

# 勐统河流域出口沉积物的 $^{210}\text{Pb}$ 计年研究

卫仁娟<sup>1,2</sup>, 梁川<sup>1</sup>, Amanda H. Schmidt<sup>3</sup>, 张春敏<sup>1</sup>

(1. 四川大学 水利水电学院 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 成都 610065;

2. 四川水利职业技术学院, 成都 611231; 3. Geology Department, Oberlin College, OH 44074, USA)

**摘要:**为了探索沉积速率与降水之间的相关关系,通过实验测出勐统河流域出口河漫滩沉积物剖面中 $^{210}\text{Pb}$ 的比活度,并采用 CRS(Constant Rate of  $^{210}\text{Pb}$  Supply)模型对沉积物进行计年,分析了 20 世纪 50 年代以来流域出口沉积物的沉积速率。 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面分布中的两个特殊沉积点分别对应 2002 年和 1980 年,结合该流域同期的多年降水量分布情况,发现两个特殊沉积点与 1970 年到 1980 年及 2002 年左右的强降水密切相关。根据 CRS 模型计算得出流域出口的沉积速率从 20 世纪 50 年代开始一直呈现增长的趋势,这可能与流域内强烈的人类活动(森林砍伐和不合理的土地利用)有关。

**关键词:**  $^{210}\text{Pb}$ ; 河漫滩沉积物; 沉积速率; CRS 模型; 勐统河流域

中图分类号: P597.3 文献标志码: A 文章编号: 1672-1683(2015)01-0055-04

## $^{210}\text{Pb}$ dating of outlet sediments in Mengtong watershed of Yunnan

WEI Ren-juan<sup>1,2</sup>, LIANG Chuan<sup>1</sup>, Amanda H. Schmidt<sup>3</sup>, ZHANG Chun-min<sup>1</sup>

(1. College of Water Resource and Hydropower & State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611231, China;

3. Geology Department, Oberlin College, OH 44074, USA)

**Abstract:** In order to study the relationship between the sedimentation rate and precipitation, the specific activity of  $^{210}\text{Pb}$  of the floodplain sediments in the outlet of Mengtong watershed was measured by the gamma spectrometry. The age of sediments was calculated using the CRS(Constant Rate of  $^{210}\text{Pb}$  Supply) model, and the sedimentation rate was analyzed since the 1950s. Two special sediment points with high  $^{210}\text{Pb}$  activity were dated at 2002 and 1980, respectively, and they had strong relationship with the precipitation from 1970 to 1980 and in 2002. Sedimentation rate increased greatly from the 1950s determined by the CRS model, which may be caused by the intense human activities(cutting trees and unreasonable land use) in the watershed.

**Key words:**  $^{210}\text{Pb}$ ; floodplain sediment; sedimentation rate; CRS model; Mengtong watershed

河漫滩泥沙的沉积过程和形成的沉积物中包含了大量的环境信息,能够间接反映出气候、植被、人类活动变化过程等<sup>[1]</sup>。流域出口河漫滩沉积物记录了流域内泥沙沉积的速率,能够间接反映流域环境的变化。研究流域内沉积物的年代记录对了解、评价及预测流域环境的变化具有重要的科学意义<sup>[2]</sup>。目前, $^{210}\text{Pb}$  同位素计年已经广泛应用在水库、湖泊、海洋等沉积物的研究中。金爱春<sup>[3]</sup>等对新疆乌伦古湖进行 $^{210}\text{Pb}$  及 $^{137}\text{Cs}$  断代并估算了近几十年来的平均沉积速率,分析影响了沉积速率的主导因素;王福<sup>[4]</sup>研究渤海湾海岸带沉积物剖面中 $^{210}\text{Pb}$  及 $^{137}\text{Cs}$ ,并定量分析了渤海湾区域的现代沉积过程及其环境意义;李春梅<sup>[5]</sup>利用贵州省西南部麦岗

