

文章编号: 1008 - 2786 - (2015) 5 - 521 - 07

DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000065

# 川中丘陵区小流域土地利用变化和泥沙来源示踪的 $\delta^{13}\text{C}$ 技术

高进长<sup>1,2</sup>, 朱虹<sup>3</sup>, 龙翼<sup>1\*</sup>, 张信宝<sup>1,4</sup>, 朱波<sup>1</sup>, 唐强<sup>1</sup>, 刘秀明<sup>4</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所/山地表生过程与生态调控重点实验室, 四川 成都 610041;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 四川省电力设计院, 四川 成都 610072; 4. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002)

**摘 要:** 在 2010 年和 2011 年, 采集长江上游川中丘陵区万安沟小流域塘库沉积泥沙、河床沉积泥沙、不同土地利用类型的表层土壤, 应用  $\delta^{13}\text{C}$  技术研究小流域土地利用变化和泥沙来源。结果表明: 森林坡地、弃耕坡地和耕种梯田的表层土壤  $\delta^{13}\text{C}$  值分别是  $-26.40\text{‰}$ ,  $-25.91\text{‰}$  和  $-25.81\text{‰}$ , 非常相近, 说明土壤有机物  $\delta^{13}\text{C}$  主要是占主导地位 C3 植物的残留物, 而 C4 植物玉米对土壤有机物  $\delta^{13}\text{C}$  值几乎没有影响。结合  $\delta^{13}\text{C}$  值和土地利用变化分析, 土壤和沉积泥沙  $\delta^{13}\text{C}$  值是土地利用状况的良好指示因子, 较低  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $-26\text{‰}$ ) 表明丘陵坡地森林覆盖率较高, 而较高  $\delta^{13}\text{C}$  值 ( $-24.30\text{‰}$ ) 则说明森林覆盖率较低。 $\delta^{13}\text{C}$  技术只有在沉积泥沙主要来源是土壤有机物的条件下, 才能定量评价沉积泥沙的不同来源。由于当地沉积泥沙有机物是土壤有机物、生物碎屑和生活污水的混合物, 采用  $\delta^{13}\text{C}$  指标示踪泥沙来源的可靠性受到影响, 但可以肯定地说,  $\delta^{13}\text{C}$  技术对定量评价沉积泥沙的来源是有帮助的。

**关键词:** 土地利用变化; 泥沙来源;  $\delta^{13}\text{C}$  技术; 川中丘陵区

中图分类号: S157

文献标志码: A

碳作为重要的生命元素, 在自然界中, 最为常见的碳同位素是  $^{12}\text{C}$  与  $^{13}\text{C}$ , 它们分别占自然界中碳素总量的 98.89% 与 1.11%。碳稳定性同位素之间没有明显的化学性质差别, 但其物理化学性质 (如在气相中的传导率、分子键能、生化合成和分解速率等) 因质量上的不同常有微小差异, 使反应物和生成物在同位素组成上有所差别, 即由于其分馏现象的存在, 导致不同植物体内光合产物  $^{13}\text{C}$  含量存在差异<sup>[1]</sup>。通常用稳定碳同位素比值  $\delta^{13}\text{C}$  表征这种差异, 即  $\delta^{13}\text{C}$  值表示样品的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  同位素比值相对于某一标准  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  同位素比值的千分差。

## 1 研究现状

20 世纪 70 年代初, Farmer 等<sup>[2]</sup> 通过将植物稳定碳同位素引入大气  $\text{CO}_2$  浓度变化的研究为稳定碳同位素在植物中的应用奠定了基础。不同光合型植物由于固定  $\text{CO}_2$  途径的差异, 导致植物体在光合作用过程中对  $^{13}\text{C}$  选择吸收的比例不同, 从而使植株体内  $\delta^{13}\text{C}$  存在差异, 据此可将陆生植物分为 C3、C4 和 CAM 植物, 其中 CAM 植物比较少见。Farquhar 等<sup>[3]</sup> 最早提出利用稳定碳同位素技术区分 C3 植物和 C4 植物, 自然界植物属约 85% 都为 C3 植物

收稿日期( Received date): 2015 - 06 - 17; 修回日期( Accepted): 2015 - 07 - 15。

基金项目( Foundation item): 中国科学院西部行动计划( KZCX2 - XB3 - 09); 国家自然科学基金( 41201272); 国家科技支撑计划( 2011BAD31B03)。[Chinese Academy of Sciences ( KZCX2 - XB3 - 09); National Natural Science Foundation of China ( 41201272); Ministry of Science and Technology of China( 2011BAD31B03) . ]

作者简介( Biography): 高进长( 1984 - ), 男, 河南安阳人, 博士, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。[Gao Jinzhang ( 1984 - ), male, An Yang city of Henan province, doctor, major in study of soil erosion and water and soil conservation. ] E - mail: jzhgao@imde. ac. cn

\* 通信作者( Corresponding author): 龙翼( 1976 - ), 男, 副研究员, 研究方向: 土壤侵蚀与水土保持。[Long Yi ( 1976 - ), male, Associate Professor, major in study of soil erosion and water and soil conservation. ] E - mail: longyi@imde. ac. cn

