

# 近100年喀斯特槽谷区洼地沉积速率与流域产沙强度

裴曾莉<sup>1</sup>, 龙翼<sup>2</sup>, 张云奇<sup>1</sup>, 卢雪<sup>1</sup>, 吴喆虹<sup>1</sup>, 徐明阳<sup>1</sup>

(1.四川农业大学林学院,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)

**摘要:**首次尝试通过沉积物定年反演喀斯特洼地流域单元近100年尺度的侵蚀产沙历史,这有助于认识人类活动对喀斯特石漠化演化过程的影响。以喀斯特槽谷区典型洼地—常家洼地为研究对象,应用<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>定年法分析了近100年的流域产沙强度特征。结果表明:(1)洼地平均沉积速率为1.00 cm/a(1917—1963年)和0.25 cm/a(1963—2017年),流域的平均产沙模数为609 t/(km<sup>2</sup>·a)(1917—1963年)和152 t/(km<sup>2</sup>·a)(1963—2017年);(2)1917—1963年期间流域产沙强度远高于1963年以后,这与该地区民国至新中国建国初期强烈的人类活动有密切关系,尤其是上世纪50年代末大规模伐木;(3)1963年以来产沙强度明显减小,这是由于此前发生过较强侵蚀导致土壤变少,局部基岩出露,加之此间植被恢复、人类扰动强度降低和水土保持工程实施;(4)常家洼流域产沙强度高于西南其他喀斯特地区,与流域岩性和人为扰动有关。喀斯特石漠化并非仅是近50年人类活动的结果,也与近100年乃至更长时间尺度的人类活动有关。

**关键词:**喀斯特石漠化;沉积洼地;<sup>137</sup>Cs;<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>

**中图分类号:**S157.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-2242(2020)02-0023-07

**DOI:**10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.02.004

## Deposition Rate of Karst Depression and Sediment Yield Intensity of the Watershed in Karst Trough-Valley Area in the Past 100 Years

PEI Zengli<sup>1</sup>, LONG Yi<sup>2</sup>, ZHANG Yunqi<sup>1</sup>, LU Xue<sup>1</sup>, WU Zhehong<sup>1</sup>, XU Mingyang<sup>1</sup>

(1.College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130; 2.Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041)

**Abstract:** This was the first attempt to investigate the sediment yields of karst environment at the time scale of 100 a, and expected to improve our understanding of the evolution karst rocky desertification impacted by human activity. Taking Changjiawa depression and its watershed in Karst trough-valley area as the research object, the <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> techniques were applied to calculate sediment yield intensity over the past 100 a. The results indicated that: (1) The average sediment deposition rate in the depression was 1.00 cm/a (1917—1963) and 0.25 cm/a (1963—2017), the average specific sediment yield (SSY) in the basin was 609 t/(km<sup>2</sup>·a) (1917—1963) and 152 t/(km<sup>2</sup>·a) (1963—2017); (2) The high values during 1917—1963 were related to the intense human activities in the region from the Republic of China to the early period of New China, especially the large-scale deforestation in the 1950s; (3) The sharp decreased values of 1963—2017 were due to the fact that the previous erosion had led to less soil and exposed local bedrock, combined with the vegetation recovery, the decrease of human activity intensity, and conservation measurements; (4) The intensity of sediment yield in Changjiawa basin was larger than that in other karst areas in southwest China, which was mainly related to lithology and human disturbance. Karst rocky desertification was not only the result of human disturbances in the last 50 years, but also related to human activities with nearly 100 years and even longer.

**Keywords:** karst rocky desertification; sediment depression; <sup>137</sup>Cs; <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>

土壤侵蚀及其导致的石漠化已成为喀斯特地区突出的环境问题,威胁区域生态安全和社会经济可持

续发展,近年受到政府和学界的高度关注<sup>[1]</sup>。喀斯特地区地表崎岖,景观破碎,裸岩与土壤交错分布,异质

收稿日期:2019-08-26

资助项目:国家重点研发计划专项(2016YFC0502301);国家自然科学基金项目(41671277)

第一作者:裴曾莉(1995—),女,硕士研究生,主要从事水土保持研究。E-mail:1598100292@qq.com

通信作者:龙翼(1976—),男,博士,副研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:longyi@imde.ac.cn

张云奇(1976—),男,博士,副教授,主要从事土壤侵蚀的核素示踪研究。E-mail:yunqi768@163.com

性大,加之地上与地下“二元”空间结构,存在土壤地表流失和地下漏失现象<sup>[2]</sup>。坡面径流和泥沙过程复杂多变,产流产沙特征与非喀斯特地区迥异,难以进行直接针对坡面的土壤侵蚀研究。目前一些学者<sup>[3-4]</sup>开展了从坡面到不同尺度流域产流产沙过程、规律和强度的有益探索,取得了一系列研究成果,但总体而言,可靠的产沙数据依然匮乏。

峰丛洼地是喀斯特地区的特色地貌单元,流域来沙堆积于洼地。洼地沉积是流域来沙的结果,记录了侵蚀产沙的历史过程,通过沉积物可推算流域产沙强度,这为研究喀斯特地区侵蚀产沙提供了可行途径<sup>[5]</sup>。已有研究<sup>[6]</sup>通过确定洼地沉积物中<sup>137</sup>Cs 的 1963 年时标,计算了贵州永康洼地近 50 年的沉积速率和流域产沙强度分别为 0.4 cm/a 和 20.53 t/(km<sup>2</sup>·a)。然而,就喀斯特石漠化而言,可能是近 50 年尺度人类活动影响的结果,也有可能是更长时间的作用结果。研究近 100 年尺度的产沙强度,有助于提升对石漠化机制和演化过程的认识。相比<sup>137</sup>Cs 而言,<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>可用于近 100 年时间尺度的定年<sup>[7]</sup>,目前尚未用于喀斯特洼地,这可能是因为喀斯特水土流失和石漠化也是近期才开始受到关注,加之洼地常受耕作扰动而更具挑战性。

