

紫坪铺水库沉积物 Sr 同位素及元素组成变化对 2008 年汶川大地震的响应*

陈晨^{1,2}, 金章东^{1,3**}, 徐阳^{1,2}, 李良波^{1,2}, 苟龙飞^{1,2}, 张飞^{1,3}

(1: 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, 西安 710061)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 中国科学院第四纪科学与全球变化卓越创新中心, 西安 710061)

摘要: 2008 年 5 月 12 日里氏 7.9 级汶川大地震引发了超过 56000 多个山体滑坡, 在龙门山地区产生巨量的碎屑物质, 极大地影响了流域的地表过程。然而, 地震对河流碎屑物质组成及沉积过程的变化却知之甚少。紫坪铺水库超高沉积速率(平均 74 cm/a)的沉积物完整记录了汶川地震前后的沉积过程, 为研究 2008 年汶川地震对流域地表物质搬运及沉积物组成的影响提供了宝贵的素材。本研究测试了汶川地震前后紫坪铺水库沉积物的 Sr 同位素以及元素组成, 结果表明其在地震之后均发生了显著变化。震后沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Rb/Sr 比值同步降低, 并且和沉积物化学蚀变指数(CIA)呈正相关性, 反映了地震滑坡导致的新鲜物质对沉积物的贡献, 特别是地震后强径流的 2010—2011 年。地震前后沉积物组成的差异性, 为利用沉积物反演水文气候和构造事件及其环境效应提供了基础和潜在指标。

关键词: 地震滑坡; 水库沉积物; Sr 同位素; 化学蚀变指数(CIA); 水文制约; 紫坪铺水库; 岷江下游

The response of Sr isotopic and elemental compositions of Zipingpu Reservoir sediments to the 2008 Wenchuan earthquake*

CHEN Chen^{1,2}, JIN Zhangdong^{1,3**}, XU Yang^{1,2}, LI Liangbo^{1,2}, GOU Longfei^{1,2} & ZHANG Fei^{1,3}

(1: State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: Center for Excellence in Quaternary Science and Global Change, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, P.R.China)

Abstract: The 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake triggered more than 56000 landslides and induced huge clastic sediment along the Longmen Shan orogen, which had impacted earth surface processes within the catchment. However, little is known about the changes in riverine sedimentary compositions and depositional processes associated with the earthquake. Characterized by high sedimentation rate (averaging 74 cm/a), the continuous sediment in the Zipingpu Reservoir, the lower reaches of the Minjiang River provides valuable records of sediment transfer and compositions before and after the earthquake. In this paper, the strontium isotopic ratio (⁸⁷Sr/⁸⁶Sr) and elemental concentrations of reservoir sediments were measured. The results showed that there are significant differences in both ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios and elemental compositions before and after the earthquake. Both ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and Rb/Sr ratios decreased after the earthquake, with a positive correlation with CIA, implying increased contribution of fresh debris to the river sediments by the earthquake-triggered landslides, in particular during 2010 and 2011 when there had intense monsoonal rainfall. The difference of sedimentary compositions before and after the earthquake provides a basis of potential tracers for reconstructing hydroclimatic and tectonic events and their environmental impacts using sedimentary records.

Keywords: Earthquake-triggered landslides; reservoir sediments; strontium isotopic ratio; chemical index of alteration (CIA); hydrological control; Zipingpu Reservoir; the lower reaches of the Minjiang River

* 2020-01-19 收稿; 2020-03-09 收修稿。

国家自然科学基金项目(41930864)和中国科学院前沿科学重点研究项目(QYZDJ-SSW-DQC033)联合资助。

** 通信作者; E-mail: zhdjin@ieecas.cn.

地震、台风以及海啸等各种极端事件越来越引起关注,然而我们对地表过程如何响应这类极端事件却知之甚少。大地震的强烈震动往往造成大量的岩石崩塌以及滑坡,影响地表侵蚀和风化,在物质循环、地形地貌演化等过程中扮演着重要角色^[1-2]。地震滑坡对地表过程的影响大体表现在三个方面:一、地震引发的滑坡物质进入河流,导致河水中的输沙量成倍增加,对河流沉积物搬运过程有着重要的影响,滑坡物质在震区滞留的时间可达到几十年至千年^[3-4];二、地震滑坡会造成大量的新鲜岩石出露,增强岩石风化速率,进而改变地表水的化学成分,增加流域风化通量^[5-6];三、滑坡会导致大量森林植被的破坏,进而增加颗粒有机碳(POC)的剥蚀或埋藏^[7-8]。

2008 年 5 月 12 日里氏 7.9 级汶川大地震发生于青藏高原东缘龙门山断裂带。该断裂带呈北东—南西向延伸,为青藏高原与四川盆地的过渡山区,长约 500 km,宽约 30 km,由一系列右行逆冲、斜向滑动断裂构成^[9]。汶川地震引发了超过 56000 个滑坡,总体积达 3 km³,其中 43% 的滑坡与河道相连接,其余的则分布在山坡上^[10-11]。地震滑坡物质极大地影响了地表物质运移过程^[3,10,12],在强降雨以及高径流条件下,这些滑坡物质更容易进入河流搬运沉积^[4,13]。然而,对于 2008 年汶川地震前后沉积过程及沉积物组成的变化还知之甚少,制约着地震事件地表环境效应的深入认识。

