵蚀产沙的¹³⁷Cs法研究[J]. 中国岩溶, 2009, 28(2): 181-188.
- [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] 何永彬,张信宝,贺秀斌. ¹³⁷Cs示踪和孢粉分析法对喀斯特峰丛草地洼地泥沙沉积及侵蚀环境的研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(1): 246-250.
- [18] 白晓永,张信宝,王世杰,等. 普定冲头峰丛洼地泥沙沉积速率的¹³⁷Cs法测定[J]. 地球与环境, 2009, 37(2): 142-146.
- [19] Bai X Y, Zhang X B, Wang S J. The application of caesium-137 measurements to estimate recent sedimentation rates in a typical karst depression of Guizhou Plateau, China [J]. Chin. J. Geochem, 2011, (30): 84-92.
- [20] Bai X. Assessment of sediment and erosion rates by using the caesium-137 technique in a Chinese polygonal karst depression. Environmental Earth Sciences, 2011, 64(8): 2151-2158.
- [21] Bai X Y, Zhang X B, Long Y, *et al.* Use of ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pb_{ex} measurements on deposits in a karst depression to study the erosional response of a small karst catchment in Southwest China to land-use change [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(6): 822-829.
- [22] 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: 地球科学, 2011, 41(2): 265-271.
- [23] 彭韬,杨涛,王世杰,等. 喀斯特坡地土壤流失监测结果简报[J]. 地球与环境, 2009, 37(2): 126-130.
- [24] Zhang X B, Bai X Y & Liu X M. Application of a ¹³⁷Cs fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the Guizhou Plateau, China. SCIENCE CHINA [J]. Earth Sciences, 2011, 54(3): 431-437.
- [25] Zhang X B, Bai X Y, Wen A B. Preliminary investigation of the potential for using the ¹³⁷Cs technique to date sediment deposits in karst depressions and to estimate rates of soil loss from karst catchments in southwest China [J]. IAHS Publication, 2010, 337: 149-156.
- [26] 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.
- [27] 张信宝,王世杰,曹建华,等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 57-62.
- [28] 张笑楠,王克林,张伟,等. 典型喀斯特坡地¹³⁷Cs的分布与相关影响因素研究[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3152-3158.
- [29] 冯腾,陈洪松,张伟,聂云鹏,王克林. 桂西北喀斯特坡地土壤¹³⁷Cs的剖面分布特征及其指示意义[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 593-599.
- [30] 蒋忠诚,罗为群,邓艳,等. 岩溶峰丛洼地水土流失及防治研究[J]. 地球学报, 2014, 35(5): 535-542.
- [31] 张治伟,傅瓦利,张洪,等. 岩溶坡地土壤侵蚀强度的¹³⁷Cs法研究[J]. 山地学报, 2007, 25(3): 302-308.
- [32] 贾红杰,傅瓦利,张治伟,等. 中梁山岩溶区坡耕地土壤侵蚀¹³⁷Cs法研究[J]. 西南大学学报: 自然科学版, 2008, 30(8): 57-61.