喀斯特槽谷区是指发育在背斜轴部,出露的碳酸盐岩在长期溶蚀作用下,形成与褶皱轴向一致的条形槽谷,川渝一带较为典型。该区域土层浅薄,人类扰动强烈,石漠化现象显著。本文以喀斯特槽谷区典型洼地,即常家洼洼地为研究对象,从沉积物入手,应用<sup>137</sup>Cs、<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>示踪法进行沉积物定年,计算近 100 年以来洼地沉积速率和流域产沙模数,有助于从更长时间尺度认识喀斯特洼地流域单元的侵蚀产沙特征,以及人类活动影响下石漠化演化过程和规律,也为洼地流域单元石漠化治理提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

常家洼洼地位于重庆市巫山县,属亚热带季风性湿润气候,年平均降水量 1 041 mm,暴雨频发,人口密度约 156 人/km<sup>2</sup>。洼地周边土壤主要为黄壤和石灰土,坡面局部碳酸盐岩出露。洼地面积 0.003 8 km<sup>2</sup>,流域面积 0.119 9 km<sup>2</sup>。东南边缘有一落水洞,据当地村民介绍,暴雨后洼地积水一般 3 天退去。洼地长期耕作,主要种植玉米(*Zea mays*)、土豆(*Solanum tuberosum*)等作物。邻近洼地坡面多为坡耕地,土层较薄,厚度小于 20 cm,裸岩与农地镶嵌交错,景观破碎,有一定石漠化。流域内林地分布于坡耕地以上的陡坡,上世纪 50 年代以前,流域林木覆盖良好,以松(*Pinus massoniana*)、杉(*Cunninghamia lanceolata*)为主,1958 年砍伐殆尽。此后植被得到一定

恢复,以低矮乔、灌为主。上世纪 80 年代以来开展飞播造林和封禁保育,植被进一步得到恢复。

### 1.2 样品采集与测试

沉积物样品采集于 2017 年 12 月,本研究于洼地中央位置被田间道路分隔开的 2 地块各取 1 处,共 2 处沉积剖面样品(钻孔,图 1)。采用内径为 8 cm 的筒状土钻手工钻取剖面分层样品,约以 5 cm 厚度分层,取样深度直至于下伏基岩。记录到 1#剖面总深度 283 cm,共 56 个样品;2#剖面总深度 291 cm,共 53 个样品。样品冷冻干研磨后过 2 mm 土壤筛,称重封存供测定用。泥沙粒度测试,使用 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>(10%)和 HCl(10%)去除样品有机质和碳酸盐,中和样品液呈中性后,加入六偏磷酸钠(1 mol/L)使颗粒物分散,前处理完成后采用 Mastersizer 2000 激光粒度仪进行粒度指标分析。考虑到沉积物中赋存<sup>137</sup>Cs 和<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>的有效沉积年限分别为 1954 年以来和近 100 年,本研究只测试 0—120 cm 大致深度范围的样品,以节约成本。<sup>137</sup>Cs 和<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>比活度使用配备 P 型高纯锗探头(GMX40P4,ORTEC)的低能量、低本底 γ 能谱仪测定。样品测重≥250 g,测试时间>80 000 s,测试误差<10%(95%置信度),样品的<sup>137</sup>Cs 比活度根据 662 keV 谱峰面积推算。总<sup>210</sup>Pb 比活度根据 46.5 keV 谱峰面积推算;<sup>222</sup>Rn(<sup>226</sup>Ra)比活度根据其子体<sup>214</sup>Pb 的谱峰面积(351.9 keV)推算;<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>比活度为总<sup>210</sup>Pb 与<sup>222</sup>Rn(<sup>226</sup>Ra)比活度的差值。

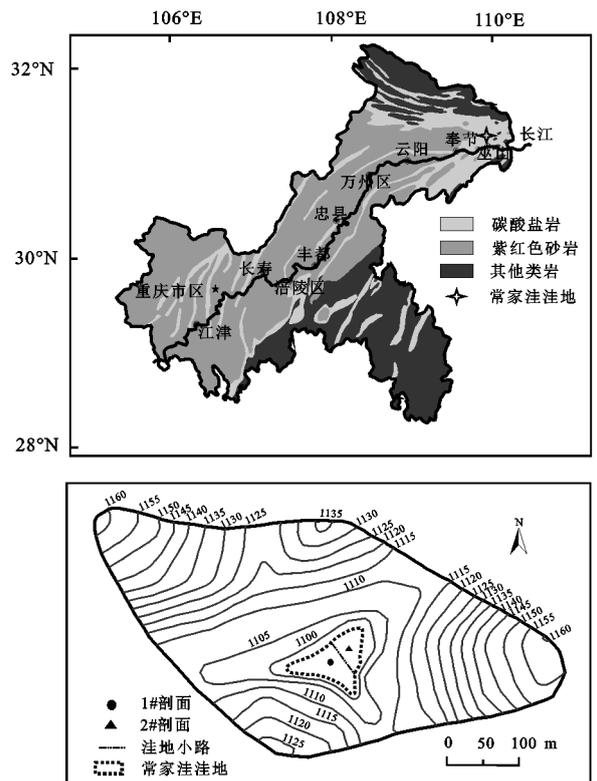
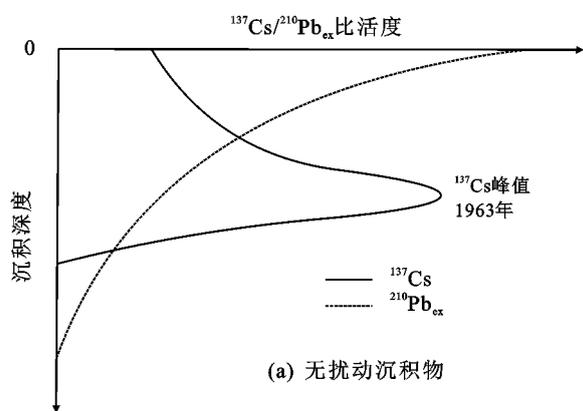