修建在岷江下游的紫坪铺水库于 2004 年 9 月开始蓄水(图 1),完整地保存了 2008 年汶川地震前后的沉积物,为评价地震滑坡物质在流域内的运移和沉积过程及组成变化提供了绝佳材料。本研究通过紫坪铺水库沉积物元素以及 Sr 同位素组成的分析,探究了 2008 年汶川地震对河流搬运物质组成和来源影响,为利用沉积物组成变化反演地震和气候等极端事件提供基础和借鉴。

1 样品的采集与分析测试

1.1 样品采集

2016 年 10 月中旬使用澳大利亚 UWITEC 活塞取芯平台在紫坪铺水库中心(图 1)采集了共 10.89 m 长的沉积岩芯(ZPP-A; 31°02'8.20"N, 103°33'48.20"E,水面海拔 870 m)。沉积物具有水平层理,主要由浅灰色、褐色的粉砂和黏土矿物组成,其完整地保存了汶川地震前后的沉积序列。该岩芯已利用磁化率与水库水位的对应关系建立了可信的年代序列^[13];沉积岩芯具有 24 个磁化率变化旋回,其变化是由磁性矿物含量不同造成的,将这些旋回与一年两次高水位的水库水位相对应,精确地将沉积岩芯定年到了年分辨率(图 2)。这个年代模式划出的沉积岩芯中 2008 年地震的位置,正好对应于岩芯颜色的突变层,进一步证实了年代标尺的可靠性。最重要的是,因为紫坪铺水库水位是基于防洪、居民用水和灌溉而规律性地人为调控的,因此由水库水位与磁化率的旋回确定的年代标尺是独立于季风降水、径流量等自然水文参数的,也就避免了循环论证^[13]。本文挑选了地震前后磁化率峰值点的 35 个样品,进行全样的 Sr 同位素以及元素组成的测试分析。

同时,于 2019 年 6 月在紫坪铺水库入口处(图 1)岷江河漫滩采集了一支 74 cm 长的河漫滩沉积物(103°28'52.84"N, 31°02'23.92"E,水面海拔 854 m)。沉积物具有明显的粒度分层,主要由褐色的中细粒砂、粉砂组成。本文挑选了粒度不同的 7 个沉积物样品,进行全样的 Sr 同位素以及元素组成的测试分析。河漫滩沉积物属于地震后沉积,主要受控于水动力分选,又距离水库近,因此本文借助于河漫滩沉积物的粒度效应来探究水动力分选造成的粒度变化对水库沉积物 Sr 同位素及元素组成的影响。

1.2 样品分析测试

粒度测定:使用 Malvern 2000 激光粒度仪对所有样品粒度组成进行测试。测试前,先对样品进行去除有机质和碳酸盐的处理,测试范围 0.02~2000 μm,测试误差优于 2%。

沉积物样品消解:首先将样品置于烘箱在 100℃ 下烘干,之后用玛瑙研钵研磨至 200 目以下,取 30 mg 样品加入 4 mL HNO₃ 和 3 mL HF 至 Teflon 消解罐中,通过 UltraCLAVE 微波消解程序消解约 3 h。消解完成之后转移样品至赶酸仪并蒸干,冷却至室温后加入 1 mL HClO₄ 和 3 mL 王水将样品蒸干并加入 2% HNO₃ 溶解至 5 mL 试管中保存,用于后续元素含量以及同位素测试。同时,消解 GSD-9、BHVO-2 和 AGV-2 作为监控标样。

主微量元素分析:使用 Thermo Fisher Scientific ICAP 7400 ICP-OES 测试 K、Ca、Na、Mg、Al,分析精度优于 3%,使用 PerkinElmer NexION 300D ICP-MS 测量 Rb 和 Sr 含量,分析精度优于 5%。

Sr 同位素分析:取含 400 ng 的 Sr 溶液于干净的 Teflon 容器中,80℃ 蒸干,1 mL 3 mol/L 的 HNO₃ 提取样

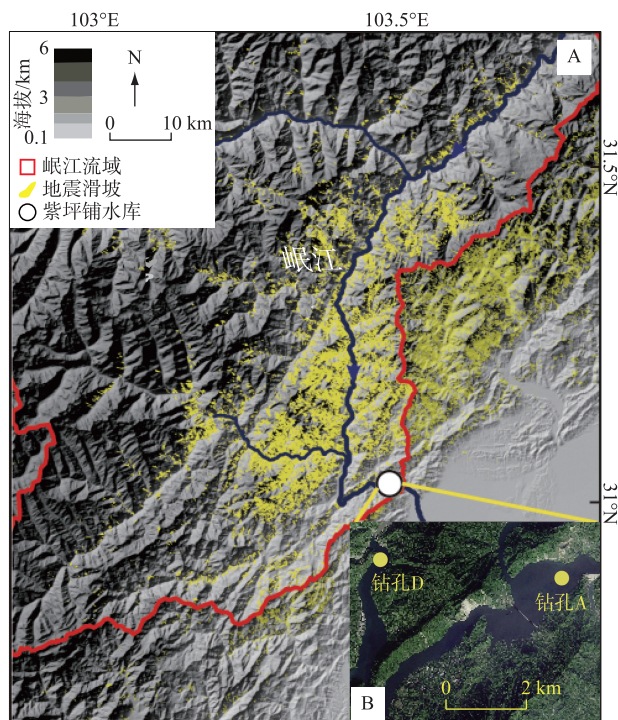


图 1 龙门山地区岷江水系、紫坪铺水库沉积物钻孔点位以及 2008 年 M_w 7.9 汶川地震引起的滑坡分布:

(A) 紫坪铺水库位置 (白色圆圈) 以及滑坡分布 (黄色多边形); (B) 紫坪铺水库中心沉积物钻孔点位 (钻孔 A) 以及水库入口处河漫滩沉积物钻孔点位 (钻孔 D) (图件修改自文献 [13])

Fig.1 Minjiang River draining the Longmen Shan, the core sites at the Zipingpu Reservoir, and the landslides triggered by the M_w 7.9 Wenchuan earthquake: (A) The site of the Zipingpu Reservoir (white circle) and landslides distribution (yellow polygons); (B) The core locations in the Zipingpu Reservoir center (core A) and on river bank at entrance of the reservoir (core D) (modified from reference [13])

品中的 Sr. 样品通过 Sr-Spec 特效树脂分离富集, 然后 3 mL 去离子水洗脱 Sr. 使用 Thermo Fisher Scientific Neptune-plus MC-ICP-MS 对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值进行测试, Sr 同位素标准化值为 $^{86}\text{Sr}/^{88}\text{Sr} = 0.1194$. 测试期间 NIST-NBS987 标样的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值为 0.710243 ± 0.000016 ($2\sigma, n=6$).

以上所有前处理和测试均在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完成.

2 结果

2.1 紫坪铺水库沉积物 Sr 同位素时间序列变化

2008 年汶川地震前后紫坪铺水库沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值和主微量元素含量测定结果及相关参数见附录.

沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值分布范围为 $0.714357 \sim 0.718376$. 地震前沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值平均值为 0.717721 , 地震后沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值平均值为 0.716237 . 从图 2 中可以看出, 2008 年汶川地震后水库沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降低, 而沉积物中值粒径 (D_{50}) 与磁化率增大^[13], 最显著的变化出现在 2010 年, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值由 0.716256 降至最低值 0.714357 (附录), 而沉积物 D_{50} 增至最大值 $24.2 \mu\text{m}$ ^[13], 对应河流高径流时期. 2011 年之后, 随着河流年径流量减小, 沉积物 D_{50} 逐渐在 2016 年恢复到较低水平, 而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值恢复到较高水平. 沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的时间序列变化与 Rb/Sr 比值和粒度的变化模式相似, 两者有良好的相关性 ($R^2 = 0.56$, 图 3C). 紫坪铺水库震后沉积物 Rb/Sr 比值降低可能是高 Sr 含量的新鲜滑坡物质加入的结果^[13], 因此地震后沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降低同 Rb/Sr 比值一样很可能是因为地震产生的新鲜滑坡物质输入引起的.

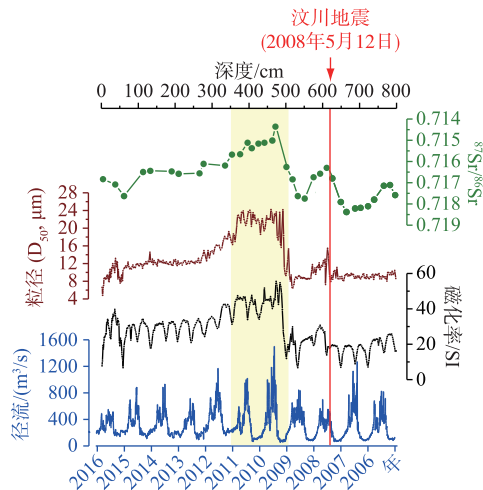


图 2 紫坪铺水库沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值(绿色)、磁化率(黑色)和中值粒径(D₅₀, 棕色)以岷江干流(威州水文站)日径流量(蓝色)时间序列曲线. 沉积物中 2008 年汶川地震的界线根据文献[13]确定, 阴影为 2010—2011 年高径流条件下高磁化率、粗颗粒和低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值. 沉积物中值粒径(D₅₀)、磁化率以及岷江干流日径流量数据均引自文献[13]

Fig.2 Time-series variations of core sedimentary ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios (green), magnetic susceptibility (black) and median grain size (D₅₀, brown) from the Zipingpu Reservoir, along with daily water discharge in the Minjiang River (Weizhou hydrological station) before and after the 2008 Wenchuan earthquake. Red line marks the time of the 2008 Wenchuan earthquake by Zhang et al. (2019)^[13] and yellow shadow marks the high magnetic susceptibility, coarse grain size and low ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios associated with high water discharge during 2010–2011. Data of D₅₀ and magnetic susceptibility and daily water discharge are from reference [13]

2.2 地震前后紫坪铺水库沉积物化学蚀变指数(CIA)变化

根据 Nesbitt 和 Young 提出的计算表达式来计算沉积物化学蚀变指数(CIA)值^[14]:

$$CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + K_2O + Na_2O)] \times 100 \tag{1}$$

式中,CaO* 仅为硅酸盐中的 CaO,氧化物为分子摩尔数. 本文采用 McLennan 提出的方法对 CaO* 进行校正^[15],即根据自然界中碳酸盐和硅酸盐矿物中的 Na 与 Ca 平均组成以及沉积物中的 CaO/Na₂O 摩尔比值来计算 CIA 值:如果 CaO/Na₂O 摩尔比值大于 1,用 Na₂O 的含量代替 CaO*;如果比值小于 1,就直接用 CaO 的值计算 CIA 值.