(如小麦、番薯、甜菜等),  $\delta^{13}\text{C}$  通常在  $-22\text{‰} \sim -30\text{‰}$  之间; C4 植物碳同位素的分馏较小, 范围通常在  $-10\text{‰} \sim -18\text{‰}$ , 常见的 C4 植物包括甘蔗和玉米等<sup>[4]</sup>。C3 植物和 C4 植物中  $\delta^{13}\text{C}$  平均值分别约为  $-27\text{‰}$  和  $-13\text{‰}$ <sup>[5]</sup>。大部分冷季生长的草本、灌木、乔木属于 C3 植物, 而暖季生长的草本和粮食作物多属于 C4 植物。

近年来, 随着  $\delta^{13}\text{C}$  分析方法和技术的进步, 稳定碳同位素方法在土壤研究中的应用范围进一步扩大。土壤中的有机物主要源于地表的植物, 由于土壤有机碳分解过程中的分馏作用比植物光合作用固定碳时分馏作用小得多<sup>[6]</sup>, 所以土壤有机碳中的  $\delta^{13}\text{C}$  值与作为该有机碳来源的植被  $\delta^{13}\text{C}$  值基本一致, 因此可根据植物的  $\delta^{13}\text{C}$  判断土壤有机质的来源<sup>[7]</sup>, 农田、森林、草地生态系统的 C3 和 C4 植被类型的转变, 对土壤有机碳  $\delta^{13}\text{C}$  值有一个持续性的影响, 土壤有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值变化反映的是地表植被的平均状况, 当原始植被类型被新的具有不同碳同位素组成的植被所取代时, 将导致土壤有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值发生变化。所以土壤有机碳  $\delta^{13}\text{C}$  值记录了 C3 和 C4 生态系统类型之间的转换迁移历史, 因此, 利用土壤剖面有机碳的  $\delta^{13}\text{C}$  差异和变化, 可以重建以 C3/C4 为主要植物类型的生态系统的长期变化过程(历史格局)<sup>[3]</sup>。Schwartz 等对非洲刚果灰壤进行研究后认为,  $A_1$  层土壤有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值与目前生长在它上面的大草原禾本科植物幼苗的  $\delta^{13}\text{C}$  值相一致, 下层土壤有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值与森林土壤  $A_1$  层有机质及  $B_{2h}$  层植物根化石碎片的  $\delta^{13}\text{C}$  值相一致, 从而证实了灰壤有机质产生于森林植被<sup>[8]</sup>。

利用  $\delta^{13}\text{C}$  技术来研究沉积物的来源, 是当今国际上发展起来的新技术。其基本原理是: 泥沙与相应源地表层土壤的有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值基本保持一致, 不同产沙源地(耕地、林草地等)由于植被差异, 侵蚀产沙中的有机质  $\delta^{13}\text{C}$  值有差别, 而这些差别会随泥沙的迁移堆积到新的地方, 因此, 分析研究沉积物中  $\delta^{13}\text{C}$  值的特点, 可以研究沉积物的来源。刘敏等在研究长江河口南岸潮滩 12 个典型站位表层沉积物有机质时发现, 沉积泥沙有机质中的  $\delta^{13}\text{C}$  受陆源和海源有机质输入量的影响<sup>[9]</sup>,  $\delta^{13}\text{C}$  可以间接反映出沉积泥沙来源。综合运用  $\delta^{13}\text{C}$  和  $\delta^{15}\text{N}$  等方法分析沉积泥沙来源, Lacey 等在澳大利亚的布雷默河上游的研究中发现, 冲沟和河道泥沙的  $\delta^{13}\text{C}$  是有差异的<sup>[10]</sup>, 可进一步估算沉积物来源。蔡德陵等应用有

机质的碳同位素证实, 山东水下三角洲高沉积速率沉积物的主要物质来源是现代黄河物质, 而南黄海深水区的陆源沉积物质主要来自废黄河物质和现代黄河物质<sup>[11]</sup>。臧启运等应用常规法和  $\delta^{13}\text{C}$  示踪法对比研究, 冲绳海槽海洋沉积物的陆源物质主要来自中国大陆, 生物源物质主要是海洋生物的遗骸和遗迹, 火山源物质来自该区和附近区域的火山活动<sup>[12]</sup>。

放射性核素  $^{137}\text{Cs}$  已被广泛应用于世界各地土壤侵蚀速率的测定和湖泊、水库和洪泛平原沉积泥沙的断代和泥沙来源示踪研究<sup>[13-16]</sup>,  $^{137}\text{Cs}$  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 30.2 a,  $^{137}\text{Cs}$  一旦沉降到地面, 就被表层土壤和泥沙中的粘土颗粒吸附, 基本不被植物摄取和淋溶流失, 以后的迁移主要伴随土壤、泥沙颗粒的物理运动<sup>[15]</sup>。环境放射性核素技术(如  $^{137}\text{Cs}$ ), 已经成功地在川中丘陵区, 应用于土壤侵蚀速率、塘库的泥沙沉积速率和泥沙来源等问题的研究<sup>[17-19]</sup>。