水库的沉积物岩芯剖面的 $^{210}\text{Pb}$  及 $^{137}\text{Cs}$  分布,研究了沉积物近几十年来从慢到快再到慢的沉积过程,并分析了其影响因素。刘秀娟等<sup>[6]</sup>在研究中指出,通过 $^{210}\text{Pb}$  示踪沉积物可以间接得到洪水记录,从而可以弥补实测洪水记录不足,延长洪水记录的时间序列。本文尝试将 $^{210}\text{Pb}$  应用于河漫滩沉积物研究中,探索沉积速率变化情况及其与降水变化、人类活动的关系。

## 1 研究区域概况

澜沧江发源于中国青海省唐古拉山东北部,西部以怒山(南段碧罗雪山)、邦马山等山脊线与怒江分界,东部则以云

收稿日期:2014-05-28 修回日期:2014-11-03 网络出版时间:2014-12-03

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20141203.1147.012.html>

基金项目:国家重点实验室开放基金(SKLH-0F-1202);国家自然科学基金(41271045);博士点基金(20130181110045)

作者简介:卫仁娟(1988-),女,山西运城人,主要从事水文学及水资源方面研究。E-mail:137271395@qq.com

通讯作者:梁川(1957-),男,四川雅安人,教授,博士生导师,主要从事水环境资源开发利用与保护研究。E-mail:lchester@sohu.com

岭、无量山等山地分别与金沙江、红河分水<sup>[7]</sup>。位于云南省境内部分的澜沧江流域总面积约 16.5 万 km<sup>2</sup>, 总径流量 765 亿 m<sup>3</sup>, 出境泥沙为 8 460 万 t, 主要支流有威远江、小黑江、黑河、流沙河、补远江、南腊河和南阿河等<sup>[8]</sup>。其中, 威远江上游主流勐统河发源于景东县与镇沅县交界处的大团山, 自北向南流经镇沅、景谷后, 转向西南, 于腊撒渡口附近注入澜沧江, 河流全长 269 km。

本文选择勐统河流域作为研究对象, 研究流域分别覆盖了景东县和景谷县的部分地区, 以及普洱市镇沅县大部分地区(经纬度范围北纬 23°41'16"—24°21'5", 东经 100°39'25"—101°02'13")(图 1), 研究流域面积约为 1 500 km<sup>2</sup>。该流域位于低纬度, 属亚热带季风气候区, 多年平均降雨量 1 243.6 mm, 蒸发量 1 689.3 mm; 11 月—次年 4 月为干季, 降雨量占全年的 13.5%, 5 月—10 月为雨季, 降雨量占全年的 86.5%; 多年平均气温 19.1℃, 极端最高气温 39.2℃, 极端最低气温 -1.59℃。



图 1 研究流域及采样点位置

Fig. 1 Research watershed and location of sampling sites

随着人类活动的日益频繁, 流域内大量的森林被砍伐和大规模的不合理土地开垦及利用, 都会造成土壤侵蚀的逐渐加剧。据澜沧江泥沙观测资料统计, 20 世纪 60 年代以来, 澜沧江河段的含沙量及输沙模数均有增大的趋势, 并且以下游的戛旧到景洪段为最大, 特别是 80 年代以后更加明显<sup>[8]</sup>。

## 2 采样及研究方法

### 2.1 样品的采集

研究样点 CH-57(23°41'56.35", 100°48'52.73") 泥沙采集于勐统河流域出口的河漫滩上, 采样深度为 60 cm, 按 10 cm 间隔进行采集, 并自上而下依次编号为 A、B、C、D、E、F。