图 1 重庆岩性分布及常家洼小流域

### 1.3 沉积速率与产沙模数计算

1.3.1 <sup>137</sup>Cs 和<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>定年原理 <sup>137</sup>Cs 是上世纪 50~

70 年代人类大气层核试验产生的放射性尘埃, 沉降至地表后与土壤颗粒紧密吸附而不被淋溶, 随土壤颗粒运移。 $^{137}\text{Cs}$  在 1963 年的沉降量最大, 泥沙沉积剖面出现相应峰值, 可标志 1963 年的沉积层位<sup>[5]</sup>。对于受耕作扰动的洼地, 1963 年 $^{137}\text{Cs}$  沉降峰即被当年耕作混合于犁耕层。假定每年犁耕深度保持恒定( $d_0$ ), 随着每年新输入泥沙沉积于洼地, 犁耕层会被逐年抬升, 1963 年 $^{137}\text{Cs}$  沉降峰即被混合于自 1963 年以来犁耕范围( $0\sim D_0$ ),  $D_0$  以上 $^{137}\text{Cs}$  比活度明显高于  $D_0$  以下, 该深度位置( $D_0$ ) 即可作为 1963 年沉降峰时标<sup>[6]</sup>。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  是半衰期为 22.6 年的自然核素,  $^{238}\text{U}$  的系列衰变产物, 可用于近百年时间尺度的湖泊、河口、河漫滩、海湾等水体沉积物断代<sup>[8]</sup>。对于洼地而言, 由于常年受耕作扰动, 适用于水体沉积



物的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  定年手段无法直接应用于耕作洼地。尽管如此, 随着洼地不断接受来自流域的新泥沙输入, 假定每年犁耕深度( $d_0$ ) 不变, 犁耕层会被逐年抬高, 埋藏于  $d_0$  深度以下曾经被耕作过的泥沙将不再受耕作扰动, 经历约 100 年(即 $^{210}\text{Pb}$  的 5 个半衰期)后, 总 $^{210}\text{Pb}$  将实现与 $^{226}\text{Ra}$  的平衡, 即 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  为 0。因此, 洼地剖面中, 自上而下 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  开始为 0 的深度, 即为总 $^{210}\text{Pb}$  与 $^{226}\text{Ra}$  平衡深度, 可视为埋藏 100 年的深度, 以下层位埋藏时间超过 100 年,  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  恒为 0。理想沉积物剖面 $^{137}\text{Cs}$  和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  深度分布见图 2。因此, 从洼地剖面 $^{137}\text{Cs}$  深度分布中可确定出 1963 年沉降峰时标, 从 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  深度分布中可以确定出埋藏 100 年的平衡深度, 即 1917 年的时标(本研究样品采集于 2017 年)。

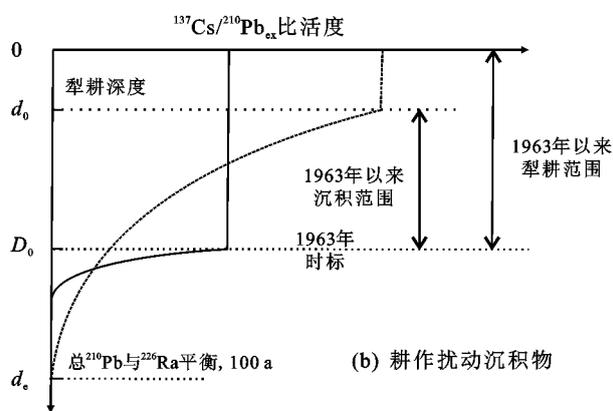


图 2 理想沉积物剖面 $^{137}\text{Cs}$  和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  深度分布示意

1.3.2 沉积速率与产沙模数 根据上述 $^{137}\text{Cs}$  和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  时标, 可将洼地沉积划分 2 个时段, 即 1917—1963 年和 1963—2017 年, 确定出不同时间段对应的沉积层位, 求算各时段洼地沉积速率和流域产沙模数(公式(1)、公式(2)和公式(3))。

$$DR_1 = \frac{d_e - D_0}{1963 - 1917} \quad (1)$$

式中: $DR_1$  为 1917—1963 时段的平均沉积速率( $\text{cm}/\text{a}$ );  $d_e$  为总 $^{210}\text{Pb}$  与 $^{226}\text{Ra}$  平衡深度( $\text{cm}$ );  $D_0$  为 1963 年沉积层位深度( $\text{cm}$ )。

$$DR_2 = \frac{D_0 - d_0}{2017 - 1963} \quad (2)$$

式中: $DR_2$  为 1963—2017 时段的平均沉积速率( $\text{cm}/\text{a}$ );  $d_0$  为犁耕深度( $\text{cm}$ )。

$$\text{SSY} = \frac{10000 \cdot DR \cdot \gamma \cdot S}{TE \cdot A} \quad (3)$$