本研究尝试应用  $\delta^{13}\text{C}$  技术研究川中丘陵紫色土地区典型小流域泥沙来源, 并与  $^{137}\text{Cs}$  示踪法进行比较, 对  $\delta^{13}\text{C}$  技术在川中丘陵区小流域泥沙来源示踪研究的可靠性进行探索。

## 2 研究区概况

川中丘陵区位于四川盆地中部, 面积为 105 000  $\text{km}^2$ , 海拔大部分在 250 ~ 650 m; 出露岩层为中生代泥岩、粉砂岩和砂岩, 产状基本水平。在中生代岩石坡地, 广泛分布着快速风化的紫色土。因为肥沃的紫色土和适宜的亚热带气候, 适宜耕作和人类居住, 平均耕地比例为 0.6, 人口密度为 540 人/ $\text{km}^2$ , 是我国人口众多的农业地区之一。耕作的紫色土极易受到侵蚀, 因此, 川中丘陵区被认为是长江上游乃及中国侵蚀最严重的地区之一。从 20 世纪 50 年代到 70 年代, 该地区森林遭到过度砍伐<sup>[20]</sup>。在 1960—1962 年的饥荒时期, 丘陵坡地大量种植玉米、番薯等农作物。自 1978 年以后, 随着家庭联产承包的实行, 我国农业生产伴随着国家经济迅速发展<sup>[21]</sup>。从 20 世纪 80 年代, 因为粮食和燃料短缺问题被解决, 人们放弃耕种陡坡耕地, 砍伐森林也逐渐被禁止, 并开始植树造林(主要种植柏树)。在 1998 年长江洪水之后, 国家实行退耕还林工程和天然林保护工程, 从此以后, 几乎所有的陡坡丘陵都进行了植树造林,

生态系统得以保护<sup>[22]</sup>。近年来,农民大规模地进城务工,许多陡坡耕地放弃耕作。因此,该区域剧烈变化的植被情况为研究小流域土地利用变化和泥沙来源提供了良好的条件。

万安沟小流域位于川中丘陵区盐亭县,紧邻中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所盐亭紫色土农业生态试验站(盐亭站)(图1)。该小流域集水面积 $10.5\text{ km}^2$ ,海拔 $395\sim 560\text{ m}$ ,流域内出露岩层为侏罗纪蓬莱镇组( $J_3p$ )泥岩、粉砂岩和砂岩,产状基本水平;地貌为典型山谷和丘陵,各占流域面积的 $1/5$ 和 $4/5$ 。

盐亭站在本流域共修建5个水文站(1号~5号)。1号和2号水文站位于主河道上,各有集水面积 $10.5\text{ km}^2$ 和 $5.2\text{ km}^2$ ;3号和4号水文站在次支流上,集水面积分别是 $0.35\text{ km}^2$ 和 $0.23\text{ km}^2$ ;5号水文站在盐亭站的生态沟渠示范区,集水面积为 $2.3\text{ km}^2$ 。

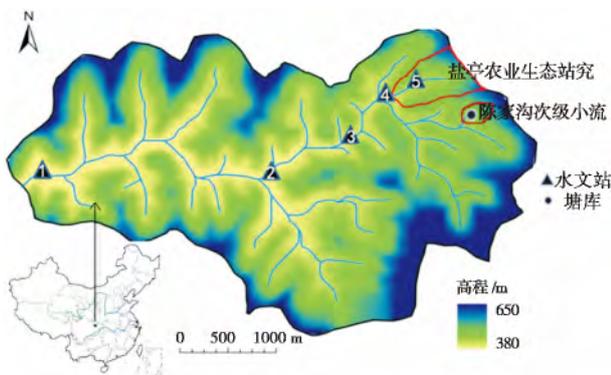


图1 万安沟小流域示意图

Fig. 1 A sketch map of the Wanan Gully catchment

流域丘陵坡地为典型的砂岩陡坡( $25^\circ\sim 30^\circ$ )和泥岩、粉砂岩缓坡台地( $<10^\circ$ )相间的层状地貌。流域谷地土壤为冲积物形成的紫色土。该流域属典型亚热带湿润季风气候,流域年均降雨量 $825\text{ mm}$ ,季节分布不均,夏季占 $65.5\%$ ,降雨集中并多暴雨;年均温度为 $17.5^\circ\text{C}$ ,最高气温 $40^\circ\text{C}$ ,最低气温 $-5.1^\circ\text{C}$ ,无霜期 $294\text{ d}$ <sup>[23]</sup>。坡地土壤为侏罗纪砂泥岩快速风化形成的紫色土<sup>[24]</sup>。缓坡台地和陡坡地面积各占流域丘陵的 $1/3$ 和 $2/3$ 。缓坡台地为耕作多年的农田,每年种植玉米、番薯、油菜(或小麦)三季,但是部分土地自20世纪90年代改为果园或放弃耕作。在20世纪50年代到70年代,像川中丘陵的大部分地区一样,该地区也遭受到严重的滥砍滥

伐。之后,坡地砍伐森林被逐渐禁止,开始植树造林(柏树)。从20世纪90年代起,因为国家的“退耕还林”政策和农民大规模进城务工,许多陡坡耕地放弃耕作。山谷地区几百年来一直种植水稻和油菜(或小麦),一年两熟。山谷中分散着众多的塘库,一般是建于20世纪50年代。