### 2.2 实验方法

<sup>210</sup>Pb 是 <sup>238</sup>U 衰变产生的一种放射性子体同位素, 其半衰期为 22.6 a<sup>[9]</sup>。土壤中 <sup>210</sup>Pb 主要有两种来源: 一部分是土壤中 <sup>226</sup>Ra 衰变成的惰性气体 <sup>222</sup>Rn 在土壤中直接衰变为 <sup>210</sup>Pb, 这部分 <sup>210</sup>Pb 为补偿性 <sup>210</sup>Pb(记作 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub>); 另一部分是衰变成的 <sup>222</sup>Rn 进入大气, 在大气中衰变为 <sup>210</sup>Pb, 然后随降雨沉降或干沉降落到土壤中, 并被土壤颗粒迅速吸附, 这部分 <sup>210</sup>Pb 称为外源性 <sup>210</sup>Pb(即 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>)<sup>[11]</sup>。由于土壤中 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 与 <sup>226</sup>Ra 处于平衡状态, 因此可以通过计算 <sup>226</sup>Ra 的活度确定 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 的活度, <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 是 <sup>210</sup>Pb<sub>tot</sub> 与 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 的差值, 只有 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 具有计年意义。

首先测定 CH-57 采样点泥沙样品中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的比活度。

泥沙样品的测定采用多道 γ 射线能谱仪在 46.5 Kev 和 661.7 Kev 能量处测得 <sup>210</sup>Pb 和 <sup>137</sup>Cs 的全峰面积, 同位素 <sup>226</sup>Ra 的全峰面积分别通过测定能谱仪在 351.9 Kev、295.2 Kev 能量处的 <sup>214</sup>Pb 的全峰面积、1 120.3 Kev、609.3 Kev 能量处的 <sup>214</sup>Bi 的全峰面积得到。测定时间长度为 86 400 s。

以 <sup>210</sup>Pb 为例说明样品中 <sup>210</sup>Pb 活度的计算<sup>[10]</sup>

$$C = \frac{A}{\zeta \cdot T} \quad (1)$$

$$V = \frac{C}{M} \quad (2)$$

式中:  $V$  为样品中 <sup>210</sup>Pb 的放射性比活度 (Bq/g);  $C$  为样品中 <sup>210</sup>Pb 的含量 (Bq);  $A$  为 <sup>210</sup>Pb 的峰面面积;  $T$  为样品的测定时间 (s);  $\zeta$  为仪器对核素的探测效率, 是与样品密度有关的量;  $M$  为沉积物样品的质量 (g)。

### 2.3 <sup>210</sup>Pb 计年分析的原理

<sup>210</sup>Pb 对沉积物计年研究采用 CRS (Constant Rate of <sup>210</sup>Pb Supply) 模型。CRS 模型的应用基于三个假设: (1) 大气中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的沉降速率恒定; (2) 落入水中的 <sup>210</sup>Pb 迅速转移到颗粒物上, 因此沉积物中的 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 本质上归因于大气沉降; (3) 沉积物中的 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的初始活度没有被后沉积过程重新分配, 遵循放射性衰减规律呈指数衰减。

沉积物中 <sup>210</sup>Pb 一般呈现指数衰减规律, 经过衰变  $d\tau$  后, 时间  $\tau$  时沉积物中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的含量为

$$P \exp(-\lambda\tau) d\tau \quad (3)$$

式中:  $P$  为大气沉降通量 (Bq/(cm<sup>2</sup> · a));  $\lambda$  为 <sup>210</sup>Pb 放射性衰变常数,  $\lambda = 0.03114/a$ ;  $\tau$  为沉积时间 (a)。

以往的研究表明 <sup>210</sup>Pb 的大气沉降通量随纬度由西向东增加, 但一定范围的区域内多年平均大气沉降通量一致。万国江<sup>[12]</sup>通过对 <sup>210</sup>Pb 和 <sup>7</sup>Be 近地面空气浓度和沉降通量的观测得到贵阳 <sup>210</sup>Pb 大气沉降通量为 200~240 Bq/(cm<sup>2</sup> · a); 张信宝<sup>[13]</sup>等在川中丘陵区小流域泥沙来源的研究中取长江口、福建厦门、陕北黄土高原的平均值 221 作为大气沉降通量。本文计算时, 研究区域 <sup>210</sup>Pb 大气沉降通量取值 220 Bq/(cm<sup>2</sup> · a), 则  $t$  时沉积物中剩余的 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的含量为