式中: $\text{SSY}$  为洼地小流域产沙模数( $\text{t}/\text{km}^2 \cdot \text{a}$ );  $DR$  为某时段洼地沉积速率( $\text{cm}/\text{a}$ );  $\gamma$  为沉积物容重( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $S$  为洼地面积( $\text{km}^2$ );  $TE$  为泥沙拦截率( $\%$ );  $A$  为流域面积( $\text{km}^2$ )。对于  $TE$ , 因缺乏监测数据, 本文参考已报道<sup>[9]</sup> 石人寨洼地的取值, 即 0.7, 洪水滞水时间与常家洼洼地类似。

## 2 结果与分析

### 2.1 洼地沉积物剖面 $^{137}\text{Cs}$ 、总 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度、容重及颗粒组成

两剖面 $^{137}\text{Cs}$ 、总 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{226}\text{Ra}$  和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度的深度分布见图 3。1#、2# 剖面中,  $^{137}\text{Cs}$  比活度范围分别为  $0\sim 28$ 、 $0\sim 18 \text{ Bq}/\text{kg}$ 。 $^{137}\text{Cs}$  深度分布形态, 1#、2# 剖面分别于  $0\sim 25$ 、 $0\sim 32 \text{ cm}$  土层深度范围内比活度较高, 且相对均匀, 这是 1963 年 $^{137}\text{Cs}$  集中沉降以来犁耕混合作用的结果, 此深度以下迅速降低并接近于 0。因此, 可以认为该深度以上即为 1963 年以来的犁耕深度范围( $0\sim D_0$ )。尽管如此, 该范围 $^{137}\text{Cs}$  比活度随土层深度略有降低, 可能与 $^{137}\text{Cs}$  沉降历史和耕作扰动有关。 $^{137}\text{Cs}$  初始沉降于 1954 年, 北半球最大沉降峰发生于 1963 年, 1972 年以后少有沉降。1963 年集中沉降发生,  $^{137}\text{Cs}$  即被耕作混合于犁耕层, 此前犁耕层少有 $^{137}\text{Cs}$ , 因而混合后犁耕层 $^{137}\text{Cs}$  比活度低于混合前表层沉积物。由于洼地沉积速率较低, 随着此后少量 $^{137}\text{Cs}$  沉降输入, 或使犁耕层 $^{137}\text{Cs}$  比活度有所增加。此外, 1963 年犁耕层底部的 $^{137}\text{Cs}$  也会因向下扩散而有所降低, 这可能是该范围 $^{137}\text{Cs}$  比活度随土层深度有所降低的原因。但总体而言, 该范围 $^{137}\text{Cs}$  比活度明显高于以下沉积物, 且无根本变化, 可以认为是 1963 年以来的犁耕深度范围。