### 3 样品采集和测试

2010年5月,在万家沟流域的陈家沟次级小流域的塘库中,采集沉积泥沙样品。该流域沟口处的塘库建于1956年,主要用于下游的农田灌溉。塘库土坝由挖取原库内沟底土壤筑成,坝高 $4.75\text{ m}$ ,库容 $5300\text{ m}^3$ ,最大蓄水深度 $2.5\text{ m}$ ,集水面积 $0.15\text{ km}^2$ ,水域面积 $2500\text{ m}^2$ ,其土地利用类型代表着万家沟流域的土地利用类型。陈家沟内的缓坡台地和陡坡地各占流域面积的 $1/3$ 和 $2/3$ ,但谷地面积的比例小于万家沟流域的平均值,丘陵坡下有10户人家的小村庄。1956年以来,从塘库淤积量推算,本次级小流域的产沙量是 $430\text{ t}\cdot\text{km}^2/\text{a}$ 。在2010年5月,塘库干涸时,在塘库中心,采用剖面法分层取样,采集沉积泥沙样品,收集垂直沉积泥沙样品 $2.1\text{ m}$ 长。由沉积泥沙样品剖面可以看到,85 cm以下是灰白致密粉砂粘土层;在85 cm以上为深紫色粉质粘土层。通过调查当地农民得知,灰白色致密物是原河道沉积物,而深紫色层是塘库沉积物。在沉积泥沙剖面深度 $0\sim 85\text{ cm}$ 之间,以 $3\sim 5\text{ cm}$ 间隔,采集样品;在 $85\sim 210\text{ cm}$ 之间,以 $10\text{ cm}$ 间隔采集样品,共采集34个塘库沉积泥沙样品。

使用刮土刀采集流域内表层土壤样品,采样深度小于 $3\text{ cm}$ ,分别采集陈家沟次支流流域中森林坡地、坡耕地、弃耕坡地表层土壤样品,每个样品由多点取到的土样组成,混合均匀,每种类型取6个样品;2011年7月,在5个水文站处,各采集1个泥沙样品;另外在流域内的水稻田内用多点采集混合法采集1个水稻田表层土壤样品,共采集19个土壤样品和5个沉积泥沙样品。

所有样品经过自然风干,剔除落叶、石砾杂物,研磨、过筛( $2\text{ mm}$ )、称重后进行测试。样品 $^{137}\text{Cs}$ 活度采用同轴高纯锗探头(Ortec,GMX40P4)和多通道分析系统测定。样品的 $^{137}\text{Cs}$ 含量根据 $662\text{ keV}$ 谱峰面积求算。样品测重 $\geq 250\text{ g}$ ,测试时间 $\geq 33000\text{ s}$ ,测试误差为 $\pm 5\%$ (90%信度),检测下限 $0.7\text{ Bq/l}$

kg。

样品的碳稳定同位素测定方法是:取适量样品,加入过量的正磷酸除去样品中碳酸盐并烘干,真空密封后在850℃高温下以铂丝作为催化剂,用过量氧化铜将测试样品中的有机碳全部氧化为CO<sub>2</sub>,然后采用低温蒸馏法对产生的CO<sub>2</sub>提纯,然后将分离出的CO<sub>2</sub>通过MAT-252质谱仪测量碳稳定同位素。沉积泥沙样品的粒径组成采用马尔文2000型激光粒度仪进行分析。

## 4 结果与讨论

塘库沉积泥沙<sup>137</sup>Cs活度和δ<sup>13</sup>C值的深度分布如图2和表1所示。在85 cm以下的原河道灰白致密沉积泥沙中无<sup>137</sup>Cs检出;在85 cm以上的深紫色沉积泥沙的<sup>137</sup>Cs活度较大,表明0~85 cm深度的沉积泥沙为1956年建筑土坝后淤积的泥沙。表层泥沙(0~5 cm)的<sup>137</sup>Cs活度3.82 ± 0.53 Bq/kg。剖面55~60 cm处<sup>137</sup>Cs存在显著峰值(26.85 ± 2.77 Bq/kg),对应1963年全球核爆试验大气沉降峰值,表明该深度为1963年的沉积,因此推算出自1963年以来,年平均泥沙沉积速率为1.22 cm/a。

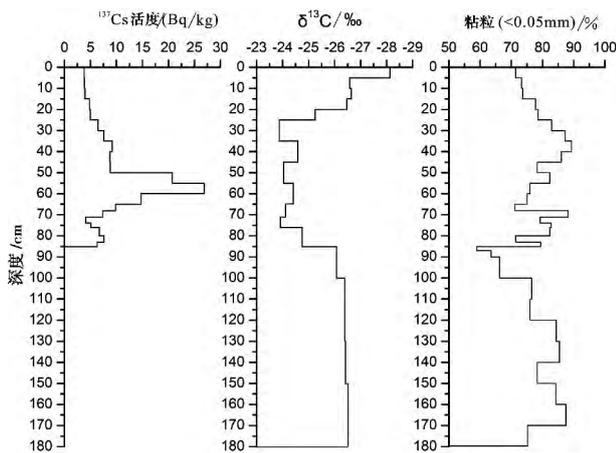


图2 塘库沉积泥沙剖面<sup>137</sup>Cs比活度和δ<sup>13</sup>C值深度变化

Fig. 2 Depth distributions of <sup>137</sup>Cs activities, δ<sup>13</sup>C values and clay particle in the pond sediments