$$A = \int_0^{\infty} P e^{-\lambda\tau} d\tau = \frac{P}{\lambda} \quad (4)$$

当令  $t=0$  时, 则整个采样柱中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的含量为

$$A(0) = \frac{P}{\lambda} \quad (5)$$

$$A = A(0) e^{-\lambda t} \quad (6)$$

$A$  和  $A(0)$  都可以通过数值积分求得。则有

$$A = \int_m^{\infty} C(m) dm, A(0) = \int_0^{\infty} C(m) dm \quad (7)$$

质量深度  $m$  处沉积物沉积年代  $t$  为

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{A(0)}{A}\right) \quad (8)$$

$$r = \frac{P}{C} \exp(-\lambda t) \quad (9)$$

$$P = \lambda A(0) = \lambda A \exp(\lambda t) \quad (10)$$

$$r = \lambda A / C \quad (11)$$

式中:  $C(m)$  为采样年沉积物中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的含量 (Bq/g);  $C(0)$  为采样孔表层沉积物中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的含量 (Bq/g);  $r$  为沉积速率

(g/(cm<sup>2</sup>·a))。

设  $x_1, x_2, \dots, x_n$  指采样每个分隔层中点距地表的深度 (单位: cm),  $s_1, s_2, \dots, s_n$  指各采样层的样本的平均密度 (g/cm<sup>3</sup>),  $m_1, m_2, \dots, m_n$  为对应  $x_1, x_2, \dots, x_n$  的采样层的质量深度 (单位: g/cm<sup>2</sup>), 则质量深度  $m_n$  以上到地表的累计质量按梯形公式计算, 即

$$m_n = m_{n-1} + 1/2(s_n + s_{n-1})(x_n - x_{n-1}) \quad (12)$$

设  $C_1, C_2, \dots, C_n$  为对应  $x_1, x_2, \dots, x_n$  采样层中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的比活度 (单位: Bq/g), 则可按梯形公式计算深度  $x_n$  (或  $m_n$ ) 以上到地表的累计质量活度  $\hat{A}_n$  (Bq/cm<sup>2</sup>)。

$$\hat{A}_n = \hat{A}_{n-1} + 1/2(C_n + C_{n-1})(m_n - m_{n-1}) \quad (13)$$

由于 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 衰变规律为指数衰变, 因此计算  $\hat{A}_n$  的更合理的方程为

$$\hat{A}_n = \hat{A}_{n-1} + \frac{C_{n-1} - C_n}{\ln(C_{n-1}/C_n)}(m_n - m_{n-1}) \quad (14)$$

### 3 数据分析及结果

#### 3.1 <sup>210</sup>Pb 的剖面分布

分别以采样点 CH-57 在 A、B、C、D、E、F 不同深度处的 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 及 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 的比活度为横坐标、深度为纵坐标建立关系见图 2。

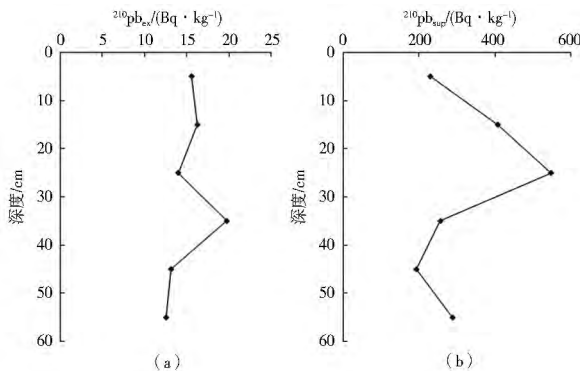


图 2 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 和 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 的剖面分布

Fig. 2 Profile distributions of <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> and <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub>

从图 2(a)中 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 的剖面分布情况分析可知, <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 比