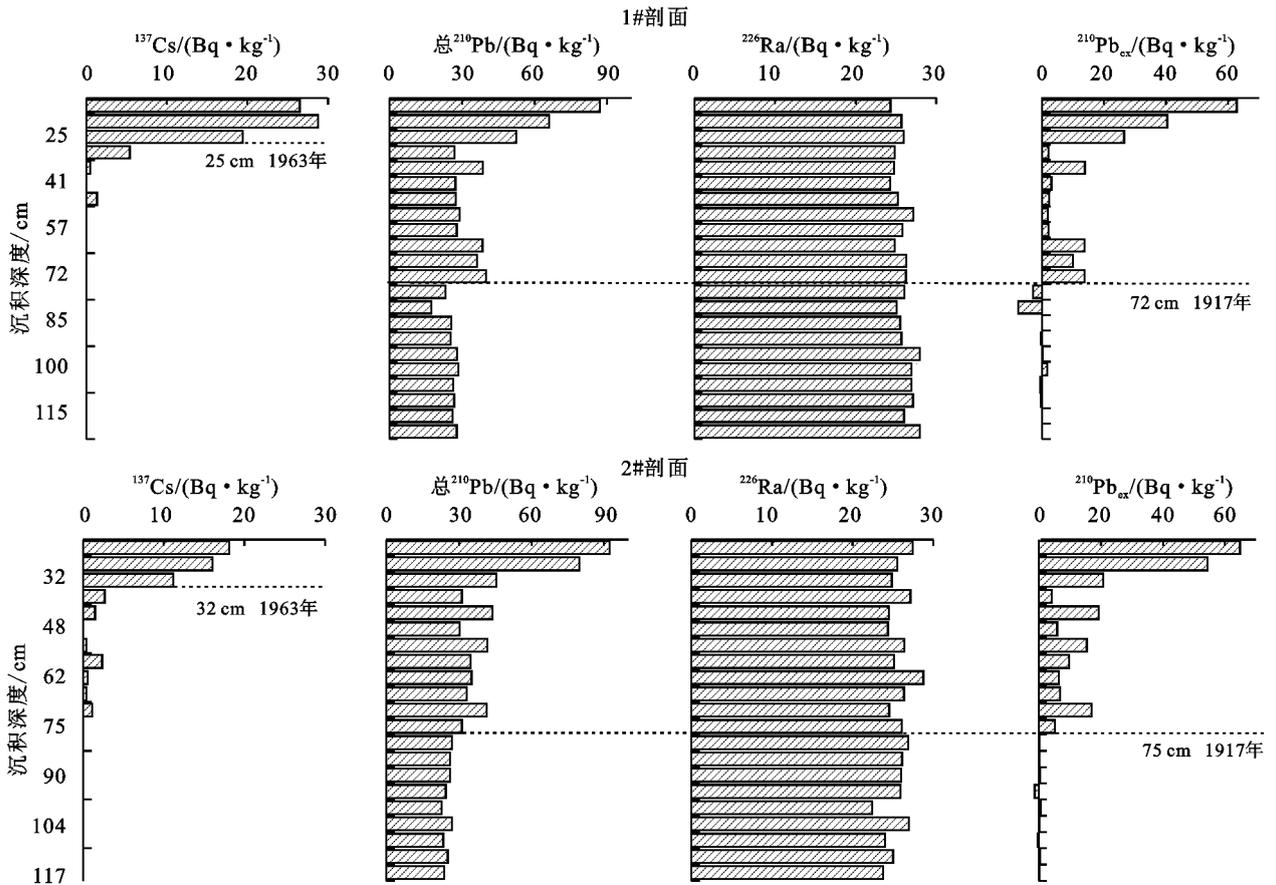


图 3 常家洼地沉积物剖面 $^{137}\text{Cs}$ 、总 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{226}\text{Ra}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 深度分布

1#、2#剖面中,总 $^{210}\text{Pb}$ 深度分布形态自上而下呈指数降低,比活度范围分别为17~87,23~92 Bq/kg。 $^{226}\text{Ra}$ 深度分布形态自上而下无明显变化,比活度范围分别为24~28,22~29 Bq/kg。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 深度分布形态与总 $^{210}\text{Pb}$ 相似,亦自上而下呈指数降低,比活度范围分别为-8~63,-1~65 Bq/kg,且分别在72,75 cm土层深度开始约为0,此深度以下基本不再含有 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 。因此,可以认为该深度系总 $^{210}\text{Pb}$ 与 $^{226}\text{Ra}$ 平衡深度( $d_e$ ),即埋藏100年的时标(1917年)。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 负值是沉积物中 $^{222}\text{Rn}$ 逸散的结果<sup>[10]</sup>。两剖面 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度均随土层深度呈指数降低,与 $^{137}\text{Cs}$ 有所不同,这反映了此2种核素沉降历史的差异。 $^{137}\text{Cs}$ 是人工核素,1972年以后少有沉降,而 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 天然核素,每年都有相对稳定的沉降。对于耕作洼地而言,新沉降 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 因耕作扰动混合于当年犁耕层,犁耕深度以下赋存的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 不再接受新沉降 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 补充,也不再受到耕作扰动,因衰变而比活度逐年降低,越深处沉积物埋藏时间越久, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 经历衰变时间越长,故其比活度越低。由于两剖面顶部第1个样品的分层厚度均接近于犁耕深度,实测 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度代表采样年份(2017年)犁耕层的平均 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度,相比以下深度沉积物,赋存了最新沉降的 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ,经历衰变时间最短,因此,剖面顶部 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 比活度呈最高值。测试结

果也表明,0—120 cm土层深度范围足以涵盖1954年以来 $^{137}\text{Cs}$ 和近100年来 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 的沉降历史。

沉积物剖面黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.020 mm)、砂粒(0.02~2.00 mm)含量,1#剖面分别为3%~7%,68%~80%,16%~28%,2#剖面分别为4%~8%,66%~74%,20%~29%(图4)。从粒径组成看,两剖面均呈粉粒>砂粒>黏粒的特征。从粒径的深度分布看,两剖面均无明显变化。沉积物剖面容重值随土层深度亦无明显变化。沉积物剖面粒径和容重的深度分布特征,反映了:(1)洼地小流域土壤在侵蚀、搬运、沉积和耕作过程中被混合均匀;(2)喀斯特地区土壤质地较为均一,与基岩之间无风化壳,属“突变”接触。

## 2.2 洼地沉积速率与流域产沙模数

根据实测 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 深度分布特征,可确定1#剖面25 cm和2#剖面32 cm土层深度处沉积物对应的年代为1963年;1#剖面72 cm和2#剖面75 cm土层深度处沉积物对应的年代为1917年。现场调查发现,当地居民通常以锄头人工翻耕,洼地耕作深度约15 cm。容重取该土层深度范围内各分层样的平均值,应用公式(1)、公式(2)和公式(3),由各剖面分别计算得到1917—1963年和1963—2017年2个时段洼地沉积速率和流域产沙模数(表1)。