依照δ<sup>13</sup>C值,沉积泥沙剖面被分为3个部分,85~210 cm为下部,δ<sup>13</sup>C值变化范围是-26.074 ± 0.009‰ ~ -26.506 ± 0.012‰,均值为-26.35‰;25~85 cm为中部,δ<sup>13</sup>C值在-23.875 ± 0.018‰ ~ -24.750 ± 0.015‰之间变化,均值为-24.30‰;0

~25 cm为上部,除了表层δ<sup>13</sup>C值(-28.132 ± 0.005‰)较低外,变化范围是-25.244 ± 0.028‰ ~ -26.644 ± 0.009‰,均值为-26.61‰。如果塘库沉积速率为1.22 cm/a,那么,沉积泥沙剖面0~25 cm部分是最近20 a的泥沙淤积。考虑到塘库被淤积填满,沉积区域面积变大,另外自1980s森林覆盖率的增加,流域的产沙量减小。因此,我们推断0~25 cm沉积泥沙,是过去25 a的沉积,即大约从1985年以来的沉积泥沙。1956年前原河道沉积泥沙(85~210 cm)和1956年后塘库沉积泥沙(0~85 cm)的δ<sup>13</sup>C值分别为-26.35‰和-26.61‰,二者相近。而在1956—1985年期间,塘库沉积物(25~85 cm)的δ<sup>13</sup>C值为-24.30‰,高于1956年前和1985年后沉积泥沙的δ<sup>13</sup>C值。

可以很清晰的看出,在1956年以前,丘陵坡地生长良好的次生林与塘库沉积泥沙较低的δ<sup>13</sup>C值有关;在1985年以后,人工森林与塘库沉积泥沙较低的δ<sup>13</sup>C值相联系;在1956—1985年期间,丘陵坡地砍伐森林及过度垦殖与塘库泥沙较高的δ<sup>13</sup>C值有密切联系,这是因为含有较低的δ<sup>13</sup>C值的有机物主要来源于森林,而含有较高δ<sup>13</sup>C值的有机质主要来源于耕地。1号和2号水文站的主河道沉积泥沙的δ<sup>13</sup>C值分别是-25.934 ± 0.024‰和-26.479 ± 0.044‰,这与塘库沉积泥沙上部的δ<sup>13</sup>C均值相近。这说明陈家沟次级小流域的土地利用状况与整个流域的土地利用状况相似。5号水文站(盐亭站生态沟渠)河床沉积泥沙的δ<sup>13</sup>C值是-25.291 ± 0.019‰,比流域主河道沉积泥沙的δ<sup>13</sup>C值稍高,可能是因为受到沟渠内水生植物或细菌的影响。次级小流域中靠近村庄的3号和4号水文站,其河床沉积泥沙的δ<sup>13</sup>C值分别是-27.415 ± 0.014‰和-27.048 ± 0.015‰,比主河河床沉积泥沙的δ<sup>13</sup>C值稍低。这两处水文站上游有村庄分布,当地农民积极发展畜牧业,习惯收割草本植物为牲畜饲料。有研究表明,在我国南方地区,草本植物δ<sup>13</sup>C平均均值为-28.9‰。该处沉积泥沙偏低δ<sup>13</sup>C值表明沉积泥沙可能受到附近村庄的牲畜粪便和生活污水等污染。这也说明,陈家沟次级小流域塘库沉积泥沙(0~5 cm)较低的δ<sup>13</sup>C值(-28.132 ± 0.005‰)是牲畜粪便引起的。

森林坡地、弃耕坡地和耕种梯田的表层土壤δ<sup>13</sup>C平均值分别为-26.40‰(-26.080 ± 0.008‰ ~ -26.509 ± 0.019‰)、-25.91‰(-25.002 ± 0.014‰

表1 沉积泥沙和表层土壤中  $^{137}\text{Cs}$  比活度和  $\delta^{13}\text{C}$  值  
Table 1  $^{137}\text{Cs}$  contents and  $\delta^{13}\text{C}$  in sediments and surface soils