由 CIA 结果可知,2008 年汶川地震前后紫坪铺水库沉积物 CIA 值分布范围为 58.6~71.7,地震前沉积物 CIA 平均值为 69.6,地震后沉积物 CIA 平均值为 63.8(附录). 与地震前(2005—2008 年)沉积物不同,地震后沉积物 CIA 值降低,且与 K/Na 比值有非常好的正相关关系(R²=0.97,图 4A). 与此同时,地震后(2008—2009 年)沉积物 CIA 值和 K/Na 比值分别降低至 67.0 和 2.39,而地震后(2010—2016 年)高河水径流下沉积物 CIA 值和 K/Na 比值进一步降低至 59.1 和 1.27,随后它们分别逐渐回归到 65.9 和 2.08(附录).

3 讨论

3.1 地震前后紫坪铺水库沉积物 CIA 值变化的原因

3.1.1 新鲜未风化硅酸盐矿物输入对沉积物 CIA 值变化的影响 物源稳定的情况下,CIA 是评价硅酸盐化学风化程度的指标,CIA 值越高指示硅酸盐矿物中的 Na、K、Ca 从母岩中流失越多,化学风化程度越高^[14]. 因为 Na 主要赋存于斜长石中,K 主要赋存于钾长石中,斜长石的风化淋溶速度要比钾长石快,所以 K/Na 比值

可以衡量斜长石的分解程度. 物源稳定的情况下, K/Na 比值可以表征沉积物的化学风化程度, 比值越高指示风化程度越高^[16].

2008 年汶川地震产生了大量的滑坡物质搬运到河流中^[3,13]. 岷江悬浮物¹⁰Be 和河水化学均表明地震滑坡出露了大量的新鲜硅酸盐^[5,17], 这些新鲜的硅酸盐矿物来不及风化就被搬运至河流沉积. 地震前沉积物高的 CIA 值, 表明它们风化程度高, 是经历了长时间风化作用的结果. 地震后的沉积物 CIA 值低, 整体风化程度较低, 表明其包含更多的新鲜滑坡物质(图 4A). 从本质上来说, 地震后沉积物 CIA 值的降低反映了流域长期风化土壤(高 CIA 值)与地震滑坡物质(低 CIA 值)的混合. 相比于地震前沉积物 CIA 值多集中在 70 左右, 地震后 CIA 值有较大的变化范围(58.6~68.6), 并且与 K/Na 比值有很好的正相关性($R^2 = 0.97$, 图 4A). 这反映了地震后不同时间段沉积物中风化土壤与新鲜滑坡物质混合比例的不同, 是降雨和径流强度作用的直接表现. 特别地, 2010 年暴雨导致河流径流量显著增大, 增强了河流的搬运能力, 将大量的地震滑坡物质冲刷至与河道相连接^[18], 更多的滑坡物质被搬运至河流中^[13], 沉积物中包含更大比例的新鲜未风化硅酸盐矿物, 表现为沉积物 CIA 值显著降低(图 4A). 上述分析表明, 地震后新鲜未风化的硅酸盐矿物输入是沉积物 CIA 值降低的一个主要原因.

3.1.2 水动力分选对沉积物 CIA 值变化的影响 粒度对沉积物组成也有重要的控制, 例如粗颗粒矿物(如石英、长石)与细粒的黏土矿物有着不同的元素组成^[19-20]. 水库沉积物 CIA 值与 D_{50} 具有良好的负相关关系($R^2 = 0.70$, 图 5A), 清楚地表明地震后沉积物粒度变化对其 CIA 值也有直接的影响. 这可以从河漫滩沉积物粒度与 CIA 的关系得到进一步证实. 紫坪铺水库入口处河漫滩沉积物粒度分析表明, 随着 D_{50} 增大, CIA 值显著降低(图 5A), 这指示了河流搬运过程中水动力对矿物的分选. 地震前后水库沉积物 D_{50} 变化幅度约为 $20\ \mu\text{m}$ ^[13], CIA 值最大变化幅度约为 13(附录). 通过河漫滩沉积物的 D_{50} 与 CIA 值的拟合关系可以发现, $20\ \mu\text{m}$ 的粒径变化可解释大约 1.4 的 CIA 值变化(图 5A), 因此水动力分选造成的粒度变化在一定程度上增加了地震后水库沉积物 CIA 值的变化幅度.