1917—1963 年时段沉积速率和产沙模数均明显高于

1963—2017 年时段。

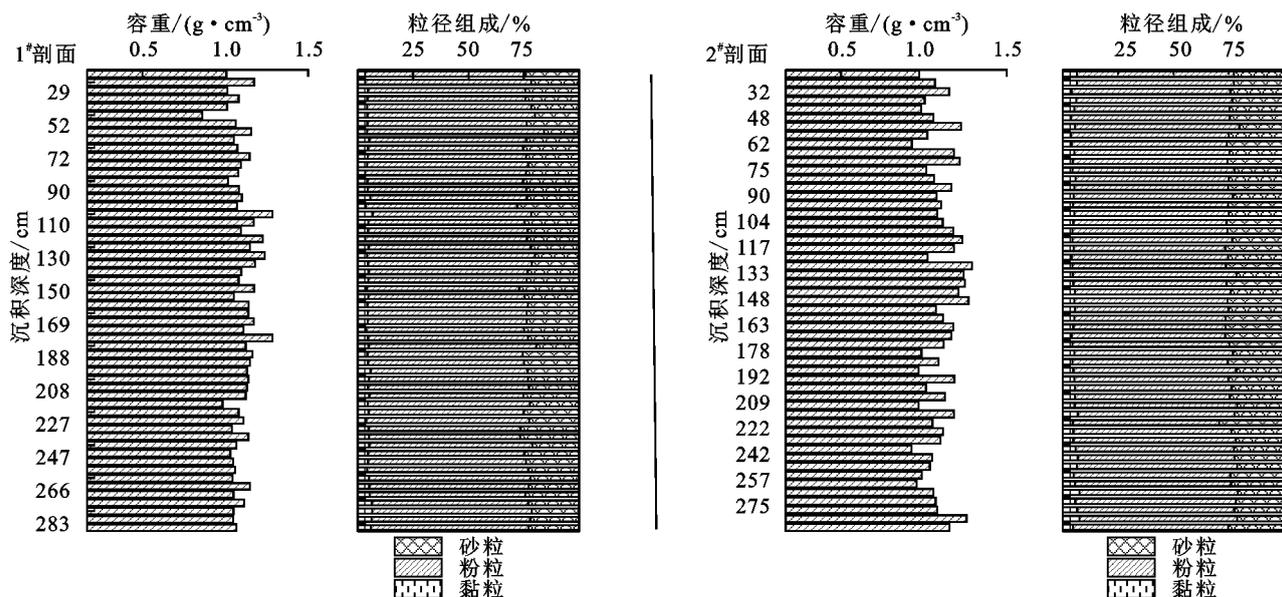


图 4 沉积物剖面容重和粒径组成

表 1 研究区沉积速率与产沙模数

年份	类别	沉积厚度/cm	沉积速率/ ( $\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$ )	沉积总量/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )	产沙模数/ ( $\text{t} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ )
1963—2017	1#剖面	10	0.19	511	113
	2#剖面	17	0.31	868	191
	平均	13.5	0.25	689	152
1917—1963	1#剖面	47	1.04	2390	633
	2#剖面	43	0.96	2210	585
	平均	45	1.00	2300	609

从表 1 可以看出,1917—1963 年时段流域产沙强度大于其后的 1963—2017 年时段。1917—1963 年为民国至新中国初期,随着人口逐渐增长,农业开垦及采薪活动加强。尤其是 1958 年大规模伐木,洼地流域森林砍伐殆尽,这一点也经当地年长者的回忆得以证实。全方位的植被破坏,势必加速流域产沙。1963—2017 年时段产沙强度较低原因在于:(1)上世纪 80 年代的飞播造林项目和 1998 年以来的退耕还林、封禁保育使坡面植被得以逐渐恢复,进入 21 世纪坡改梯等水土保持工程实施,均有效降低侵蚀产沙强度;(2)上世纪 90 年代以来农村劳动力外出务工增多,降低人类活动强度;(3)喀斯特地区成土速率低,此前发生过较强的侵蚀,导致目前可侵蚀的土壤大幅减少。碳酸盐岩的可溶性,使得喀斯特地区成土速率极低,约  $11 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,不及西南地区紫色土成土速率的 1%。形成 1 cm 厚的土壤需要 2 000~8 000 年时间溶解掉约 25 m 厚的岩层<sup>[1,11]</sup>。此外,明清时期我国历史上曾经发生过大规模移民,即著名的“湖广填四川”,现重庆沿江县/市为必经之地。随着移民进入,扰动作用加强,亦会加重土壤侵蚀,导致坡面土层变薄。调查走访得知,当地居民祖先系在明朝洪武

时期(公元 1368—1398 年)移民至此。定居是因为附近有盐矿,可开采维持生计。他们祖先砍伐树木以作薪柴,烘烤卤水产盐,部分山坡也被耕种。至 17 世纪中叶,玉米随移民引种于此,一些山坡被开垦种植玉米<sup>[12]</sup>。这些古代人类活动均可加速土壤侵蚀,导致土层变薄。1958 年伐木导致的土壤侵蚀,使坡面土层进一步变薄,局部基岩出露,出露基岩对剩余土壤起到一定保护作用,限制了侵蚀。Bai 等<sup>[13]</sup>在贵州石人寨洼地的研究表明,1979 年大规模森林砍伐导致 1979—1990 年间产沙强度高达  $5\ 258 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ ,此后因土层厚度大幅降低,加之植被恢复和坡改梯等水土保持工程实施,导致 1991—2008 年间产沙模数锐减至  $256 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。因此,可认为前期的高产沙强度导致土层变薄,基岩裸露增加,使得后期可侵蚀的土壤变少,加之后期植被恢复、扰动降低和水土保持措施等,有效限制流域沙源,导致后期侵蚀产沙强度大幅降低。

### 3 讨论

本研究以<sup>137</sup>Cs 和<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>示踪法进行耕作洼地沉积物定年,获取了沉积物剖面 1963 年<sup>137</sup>Cs 沉降峰时标和 1917 年总<sup>210</sup>Pb 与<sup>226</sup>Ra 平衡(即<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>为 0)时标,计算了 1917—1963 年和 1963—2017 年 2 个时段洼地沉积速率和流域产沙强度,首次以洼地沉积物反演近 100 年喀斯特洼地流域的侵蚀产沙历史。<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>首次应用于洼地沉积物定年,由于洼地长期受耕作扰动,原始沉积层序和沉积物<sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>赋存状态被打乱,传统用于无扰动沉积物的定年方法和模型无法直接适用。在阐明定年原理的基础上,得到近 100 年洼地沉积物时标,为耕作洼地近 100 年尺度的定年提