沉积泥沙和土壤 Sediment and soil	$^{137}\text{Cs}$ 比活度 $^{137}\text{Cs}$ activity / ( Bq/kg)	$\delta^{13}\text{C}$ 平均值 Mean value of $\delta^{13}\text{C}$ / ( Bq/kg)	样品数量 Number samples	说明 Note
塘库沉积泥沙上部 (0~25 cm)	4.28( 3.82 ± 0.53 ~ 6.24 ± 0.75)	-26.61( -25.244 ± 0.028 ~28.132 ± 0.005)	5	深紫色层
塘库沉积泥沙中部 (25~85 cm)	10.00( 26.85 ± 2.77 ~ 4.09 ± 0.52)	-24.30( -23.875 ± 0.018 ~ -24.750 ± 0.015)	15	深紫色层, 1963 年的 $^{137}\text{Cs}$ 峰值 在 55~60 cm
塘库沉积泥沙下部 (58~210 cm)	0	-26.35( -26.074 ± 0.009 ~ -26.506 ± 0.012)	14	灰白色致密层
1号水文站河床沉积物	1.59 ± 0.60	-25.934 ± 0.024	1	集水面积 10.5 km <sup>2</sup>
2号水文站河床沉积物	-	-26.479 ± 0.044	1	集水面积 5.2 km <sup>2</sup>
3号水文站河床沉积物	3.96 ± 0.72	-27.415 ± 0.014	1	次级小流域, 集水面积 0.035 km <sup>2</sup> 临近村庄
4号水文站河床沉积物	1.52 ± 0.75	-27.048 ± 0.015	1	次级流域, 集水面积 0.023 km <sup>2</sup> , 临近村庄
森林坡地	4.90( 2.93 ± 0.41 ~ 11.92 ± 1.33)	-26.40( -26.080 ± 0.008 ~ -26.509 ± 0.019)	6	N1, N2, N3 坡长 5 700 m; N4 坡 长 3 200 m, N5 坡长 2 030 m
弃耕坡地	2.24( 0.76 ± 0.15 ~ 2.74 ± 0.38 )	-25.91( -25.002 ± 0.014 ~ -26.899 ± 0.011)	6	
耕作梯田	3.96( 1.76 ± 0.28 ~ 5.60 ± 0.69)	-25.81( -24.820 ± 0.018 ~ -26.508 ± 0.031)	6	
紫色土	-	-25.648 ± 0.015	1	

~ -26.899 ± 0.011‰) 和 -25.81‰( -24.820 ± 0.018‰ ~ -26.508 ± 0.031‰), 三者非常接近, 表明土壤有机物为本地区主导自然植被 C3 植物的残余物质。坡地及梯田大量种植的玉米是典型的 C4 植物, 其  $\delta^{13}\text{C}$  值是 -11.4‰, 但由于当地农民习惯收割玉米秆用作燃料, 玉米秸秆几乎没有留在田地, 因此, 当地耕地土壤有机物  $\delta^{13}\text{C}$  值不受 C4 植物玉米的影响。与土壤表层的  $\delta^{13}\text{C}$  值相比, 塘库沉积泥沙表层和村庄附近河床沉积泥沙的  $\delta^{13}\text{C}$  值更低, 表明塘库和河床沉积泥沙中的有机物不仅受到与土壤有机物的影响, 而且也受到生物碎屑和溶解有机物的影响。因此, 该流域沉积泥沙的有机物是土壤有机物、生物碎屑和村庄污水的混合产物。我们认为, 当沉积泥沙有机物主要来源是土壤有机物时,  $\delta^{13}\text{C}$  技术才可以用来定量评价不同泥沙来源的泥沙贡献, 泥沙有机物来源较复杂时,  $\delta^{13}\text{C}$  技术示踪泥沙来源的准确性受到影响。对于本研究区域,  $\delta^{13}\text{C}$  技术虽然不能定量鉴定沉积泥沙来源的贡献, 但是仍

然是研究土地利用变化的有力工具, 对评价不同泥沙来源对沉积泥沙的贡献是有帮助的, 如塘库沉积泥沙中部的  $\delta^{13}\text{C}$  值较高, 说明该部分沉积泥沙主要来源于耕地。

塘库沉积泥沙(0~5 cm)的  $^{137}\text{Cs}$  活度是 3.82 ± 0.53 Bq/kg, 与耕作梯田土壤的  $^{137}\text{Cs}$  活度均值(3.96 Bq/kg)相近, 比森林表层土壤  $^{137}\text{Cs}$  活度均值(4.90 Bq/kg)低, 比弃耕坡地表层土壤  $^{137}\text{Cs}$  活度平均值(2.24 Bq/kg)高。可以认为, 近年来塘库沉积泥沙很可能主要来源于耕作梯田。水稻田的  $^{137}\text{Cs}$  活度是 2.28 ± 0.39 Bq/kg, 比塘库沉积泥沙表层的  $^{137}\text{Cs}$  活度低, 可能是因为部分泥沙是来源于不含  $^{137}\text{Cs}$  的库岸侵蚀泥沙, 当地农民每年整地时, 习惯铲削田坎侧壁以增加田内土壤, 这种行为也带入了不含  $^{137}\text{Cs}$  的田岸土壤。河床沉积泥沙的  $^{137}\text{Cs}$  活度变化范围是 1.52 ± 0.75 Bq/kg ~ 3.96 ± 0.72 Bq/kg, 较低  $^{137}\text{Cs}$  活度表明一部分沉积泥沙来自于不含  $^{137}\text{Cs}$  的库岸侵蚀泥沙。