3.2 地震前后紫坪铺水库沉积物 Sr 同位素变化的原因

3.2.1 碳酸盐组分输入对沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值变化的影响 碳酸盐和硅酸盐具有明显不同的⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值. 碳酸盐高 Sr 含量、低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值, 而硅酸盐(玄武岩除外)相对低 Sr 含量、高⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值, 是控制河流水体以及沉积物 Sr 同位素组成的两个主要端元^[21-23]. 与沉积物的元素、粒度等指标不同, Sr 同位素在风化和搬运过程中不会发生分馏, 加之⁸⁷Rb 的半衰期很长($4.88 \times 10^{10}\ \text{a}$), 因此短时间尺度沉积物中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值只受控于物源的变化, 而与放射性成因⁸⁷Sr 加入、风化、分选作用等无关^[24-25]. 因此, Sr 同位素可以更好地反映地震前后碳酸盐和硅酸盐对沉积物的相对贡献. 图 2 显示汶川地震后紫坪铺水库沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值降低, 尤其在 2010 年降至最低值 0.714357(附录), 这指示了具有低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值端元物质快速加入. 这一端元物质主要是地震滑坡暴露的泥盆纪海相灰岩, 因为泥盆纪海相灰岩在龙门山地区大量分布, 其⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值为 0.70788~0.70868(平均值为 0.70823 ± 0.00020)^[26]. 因此, 地震后低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的碳酸盐组分加入导致了沉积物中不同矿物比例的变化, 进而导致了沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值降低^[13,27]. 这可以从地震后沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 Al/Sr 比值同步降低及其正相关性得到进一步证实($R^2 = 0.88$, 图 3A), 因为 Al 含量的变化一般只受石英稀释作用的影响^[20,28], Al/Sr 比值可以消除石英稀释作用对 Sr 含量的影响.

有意思的是, 我们在利用 Ca 含量变化评估碳酸盐组分^[29-30]如何影响地震前后沉积物 Sr 同位素组成变化时发现, 地震前(2005—2008 年)和地震后(2008—2009 年)沉积物 Al/Ca 比值与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值均有一定的正相关性($R^2 = 0.67$, 图 3B), 指示碳酸盐含量对沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值有一定的影响. 然而, 2010—2011 年高径流时期有 6 个相对低 Ca 含量(高 Al/Ca 比值)、低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的沉积物却明显偏离了拟合趋势线(图 3B), 这表明地震后除了新鲜碳酸盐输入, 还有其他的因素影响了沉积物 Sr 同位素组成.

3.2.2 新鲜未风化硅酸盐矿物输入对沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值变化的影响 沉积物中⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值还与风化石物的 Rb/Sr 比值以及年龄紧密相关^[31]. 由于⁸⁷Rb 半衰期很长, 所以在短时间尺度上沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值主要取决于风化石物的 Rb/Sr 比值和 Sr 同位素组成^[32]. 图 3C 中, 地震后沉积物⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值降低, 表明地震后沉积物中含更多低⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值的矿物.

地震后沉积物 CIA 值与⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 和 Rb/Sr 比值均有良好的正相关(R^2 分别为 0.75、0.84), ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 与 Rb/

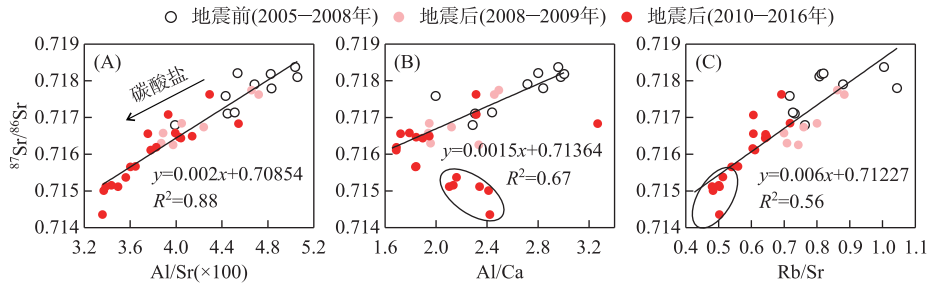


图 3 2008 年汶川地震前后紫坪铺水库沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 分别与 (A) Al/Sr 、(B) Al/Ca 和 (C) Rb/Sr 比值之间的关系 (黑色实线为拟合趋势线,其中 B 图拟合线不包括椭圆中 6 个高 Al/Ca 、低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值沉积物样品,C 图中椭圆部分对应于 B 图)

Fig.3 The linear correlations of $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ with (A) Al/Sr , (B) Al/Ca , and (C) Rb/Sr ratios for sediments from the Zipingpu Reservoir before and after the 2008 Wenchuan earthquake, respectively (The correlation between $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ and Al/Ca in (B) excludes six sediment samples (black ellipse, as same as the panel C) after the earthquake (2010–2016) with high Al/Ca and low $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios)

Sr 比值随 CIA 值降低而降低 (图 4),表明地震后沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 Rb/Sr 比值同 CIA 值一样亦受新鲜未风化的硅酸盐矿物输入影响。这些出露的新鲜硅酸盐矿物很可能是一个低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 和 Rb/Sr 比值端元。因此,除了受碳酸盐输入影响,地震后低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的新鲜未风化的硅酸盐矿物输入是导致沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降低的另一可能原因。地震前沉积物无地震滑坡物质的输入,其 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值与 Ca 含量变化有很好的相关性 ($R^2 = 0.67$,图 3B),但与 CIA 值之间无明显的相关性 (图 4B)。地震后 (2008–2009 年) 开始有低 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的新鲜硅酸盐矿物输入到河流中,沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值略微降低。2010 年暴雨事件后,河流径流增加,搬运能力增强,大量的新鲜未风化硅酸盐矿物输入到河流,沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值出现显著的降低 (图 4C)。