活度随深度并不呈指数衰减。其中, <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 在深度 10~20 cm 和 30~40 cm 处呈现两个偏离的点, 这两个特殊点的 <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub> 比活度明显偏大, 没有按照正常的指数衰减的规律而衰减, 推测与研究流域内近几年发生过较大的降水、洪水或大规模的植被砍伐有关; 从图 2(b)中 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 的剖面分布情况分析, 若 60 cm 深度为沉积深度, 则在 60 cm 深度处 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 达到平衡状态, 不会随深度的增加而增加, 但在 50~60 cm 处的 <sup>210</sup>Pb<sub>sup</sub> 比活度仍有所增加, 说明采样深度尚未达到沉积物沉积深度。

#### 3.2 CRS 模式计年分析

由于沉积速率随时间发生变化, 因此选择 CRS 模型计年, 结果显示 (表 1), A、B、C、D、E 沉积层计年结果分别为 2009 年、2002 年、1993 年和 1954 年, 而在 10~20 cm 和 30~40 cm 深度处分别代表 2002 年和 1980 年沉积物年龄。而流域降雨年际变化资料 (图 3) 显示, 在 1970 年、1980 年和 2002 年附近分别有降雨高峰, 这可能正是导致在深度 30~40 cm 和 10~20 cm 处出现特殊沉积点的原因。

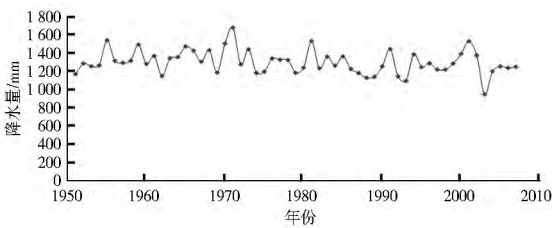


图 3 年降水变化过程

Fig. 3 Variation process of annual precipitation

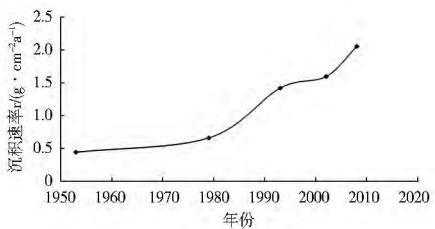


图 4 流域出口沉积物沉积速率

Fig. 4 Sedimentation rate of sediments in the outlet of watershed

表 1 CRS 模型计算沉积物年龄表

Tab. 1 Calculated ages of sediments determined by the CRS model

| 深度/cm    | 深度中点/cm | <sup>210</sup> Pb <sub>ex</sub> /(Bq·g <sup>-1</sup> ) | S/(g·m <sup>-3</sup> ) | M/(g·cm <sup>-2</sup> ) | $\hat{A}_n$ /(Bq·cm <sup>-2</sup> ) | A/(Bq·cm <sup>-2</sup> ) | 年代(CRS) | r/(g·cm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|----------|---------|--------------------------------------------------------|------------------------|-------------------------|-------------------------------------|--------------------------|---------|------------------------------------------|
| 0        | 0       | 0.022 0                                                | 1.329 8                | 0                       | 0                                   | 1.142 0                  | 2012    | —                                        |
| A(0~10)  | 5       | 0.015 6                                                | 1.143 9                | 6.184 4                 | 0.115 0                             | 1.027 0                  | 2009    | 2.054 8                                  |
| B(10~20) | 15      | 0.016 2                                                | 1.308 2                | 18.444 8                | 0.310 0                             | 0.832 0                  | 2002    | 1.594 9                                  |
| C(20~30) | 25      | 0.014 0                                                | 1.295 4                | 31.462 5                | 0.506 2                             | 0.635 8                  | 1993    | 1.418 1                                  |
| D(30~40) | 35      | 0.019 7                                                | 1.347 1                | 44.674 7                | 0.726 5                             | 0.415 5                  | 1980    | 0.656 2                                  |
| E(40~50) | 45      | 0.013 1                                                | 1.500 9                | 58.914 3                | 0.957 0                             | 0.184 9                  | 1954    | 0.439 1                                  |
| F(50~60) | 55      | 0.012 5                                                | 1.383 6                | 73.336 6                | 1.142 0                             | —                        | —       | —                                        |