## 5 结 论

1. 研究小流域的森林坡地、弃耕坡地和耕种梯田表层土壤的  $\delta^{13}\text{C}$  值分别是  $-26.40\%$ 、 $-25.91\%$  和  $-25.81\%$ ，非常相近，说明土壤有机物是当地植被中占主导地位的 C3 植物的残留物。虽然作为 C4 植物的玉米在本区域广泛种植，但可能因为玉米秆作为燃料被收割，离开农田，因此玉米对土壤有机质物中  $\delta^{13}\text{C}$  值几乎没有影响。

2. 土壤和沉积泥沙中  $\delta^{13}\text{C}$  值可以作为反映土地利用状况的指示因子，当  $\delta^{13}\text{C}$  值低于  $-26\%$  时，表明该流域丘陵坡地的森林覆盖率良好，而高于  $-24.30\%$  则显示森林覆盖率较低。

3.  $\delta^{13}\text{C}$  技术只有在沉积泥沙主要来源是土壤有机物的条件下，才能定量评价沉积泥沙的不同来源。由于当地沉积泥沙有机物是土壤有机物、生物碎屑和生活污水的混合物，采用  $\delta^{13}\text{C}$  指标示踪泥沙来源的可靠性受到影响，但可以肯定地说， $\delta^{13}\text{C}$  技术对定量评价沉积泥沙的来源是有帮助的。

## 参考文献(References)

- [1] Lin Guanghui, Ke Yuan. Stable isotope techniques and global change research[G]//Li Bo ed. Modern Ecology Course. Science Press, Beijing, 1995. [林光辉, 柯渊. 稳定同位素技术与全球变化研究[G]//李博. 现代生态学讲座, 北京: 科学出版社, 1995.]
- [2] Farmer J G, Baxter M S. Atmospheric carbon dioxide levels as indicated by the stable isotope record in wood[J]. Nature, 1974, 247: 273-275
- [3] Farquhar G D, Ehleringer J R, Hubick K T. Carbon isotope discrimination and photosynthesis[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1989, 40: 503-537
- [4] Benson S, Lennard C, Maynard P, et al. Forensic applications of isotope ratio mass spectrometry - A review[J]. Forensic Science International, 2006, 157(1): 1-22
- [5] Bernoux M, Cerri C C, Neill C, et al. The use of stable carbon isotopes for estimating soil organic matter turnover rates[J]. Geoderma, 1998, 82(1-3): 43-58
- [6] Nadelhoffer K J, Fry B. Controls on natural nitrogen-15 and carbon-13 abundances in forest soil organic matter[J]. Soil Science Society of America, 1988, 52(6): 1633-1640
- [7] Wan Guoan. Application of stable carbon isotope for paleoenvironmental research. Quaternary sciences, 2003, 23(5): 471-484 [王国安. 稳定碳同位素在第四纪古环境研究中的应用[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 471-484]
- [8] Schwartz D, Mariotti A, Lanfranchi R.  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  Ratios of soil organic matter as indicators of vegetation changes in the Congo[J]. Geoderma, 1986, 39(2): 97-103
- [9] Liu Min, Hou Lijun, Xu Shiyuan, et al. Carbon and nitrogen stable isotopes as tracers to source organic matter in the Yangtze estuary[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 918-926 [刘敏, 侯立军, 许世远, 等. 长江口潮滩有机质来源的 C、N 稳定同位素示踪[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 918-926]
- [10] Lacey J P, Olley J, Pietsch T J, et al. Identifying subsoil sediment sources with carbon and nitrogen stable isotope ratios. Hydrological Processes, 2015, 29(8): 1956-1971
- [11] Cai Deling, Shi Xuefa, Zhou Weijian, et al. Sources and transportation of suspended matter and sediment in the South Yellow Sea: Evidence from stable carbon isotopes [J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46( Suppl.): 16-23 [蔡德陵, 石学法, 周卫健, 等. 南黄海悬浮体和沉积物的物质来源和运移: 来自碳稳定同位素组成的证据[J]. 科学通报, 2001, 46(增刊): 16-23]
- [12] Zang Qiyun, Cai Deling, Wang Qi, et al. Discrimination of material source and quantitative estimation of surficial from the middle section of Okinawa Trough[J]. Journal of Oceanography of Huanghai and Bohai Seas, 1999, 17(4): 20-29 [臧启运, 蔡德陵, 王琦, 等. 冲绳海槽中段表层沉积物物源判别及定量估算[J]. 黄渤海海洋, 1999, 17(4): 20-29]
- [13] Delaune R D, Patrick W H, Buresh R J. Sedimentation rates determined by  $^{137}\text{Cs}$  dating in a rapidly accreting salt marsh[J]. Nature, 1978, 275: 532-533
- [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 Science Journal, 1990, 35(3): 243-252
- [15] Ritchie J C, Finney V L, Oster K J. Sediment deposition in the flood plain of Stemple Creek Watershed, northern California[J]. Geomorphology, 2004, 61(3-4): 347-360
- [16] Gary G C, Jon M O, Francis P, et al. The dominant erosion processes supplying fine sediment to three major rivers in tropical Australia, the Daly ( NT ), Mitchell ( Qld ) and Flinders ( Qld ) Rivers[J]. Geomorphology, 2012, 151-152 ( 15 ): 188-195
- [17] Zheng Jinjun, Zhang Xinbao, He Xiubin. Combining WEPP model with  $^{137}\text{Cs}$  to study spatial pattern of soil redistribution on purple slope-land in Sichuan Hilly Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(2): 19-23 [郑进军, 张信宝, 贺秀斌. 川中丘陵区坡耕地侵蚀空间分布的 WEPP 模型和  $^{137}\text{Cs}$  法研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(2): 19-23]
- [18] Combining  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  to study sediment source on small catchment in Sichuan Hilly Basin[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(15): 1537-1541 [张信宝, 贺秀斌, 文安邦, 等. 川中丘陵区小流域泥沙来源的  $^{137}\text{Cs}$  和  $^{210}\text{Pb}$  双同位素法研究[J]. 科学通报, 2004, 49(15): 1537-1541]
- [19] Qi Yongqing, Zhang Xinbao, He Xiubin, et al. A study on soil erosion induced sediment yield by reservoir and pond deposits dating with  $^{137}\text{Cs}$  in small catchments of the hilly Sichuan Basin and the Three Gorges Region[J]. Geographical research, 2006, 25(4): 641-648 [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  $^{137}\text{Cs}$  断代[J]. 地理研究, 2006, 25(4): 641-648]