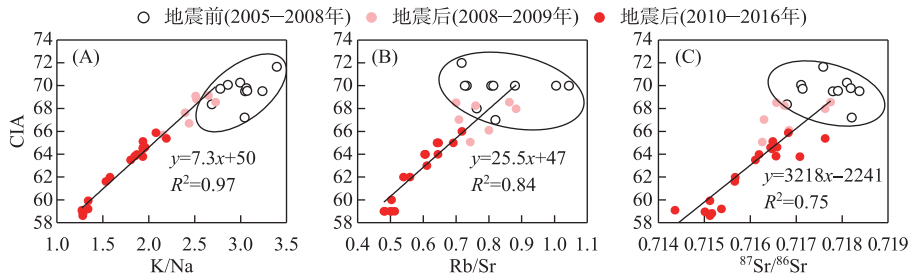


图 4 2008 年汶川地震前后紫坪铺水库沉积物 CIA 值与 (A) K/Na 、(B) Rb/Sr 以及 (C) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值之间的关系 (与地震前 (2005–2008 年) 沉积物 (黑色椭圆) 不同,地震后水库沉积物 CIA 值分别与 K/Na 、 Rb/Sr 以及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值之间有良好的正相关关系,黑色实线为拟合趋势线)

Fig.4 The correlations of CIA with (A) K/Na , (B) Rb/Sr , and (C) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios for sediments from the Zipingpu Reservoir before and after the 2008 Wenchuan earthquake, respectively (Different from the sediments before the earthquake (2005–2008) marked by black ellipses, there are better positive correlations (black lines) between CIA and K/Na , Rb/Sr , and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios after the earthquake, respectively)

3.2.3 水动力分选对沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化的影响 沉积物 Sr 同位素组成与粒度也具有一定的相关性,粒度越小越富集 ^{87}Sr ,即 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值越高^[20, 33]。紫坪铺水库沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值时间序列变化与 D_{50} 变化模式相似 (图 2),两者良好的负相关指示沉积物粒度变化也是震后沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降低的原因之一 (图 5B)。那么,沉积物粒度变化对水库沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化有多大程度的贡献呢? 水库入口处河漫滩沉积物 D_{50} 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值关系表明,随着 D_{50} 增大, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降低,这指示了河流搬运过程中水动力对矿物

的分选. 如前所述,地震前后水库沉积物粒径变化幅度约为 $20\ \mu\text{m}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值最大变化幅度为 0.004019 (附录). 根据河漫滩沉积物 D_{50} 与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值拟合的关系, $20\ \mu\text{m}$ 的粒径变化可以解释沉积物约 0.00044 的 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化 (图 5B). 相对于地震前后水库沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值最大变化幅度 (0.004019) 而言,水动力分选造成的粒度变化对 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值变化的贡献约为 11%.

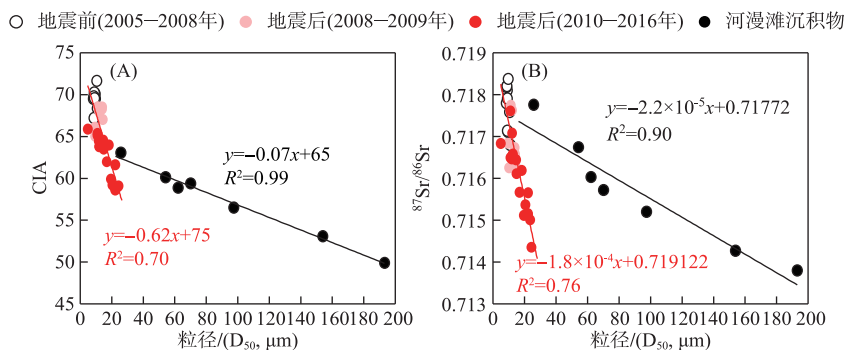


图 5 2008 年汶川地震前后紫坪铺水库沉积物 (钻孔 A) 与水库入口处河漫滩沉积物 (钻孔 D) 的中值粒径 (D_{50}) 分别与 (A) CIA 值和 (B) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值之间良好的负相关关系 (紫坪铺水库沉积物中值粒径 (D_{50}) 数据引自文献 [13])

Fig.5 The linear correlations of median grain size (D_{50}) with (A) CIA and (B) $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios for sediments from the Zipingpu Reservoir before and after the 2008 Wenchuan earthquake (core A) and from river bank at entrance of the reservoir (core D), both showing better negative correlations (Zipingpu Reservoir sedimentary data of median grain size (D_{50}) are from reference [13])

3.3 水文对沉积物物源供给和组成的控制

尽管紫坪铺水库沉积物 D_{50} 、磁化率、元素以及 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值在 2008 年地震后没有立即发生显著的变化,但是在两年后,河流径流量增大,沉积物组成均出现显著的信号响应 (图 2). 在 2010 年,沉积物 D_{50} 增至最大值 $24.2\ \mu\text{m}$ [13], $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值降至最低值 0.714357 (附录). 图 3~图 5 均显示了沉积物地震后 (2008—2009 年) 和地震后 (2010—2016 年) 可分辨的信号差异响应.