说明: 由于采样没有达到足够的深度, 因此 50~60 cm 深度处沉积年代和沉积速率无法计算。

根据 CRS 模型计算得到勐统河流域出口沉积物的沉积速率随时间变化过程 (图 4), 勐统河流域出口河漫滩沉积物沉积速率变化范围较大, 在 0.5~2.2 g/(cm<sup>2</sup>·a) 之间, 自 1950 年以来沉积速率一直呈现增长的趋势, 1950 年—1980 年间沉积速率缓慢增加, 1980 年—2000 年沉积速率增加最

快, 间接反映了流域内土壤侵蚀速率亦呈现增长的趋势; 1980 年之后沉积速率增加较为显著, 这可能与近几十年以来强烈的人类活动<sup>[14-16]</sup> (森林砍伐和不合理的土地利用等) 有关系。因此必须提出合理的治理措施和方针政策, 协调好经济发展与环境保护及治理的关系, 最终达到可持续发展。

## 4 结论

通过对勐统河流域出口河漫滩沉积物剖面中 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 分布情况进行分析,可以得出以下结论。

(1) $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 剖面分布在 10~20 cm 和 30~40 cm 处分别有两个比活度高峰,这与 1970 年、1980 年和 2002 年前后该流域曾出现的强降水密切相关。

(2)根据 CRS 模型的计算结果,勐统河河口泥沙沉积速率从 20 世纪 50 年代开始一直呈现增长的趋势,表明流域内土壤侵蚀正在逐渐增强,这可能与近几十年以来强烈的人类活动(森林砍伐和不合理的土地利用等)有关。

本文研究结果可以为云南省镇沅县合理进行土地资源开发利用规划和生态环境保护与治理提供科学依据。

致谢:本研究在野外取样工作中得到美国 Vermont University 及 Oberlin College 的 Thomas Neilson, Veronica Sosa-Gonzalez, Jennifer A. Bower 的大力帮助,在此致以谢意。