- 2006, 25(4): 641 - 648]
- [20] Zhang Xinbao, Long Yi, Wen Anbang, et al. Discussion on applying  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  for lake sediment dating in China [J]. *Quaternary Sciences*, 2012, 32(3): 430 - 440 [张信宝, 龙翼, 文安邦, 等. 中国湖泊沉积物 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 断代的一些问题[J]. 第四纪研究, 2012, 32(3): 430 - 440]
- [21] Shi Wei. The creation of the household contract responsibility system and its performance [J]. *Agricultural Economics*, 2014, 25(03): 32 - 33 [施威. 家庭承包责任制的制度创新及其绩效表现[J]. 农业经济, 2014, 25(03): 32 - 33]
- [22] Li Guoping, Zhang Wenbin. Contract design and efficiency of ecological compensation under the Grain for Green Project [J]. *Resources Science*, 2014, 36(8): 1670 - 1678 [李国平, 张文彬. 退耕还林生态补偿契约设计及效率问题研究[J]. 资源科学, 2014, 36(8): 1670 - 1678]
- [23] Zhu Bo, Peng Kui, Gao Meirong, et al. Land Use Change and Effects on Eco-environment in Hilly Area of Central Sichuan Basin [J]. *Mountain Research*, 2001, 19(增), 14 - 19 [朱波, 彭奎, 高美荣, 等. 川中丘陵区土地利用变化的生态环境效应——以中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站集水区为例[J]. 山地学报, 2001, 19(Suppl.), 14 - 19]
- [24] The Soil laboratory of Chengdu branch, Chinese academy of science. Purple Soils In China (1) [M]. Science Press, Beijing, 1995: 27 - 30 [中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土(上篇)[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 27 - 30]

## A Case Study on Land Use Changes and Sediment Sources by the $\delta^{13}\text{C}$ Technique in the Hilly Sichuan Basin, the Upper Reaches of Yangtze River, China

GAO Jinzhang<sup>1,2</sup>, ZHU Hong<sup>3</sup>, LONG Yi<sup>1</sup>, ZHANG Xinbao<sup>1,4</sup>, ZHU Bo<sup>1</sup>, TANG Qiang<sup>2</sup>, LIU Xiuming<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation/Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Sichuan Electric Power Design Institute, Chengdu 610072, China;

4. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** The  $\delta^{13}\text{C}$  techniques are employed to study land use changes and sediment sources in the Hilly Sichuan Basin. Some samples of pond sediments, channel bed sediments and four types of surface soils were collected in 2010 and 2011. The results show that the average  $\delta^{13}\text{C}$  values of surface soils for forest slopes, recently abandoned cultivated sloping land and cultivated terraces are very close and they are  $-26.40\text{‰}$ ,  $-25.91\text{‰}$  and  $-25.81\text{‰}$ , respectively. Those  $\delta^{13}\text{C}$  values indicate that the soil organic matter is residues of C3 plants in general, which are dominated in the natural plants of the region. Although maize is a common crop on rainfed fields in the catchment, it has little influence on the  $\delta^{13}\text{C}$  values of the soil organic matter. By integrated analyses of the  $\delta^{13}\text{C}$  values in the sediments with the land use changes, it is suggested that  $\delta^{13}\text{C}$  values in soils and sediments are a good indicator for land use conditions. The lower values of around  $-26\text{‰}$  indicates good forest coverage conditions on the hillslopes in the catchment, while the higher value of around  $-24.30\text{‰}$  indicates poor forest coverage conditions in the region. As the organic matter in the sediments is a mixture of soil organic matter, biological detritus as well as village sewages,  $\delta^{13}\text{C}$  technique can only be used for quantitative assessment of sediment contributions from different sources under such environment conditions where the organic matter in sediments is predominately contributed from soil organic matter. However, the technique is helpful for qualitative assessment of sediment contributions.

**Key words:** land use change; sediment source;  $\delta^{13}\text{C}$  technique; Hilly Sichuan Basin