供了新思路。诚然,这种定年方法存在一定不确定性。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  的测试误差、洼地表层和深层土来沙比例变化(深层土通常不含 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ ,如果深层土来沙比例较高,沉积物中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  含量会很低)等,均会影响到 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  为 0 的时标判定。尽管受这些因素影响,1# 和 2# 剖面 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  比活度均随土层深度降低,直至大致为 0 且不再有明显变化,两剖面 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  为 0 的深度也相似,可作为 100 年沉积标识。2 个时段洼地沉积速率和流域产沙模数,大致反映近 100 年人类活动影响下流域侵蚀产沙的历史。然而,降水也是影响产沙强度的重要因素<sup>[14]</sup>。有研究<sup>[15]</sup>表明,长江流域降水近 100 年来无明显变化,故不是影响产沙强度变化历史的主要因素。我国主要水蚀区,产沙强度的历史变化多受控于人类活动。这些区域包括黄土高原、北方土石山区、东北黑土区、南方红壤区和西南喀斯特区。故常家洼洼地近 100 年侵蚀产沙强度变化受人类活动控制,亦属情理之中。

1963 年以来常家洼洼地的沉积速率为 0.25 cm/a, 与我国西南部马关洼地(0.15 cm/a)、环江洼地(0.20 cm/a)和丫吉洼地(0.10 cm/a)的沉积速率相似<sup>[4,11,16]</sup>。常家洼流域产沙模数为 152 t/(km<sup>2</sup>·a),较已报道<sup>[17]</sup>的西南地区其他喀斯特小流域产沙模数偏高,亦高于西南喀斯特地区允许土壤侵蚀速率(30~68 t/(km<sup>2</sup>·a))。表 2 归纳了部分已发表文献中其他流域近年产沙模数。西南喀斯特地区山地的地面土壤流失率为 10~100 t/(km<sup>2</sup>·a),少数超过 1 000 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[24]</sup>。Li 等<sup>[25]</sup>报道了 40 个喀斯特地区水文站的产沙量数据(2009—2012 年),40 个流域的产沙模数在 2.0~245.5 t/(km<sup>2</sup>·a)。比较而言,常家洼流域产沙模数偏高,实地踏勘发现,该流域岩层中并非纯碳酸盐岩,尚有少量泥岩夹层,泥岩化学溶蚀特性不突出,风化成土较快。故常家洼流域土壤侵蚀模数较西南一般喀斯特地区偏高。张信宝等<sup>[19]</sup>报道,云贵高原石人寨小流域 1979 年以来产沙模数高达 2 315 t/(km<sup>2</sup>·a),与常家洼小流域相比,1979 年以前石人寨小流域无强烈人类扰动记录,侵蚀较弱,土壤较厚,此后高产沙模数主要与森林破坏有关。与非喀斯特地区相比,喀斯特地区的侵蚀模数较低,非喀斯特地区无化学溶蚀、地上地下二元结构和石漠化过程,母质易风化,成土较快,土层较厚,因而侵蚀模数较高。众所周知,黄土高原是我国水土流失最为严重的区域,平均侵蚀模数约 8 000 t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[26]</sup>。然而,黄土高原土层厚度多逾 100 m,而常家洼所在喀斯特地区土层厚度一般少于 50 cm,从土壤侵蚀对土地退化的威胁来看,喀斯特地区的形势更为严峻。

表 2 其他流域侵蚀模数

研究地	地貌类型	侵蚀模数/ (t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	参考文献
贵州普定	喀斯特	20	[5]
贵州荔波	喀斯特	20	[6]
茂兰草地洼地	喀斯特	46	[18]
广西环江	喀斯特	255	[11]
桂林丫吉	喀斯特	14	[16]
贵州石人寨	喀斯特	2315	[19]
冀北土石山区	非喀斯特	1823~5136	[20]
黑龙江拜泉	非喀斯特	658	[21]
南方红壤区赣江	非喀斯特	237	[22]
川中丘陵区	非喀斯特	566~710	[23]

两剖面沉积速率计算结果不尽相同,这是洼地沉积空间差异的反映。受某些随机因素的影响,洼地不同位置沉积速率存在一定差异。本文通过 2 个剖面沉积物数据,而非一个剖面,计算洼地沉积速率和流域产沙强度,以增加代表性。理论上采集剖面数量越多,所得沉积速率和产沙模数越能代表洼地和流域的整体情况,但研究成本也会因此增加。鉴于洼地面积较小,两处剖面可代表整个洼地,故基于两剖面计算的沉积速率和产沙模数,可以反映整个洼地沉积速率和流域产沙强度。此外,常家洼洼地沉积厚度约 300 cm,通过 $^{137}\text{Cs}$  和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  定年,只获取了 75 cm 土层深度内 1963 年和 1917 年 2 个年代数据,定年的时间尺度也限于近 100 年,不能反映更为细节的产沙强度变化。未来可增加新定年手段,以反映更长时间序列、更具体的人类活动,如明清时期“湖广填四川”对侵蚀产沙的影响。