## 参考文献(References):

- [1] 张心昱,王秋兵.应用 $^{137}\text{Cs}$ 技术调查河漫滩沉积物的研究进展[J].水土保持研究,2005,12(1):149-151. (ZHANG Xin-yu, WANG Qiu-bing. Advances on uses of  $^{137}\text{Cs}$  technique to investigate the sediments on river floodplains[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2005, 12(1): 149-151. (in Chinese))
- [2] 王小林,姚书春,薛滨.江苏固城湖近代沉积 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 计年及其环境意义[J].海洋地质动态,2007,23(4):21-25. (WANG Xiao-lin, YAO Shu-chun, XUE bin. Study of  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  dating sediment of modern times and its environmental significance in Gu Cheng Lake of Jiangsu[J]. Marine Geology Letters, 2007, 23(4): 21-25. (in Chinese))
- [3] 金爱春,蒋庆丰.新疆乌伦古湖的 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 测年与现代沉积速率[J].现代地质,2010,2(24):377-382. (JIN Ai-chun, JIANG Qing-feng, et al.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating and modern sedimentation rate in Wulungu Lake, Xinjiang[J]. Geo science, 2010, 2(24): 377-382. (in Chinese))
- [4] 王福.渤海湾海岸带的 $^{210}\text{Pb}$ 、 $^{137}\text{Cs}$ 示踪与测年研究:现代沉积及环境意义[D].中国地质科学院,2009. (WANG Fu.  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  tracing and dating on Bohai Bay Coast: modern sedimentation and implication[D]. Chinese Academy of Geological Sciences, 2009. (in Chinese))
- [5] 李春梅,王红亚.贵州省西南部麦岗水库沉积物的 $^{137}\text{Cs}$ 和 $^{210}\text{Pb}$ 测年与沉积速率的研究[J].水土保持通报,2010,2(30):216-219. (LI Chun-mei, WANG Hong-ya.  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating and inference of sedimentation rate for Maigang reservoir in Southwest Guizhou Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 2(30): 216-219. (in Chinese))
- [6] 刘秀娟,卢刚.长江下游近河口段河漫滩洪水事件沉积的保存能力[J].中国海洋湖沼学会,2012. (LIU Xiu-juan, LU Gang. Reserve ability of flood matter in floodplain of outlet in the downstream of Changjiang River[J]. The Conference of Chinese Lake-Ocean, 2012. (in Chinese))
- [7] 胡波,崔保山.澜沧江(云南段)河道生态需水量计算[J].生态学报,2006,26(1):164-173. (HU Bo, CUI Bao-shan. Calculation of ecological water requirements for in-stream in the Lancang River, Yunnan Province, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(1): 164-173. (in Chinese))
- [8] 黄江成,傅开道,何大明.澜沧江中下游河流泥沙特性分析[J].四川大学学报:工程科学版,2010,42(3):112-120. (HUANG Jiang-cheng, FU Kai-dao, HE Da-ming. Analysis on the characteristics of sediments in the middle and lower parts of the Lancang River[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2010, 42(3): 112-120. (in Chinese))
- [9] Appleby P G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments[C]. Last W M & Smol J P. Tracking Environmental Change using Lake Sediments Volume 1: Basing Analysis, Coring, and Chronological Technique. Netherlands: Kluwer Academic, 2004: 171-203.
- [10] 侯建才.黄土丘陵沟壑区小流域侵蚀产沙特征示踪研究[D].西安:西安理工大学,2007. (HOU Jian-cai. Study on the characteristics of soil erosion, sediment yield in small watershed in loess plateau hilly, gully area by using tracers[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2007. (in Chinese))
- [11] 张信宝,张云奇.农耕地土壤 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 含量对侵蚀速率变化的相应模型[J].土壤学报,2010,47(4):593-597. (ZHANG Xin-bao, ZHANG Yun-qi, et al. Response of  $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$  inventory to changes in erosion rates in soil of cultivated land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(4): 593-597. (in Chinese))
- [12] 万国江,郑向东. $^{210}\text{Pb}$ 和 $^{7}\text{Be}$ 进地面空气浓度和沉降量的观测及其对大气物质传输的解释[J].中国环境科学学会学术年会论文集,2009:827-836. (WAN Guo-jiang, ZHENG Xiang-dong. Observations of  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{7}\text{Be}$  deposition and concentration in ground air and interpretation for material transport of atmosphere[J]. Chinese Society for environmental sciences, 2009: 827-836. (in Chinese))
- [13] 张信宝,贺秀彬.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. (ZHANG Xin-bao, HE Xiu-bin. Study on  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  tracing sources of sediment in small watershed of Hilly region in middle part of Sichuan[J]. Chinese Science Bulletin, 2004, 49(15): 1537-1541. (in Chinese))
- [14] 张佩芳,许建初.云南境内澜沧江流域土地利用时空变化特征及动因分析[J].地球科学进展,2003,18(6):947-953. (ZHANG Pei-fang, XU Jian-chu. Analyses of spatial-temporal characteristics of land use change and its driving forces in the Lancangjiang basin of Yunnan Province[J]. Advance In Earth Sciences, 2003, 18(6): 947-953. (in Chinese))
- [15] 王娟,崔保山,刘杰,等.云南澜沧江流域土地利用及其变化对景观生态风险的影响[J].环境科学学报,2008,28(2):269-277. (WANG Juan, CUI Bao-shan, LIU jie, et al. The effect of land use and its change on ecological risk in the Lancang river watershed of Yunnan Province at the landscape scale[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 28(2): 269-277. (in Chinese))
- [16] 徐建初,张佩芳,王雨华.云南澜沧江流域土地利用和覆盖变化[J].云南植物研究,2003,25(2):145-154. (XU Jian-chu, ZHANG Pei-fang, WANG Yu-hua. Land use and land cover in Lancang watershed of Yunnan[J]. Acta Botanica Yunnanica, 2003, 25(2): 145-154. (in Chinese))