- [33] 魏兴萍. 基于同位素法监测岩溶槽谷区山坡土壤侵蚀和养分流失 [J]. 农业工程学报, 2013, 29(22): 128-136.
- [34] 张素红, 李森, 严平, 等. 粤北石漠化地区 ^{137}Cs 分布特征与背景值研究 [J]. 水土保持研究, 2007, 14(6): 361-364.
- [35] Walling D E. Some applications of caesium-137 measurements in sediment budget investigations [J]. Journal of Water Resources, 1989, 8: 50-77.
- [36] Walling D E, Woodward J C. Tracing sources of suspended sediment in river basins [J]. Marine and Freshwater Research, 1995, 46: 327-336.
- [37] Mukundan R, Radcliffe D E, Ritchie J C, et al. Sediment fingerprinting to determine the source of suspended sediment in a southern Piedmont stream [J]. Journal of Environmental Quality, 2010, 39(4): 1328-37.
- [38] Schullera P, Walling D E, Iroum A, et al. Using Cs-137 and Pb-210 (ex) and other sediment source fingerprints to document suspended sediment sources in small forested catchments in south-central Chile [J]. Journal of Environmental Radioactivity, 2013, 124: 147-159.
- [39] Wallbrink P J, Olley J M, Murray A S, et al. Determining sediment sources and transit times of suspended sediment in the Murrumbidgee River, NSW, Australia using fallout ^{137}Cs and ^{210}Pb . [J]. Water Resources Research, 1998, 4(4): 879-887.
- [40] Zhang X B, Wen Z M, Feng M Y, et al. Application of ^{137}Cs fingerprinting technique to interpreting sediment production records from reservoir deposits in a small catchment of the Hilly Loess Plateau [J]. Science China. Earth Sciences, 2007, 50(2): 254-260.
- [41] Zhang X B, Zhang Y Y. Use of Caesium-137 to investigate sediment sources in the Hekouzheng-Longmen Basin of the Middle Yellow River, China in Foster. I. D. L, Gurnell. A. M and Webb. B. W(Eds), Sediment and Water Quality in River Catchments [J]. John Wiley & Sons Ltd, 1995, 353-362.
- [42] Zhang X B, Quine T A, Walling D E, Li Z, Application of the Caesium-137 technique in a study of soil erosion on gully slopes in a yuan area of the Loess Plateau near Xifen, Gansu Province, China. Geografiska [J]. Annaler, 76A (1994): 103-120.
- [43] 张信宝, 张一云, 文安邦, 第五章沟谷侵蚀产沙与泥沙输移, 景可, 卢金发, 梁季阳, 张信宝, 韩家琳, 等. 黄河中游侵蚀环境特征和变化趋势 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 1997, 109-137.
- [44] 张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 双同位素法研究 [J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1537-1541.
- [45] 文安邦, 张信宝, 张一云, 等. 云南东川泥石流沟与非泥石流沟 ^{137}Cs 示踪法物源研究 [J]. 泥沙研究, 2003, 4: 52-56.
- [46] 张信宝. 黔西北麻窝山岩溶盆地沉积的新资料 [J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(3): 104-108.

Contrast of ^{137}Cs Content in Slope Soil with Depressions, and Pond Sediments —Sediments Sources, Transportation and Balance of Karst Basin in SW China

ZHANG Xinbao^{1,2}, BAI Xiaoyong^{2,3}, LI Hao⁴, FENG Teng⁵, PENG Tao^{2,3},
YAN Dongchun¹, HE Yongbin⁶, BAO Yuhai¹, WANG Yangchun¹

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Guizhou, Puding 562100, China; 3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China; 4. Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 5. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Science, Changsha 410125, China; 6. Yunnan University, Institution of Yunnan Geography Research, Kunming 650223, China)

Abstract: The ^{137}Cs contents in slope soil, depressions and pond sediments were analysis and compared to learn the sources of sediment in SW China in this paper. Results show (1) in small karst basin, where catchment area is lower than 0.5 km^2 and its erosion of ground on karst slope is very slight, sediment yield is mainly from underground loss (fractured earth) and ditch bank erosion (trench walls soil); (2) in some karst basin, where ground erosion on slope is strong, sediment yield is mainly from slope ground loss (surface soil); (3) underground loss and ditch bank erosion are the main ways for sediment yield in small watershed and larger basins, respectively. And there is positive correlation between sediment yield contribution and drainage area; (4) there is no ^{137}Cs contents in fractured earth and trench walls soil can be tested, therefore, sediment contribution between these two sources can not be distinguished by ^{137}Cs tracer method; (5) the multi-tracer technique was recommended to study sediment sources of karst basin; (6) if the contribution of sediment was distinguished between fractured earth and trench walls soil, the magnetic method and pollen methods would be recommended; and (7) to determine sediment volume in depressions, river beaches and pond sediments by ^{137}Cs tracer method, and to analysis sediment retention of different depressions, beaches and ponds and sediment transport ratio of rivers, combined with the data of runoff plots and hydrological station. On the basis of the identification of sediment sources, sediment delivery ratio and sediment load (or sediment yield), to determine the balance of basin sediment and establishment sediment yield mode of karst drainage basin combining research results of runoff plots.

Key words: karst basin; sediment sources; transport; ^{137}Cs content