尽管 2008 年汶川地震在龙门山地区产生了大量的滑坡物质,但是只有小于一半的滑坡与河道相连接 [11], 而且河流径流量不大,限制了河流搬运能力,所以在 2008 年地震后两年内河流搬运的滑坡物质较少,更多的还是经历风化的细粒沉积物. 2010 年龙门山区域遭遇了暴雨,河流径流量增大,搬运能力增强. 首先,强烈的暴雨引发了泥石流,将位于山坡上的滑坡物质输送到河道,其引发的滑坡总面积占了地震滑坡的 30% [18]. 其次,增加的径流量极大地增强了河流搬运能力. 所以,在 2010 年,岷江搬运了更多的地震滑坡物质至紫坪铺水库,沉积物组成的信号响应也更为显著,反映了水文对河流沉积物物源供给和组成的控制 [13]. 2011 年之后,随着河流径流量减小,其搬运能力减弱,沉积物 D_{50} 和磁化率在 2016 年逐渐恢复到较低水平,而 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值恢复到较高的水平 (图 2). 沉积物组成的变化进一步证实了,地震产生大量的滑坡物质后,河流沉积物供给状态从供给限制型转变为搬运限制性,河流的径流主要控制着沉积物物源 [13].

3.4 沉积物组成变化对指示地震等极端事件的意义

2008 年汶川地震后紫坪铺水库沉积物组成变化有以下 3 个显著特点: 1、沉积物粒径因为粗颗粒滑坡物质输入而增大; 2、碳酸盐组分增加; 3、地震滑坡出露的新鲜未风化的矿物输入导致地震后沉积物总体风化程度降低. CIA、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 以及 Rb/Sr 比值对此均有很好的响应,使之成为指示地震等极端事件的潜在指标. 其中,前 2 个作用造成的 Sr 同位素组成的变化还与水文条件引起的物源变化有关. 例如,现代长江下游悬浮物 Sr 同位素组成的季节性变化主要受流域季风气候影响所引起的物源变化的控制 [27]. 由于强烈的震动,地震滑坡会暴露出新鲜的未风化矿物,是地震事件的辨识性特点.

粒度效应表明,地震后紫坪铺水库沉积物 CIA 值的降低不完全是由水动力分选造成的粒度变化引起

的,其 CIA 值在地震后降低指示了地震后新鲜未风化硅酸盐矿物输入. 地震后沉积物 CIA 值分别与 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 以及 Rb/Sr 比值有良好的正相关关系,表明地震后新鲜未风化硅酸盐矿物输入是 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Rb/Sr 比值降低的一个重要原因. 地震后沉积物 CIA 值、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Rb/Sr 比值的降低,综合反映了地震滑坡新鲜未风化物质对沉积物的贡献. $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 CIA 和 Rb/Sr 比值这些风化指标相结合可以用来指示地震后新鲜未风化矿物侵蚀、搬运和沉积,为利用沉积物组成变化反演地震等极端事件提供了基础和借鉴.

2010 年暴雨之后,河流径流增大,更多的滑坡物质输入到河流,沉积物信号出现更显著的响应. 一方面,暴雨事件增强了沉积物组成变化对地震信号的响应;另一方面,这种“延迟”的响应也为确定钻孔中地震事件发生的位置带来了干扰. 例如,紫坪铺水库沉积物钻孔中 D_{50} 与磁化率变化最大的位置不是 2008 年汶川地震之后,而是 2010—2011 年暴雨事件发生之时^[13]. 因此,在确定沉积物钻孔中地震等极端事件发生的位置时,需要综合考虑水文气候因素带来的可能影响.

4 结论

2008 年汶川地震后紫坪铺水库沉积物组成变化本质上反映不同径流条件下风化土壤与地震滑坡物质不同比例的混合,CIA、 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 以及 Rb/Sr 比值对此均有很好的响应. 2008 年汶川地震后沉积物 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 与 Rb/Sr 比值同步降低,并且与 CIA 值呈正相关性,指示地震暴露了新鲜未风化矿物,是地震事件发生的辨识性特点. 特别有意义的是,沉积物组成更显著的信号响应出现在地震后强径流的 2010—2011 年,表明水文对地震后沉积物物源供给和组成的控制. 本研究为利用沉积物指示地震等极端事件提供了潜在指标,同时指出在确定沉积物序列中地震等极端事件发生的位置时,需要综合考虑水文气候因素带来的可能影响.

5 附录

附录见电子版(DOI: 10.18307/2020.0627.)