## 4 结论

以喀斯特槽谷区典型洼地流域为研究对象,从洼地沉积物入手,应用 $^{137}\text{Cs}$  和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  示踪法定年,得到 1963 年 $^{137}\text{Cs}$  沉降峰和 1917 年总 $^{210}\text{Pb}$  与 $^{226}\text{Ra}$  平衡时标,计算了 1917—1963 年、1963—2017 年两时段洼地沉积速率和流域产沙模数,分析了流域产沙强度变化特征和原因。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  示踪法为耕作洼地近 100 年尺度定年提供了新思路。洼地沉积速率和流域产沙模数 1917—1963 年时段明显高于 1963—2017 年时段,反映了近 100 年人类活动对侵蚀产沙强度变化的影响。1917—1963 年时段高沉积速率和产沙模数,是 1958 年大规模森林砍伐和上世纪初以来逐渐增强的人类活动所致;而 1963—2017 年时段低沉积速率和产沙模数,与土壤变少、局部基岩出露、人类扰动强度降低、退耕还林封禁保育和水土保持工程等因素有关。表明喀斯特石漠化并非仅是近 50 年人类活动的结果,也与近 100 年乃至更长时间尺度的人类活动有关。

## 参考文献:

- [1] Jiang Z C, Lian Y Q, Qin X Q. Rocky desertification in Southwest China: Impacts, causes, and restoration[J]. *Earth-Science Reviews*, 2014, 132(3): 1-12.
- [2] 程倩云, 彭韬, 张信宝, 等. 西南喀斯特小流域地表、地下河流细粒泥沙来源的<sup>137</sup>Cs 和磁化率双指纹示踪研究[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(2): 140-154.
- [3] Dai Q H, Peng X D, Yang Z, et al. Runoff and erosion processes on bare slopes in the Karst Rocky Desertification Area[J]. *Catena*, 2017, 152(5): 218-226.
- [4] Bai X Y. Assessment of sediment and erosion rates by using the caesium-137 technique in a Chinese polygonal karst depression [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(8): 2151-2158.
- [5] 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<sup>137</sup>Cs 法测定[J]. *地球与环境*, 2009, 37(2): 142-146.
- [6] Bai X Y, Zhang X B, Chen H, et al. Using <sup>137</sup>Cs fingerprinting technique to estimate sediment deposition and erosion rates from Yongkang depression in the karst region of Southwest China[J]. *Land Degradation and Development*, 2010, 21(5): 474-479.
- [7] Abril J M. Radiometric dating of recent sediments: On the performance of <sup>210</sup>Pb-based CRS chronologies under varying rates of supply[J]. *Quaternary Geochronology*, 2019, 51(4): 1-14.
- [8] Chen X, Qiao Q L, McGowan S, et al. Determination of geochronology and sedimentation rates of shallow lakes in the middle Yangtze reaches using <sup>210</sup>Pb, <sup>137</sup>Cs and spheroidal carbonaceous particles[J]. *Catena*, 2019, 174(11): 546-556.
- [9] Zhang X B, Bai X Y, Liu X M. Application of a <sup>137</sup>Cs fingerprinting technique for interpreting responses of sediment deposition of a karst depression to deforestation in the Guizhou Plateau, China[J]. *Science China-earth Sciences*, 2011, 54(3): 431-437.
- [10] Du P, Walling D E. Using <sup>210</sup>Pb measurements to estimate sedimentation rates on river floodplains[J]. *Environmental Radioactivity*, 2012, 103(1): 59-75.
- [11] Li Z W, Xu X L, Zhang Y H, et al. Reconstructing recent changes in sediment yields from a typical karst watershed in southwest China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 269(1): 62-70.
- [12] 陈永伟, 黄英伟, 周羿. “哥伦布大交换”终结了“气候—治乱循环”吗?: 对玉米在中国引种和农民起义发生率的一项历史考察[J]. *经济学*, 2014, 13(3): 1215-1238.
- [13] Bai X Y, Zhang X B, Long Y, et al. Use of <sup>137</sup>Cs and <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 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.
- [14] Pruski F, Nearing M. Climate-induced changes in erosion during the 21st century for eight US locations[J]. *Water Resources Research*, 2002, 38(12): 34-44.
- [15] 吕俊梅, 祝从文, 琚建华, 等. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J]. *大气科学*, 2014, 38(4): 782-794.
- [16] 李豪, 张信宝, 文安邦, 等. 喀斯特峰丛洼地泥沙堆积的<sup>137</sup>Cs 示踪研究: 以丫吉试验场为例[J]. *地球与环境*, 2016, 44(1): 57-63.
- [17] Peng T, Wang S J. Effects of land use, land cover and rainfall regimes on the surface runoff and soil loss on karst slopes in southwest China[J]. *Catena*, 2012, 90(1): 53-62.
- [18] 何永彬, 张信宝, 贺秀斌. 利用<sup>137</sup>Cs 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.
- [19] 张信宝, 白晓永, 刘秀明. 洼地沉积的<sup>137</sup>Cs 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.
- [20] 吕明权, 王继军, 江青龙, 等. 基于 LUCC 的冀北土石山区东北沟流域土壤侵蚀时空变化分析[J]. *中国水土保持科学*, 2011, 9(3): 18-25.
- [21] 魏建兵, 肖笃宁, 李秀珍, 等. 东北黑土区小流域农业景观结构与土壤侵蚀的关系[J]. *生态学报*, 2005, 26(8): 2608-2615.
- [22] 景可, 焦菊英, 李林育, 等. 中国南方红壤丘陵区土壤侵蚀量与泥沙输移比研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(12): 1476-1482.
- [23] 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<sup>137</sup>Cs 断代[J]. *地理研究*, 2006, 25(4): 641-648.
- [24] 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.
- [25] Li Z W, Xu X L, Zhu J X, et al. Sediment yield is closely related to lithology and landscape properties in heterogeneous karst watersheds[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 568(10): 437-446.
- [26] Zhao G G, Klik A, Mu X M, et al. Sediment yield estimation in a small watershed on the northern Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2015, 241: 343-352.