6 参考文献

- [1] Hovius N, Meunier P, Lin CW *et al.* Prolonged seismically induced erosion and the mass balance of a large earthquake *Earth and Planetary Science Letters*, 2011, **304**(3/4): 347-355.
- [2] Keefer DK. Landslides caused by earthquakes. *Geological Society of America Bulletin*, 1984, **95**(4): 406-421.
- [3] Wang J, Jin Z, Hilton RG *et al.* Controls on fluvial evacuation of sediment from earthquake-triggered landslides. *Geology*, 2015, **43**(2): 115-118.
- [4] Fan X, Scaringi G, Korup O *et al.* Earthquake-induced chains of geologic hazards: Patterns, mechanisms, and impacts. *Reviews of Geophysics*, 2019, **57**. <https://doi.org/10.1029/2018RG000626>.
- [5] Jin Z, West AJ, Zhang F *et al.* Seismically enhanced solute fluxes in the Yangtze River headwaters following the A.D. 2008 Wenchuan earthquake. *Geology*, 2016, **44**(1): 47-50.
- [6] Emberson R, Hovius N, Galy A *et al.* Chemical weathering in active mountain belts controlled by stochastic bedrock landsliding. *Nature Geoscience*, 2016, **9**(1): 42-45.
- [7] Wang J, Jin Z, Hilton RG *et al.* Earthquake-triggered increase in biospheric carbon export from a mountain belt. *Geology*, 2016, **44**(6): 471-474.
- [8] Bao R, Strasser M, McNichol AP *et al.* Tectonically-triggered sediment and carbon export to the Hadal zone. *Nature Communications*, 2018, **9**: 121. DOI: 10.1038/s41467-017-02504-1.
- [9] Li Y, Zhou RJ, Densmore AL *et al.* Geomorphic evidence for the late cenozoic strike-slipping and thrusting in Longmen mountain at the eastern margin of the Tibetan Plateau. *Quaternary Sciences*, 2006, **26**(1): 42-53. [李勇, 周荣军, Densmore AL 等. 青藏高原东缘龙门山晚新生代走滑-逆冲作用的地貌标志. 第四纪研究, 2006, **26**(1): 42-53.]
- [10] Li G, West AJ, Densmore AL *et al.* Seismic mountain building: Landslides associated with the 2008 Wenchuan earthquake in the context of a generalized model for earthquake volume balance. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2014, **15**(4): 833-844.
- [11] Li G, West AJ, Densmore AL *et al.* Connectivity of earthquake-triggered landslides with the fluvial network: implications for landslide sediment transport after the 2008 Wenchuan earthquake. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*,

- 2016, **121**(4): 703-724.
- [12] Dai FC, Xu C, Yao X *et al.* Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquake, China. *Journal of Asian Earth Science*, 2011, **40**(4): 883-895.
- [13] Zhang F, Jin Z, West AJ *et al.* Monsoonal control on a delayed response of sedimentation to the 2008 Wenchuan earthquake. *Science Advances*, 2019, **5**(6): eaav7110. DOI: 10.1126/sciadv.aav7110.
- [14] Nesbitt HW, Young GM. Early proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 1982, **299**: 715-717.
- [15] McLennan SM. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 1993, **101**(2): 295-303.
- [16] Nesbitt HW, Markovics G, Price RC. Chemical processes affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, **44**(11): 1659-1666.
- [17] West AJ, Hetzel R, Li G *et al.* Dilution of ^{10}Be in detrital quartz by earthquake-induced landslides: Implications for determining denudation rates and potential to provide insights into landslide sediment dynamics. *Earth and Planetary Science Letters*, 2014, **396**: 143-153.
- [18] Zhang S, Zhang LM, Glade T. Characteristics of earthquake- and rain-induced landslides near the epicenter of Wenchuan earthquake. *Engineering Geology*, 2014, **175**(11): 58-73.
- [19] Eynatten HV, Tolosana-Delgado R, Karius V. Sediment generation in modern glacial settings: Grain-size and source-rock control on sediment composition. *Sedimentary Geology*, 2012, **280**: 80-92.
- [20] Bouchez J, Gaillardet J, France-Lanord C *et al.* Grain size control of river suspended sediment geochemistry: Clues from Amazon River depth profiles. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, 2011, **12**(3). DOI: 10.1029/2010GC003380.
- [21] Palmer MR, Edmond JM. Controls over the strontium isotope composition of river water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, **56**(5): 2099-2111.
- [22] Wei G, Ma J, Liu Y *et al.* Seasonal changes in the radiogenic and stable strontium isotopic composition of Xijiang River water: Implications for chemical weathering. *Chemical Geology*, 2013, **343**: 67-75.
- [23] Krishnaswami S, Trivedi JR, Sarin MM *et al.* Strontium isotopes and rubidium in the Ganga-Brahmaputra river system: Weathering in the Himalaya, fluxes to the Bay of Bengal and contributions to the evolution of oceanic $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$. *Earth and Planetary Science Letters*, 1992, **109**(1): 243-253.
- [24] Dasch EJ. Strontium isotopes in weathering profiles, deep-sea sediments, and sedimentary rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, **33**(12): 1521-1552.
- [25] Jin Z, Wang S, Shen J *et al.* Carbonate versus silicate Sr isotope in lake sediments and its response to Little Ice Age. *Chinese Science Bulletin*, 2003, **48**(1): 95-100.
- [26] Huang SJ, Shi H, Zhang M *et al.* Global contrast of devonian strontium isotope evolution curves in Longmen mountain and dating of marine stratum. *Progress in Natural Science*, 2002, **12**(9): 945-951. [黄思静, 石和, 张萌等. 龙门山泥盆纪锶同位素演化曲线的全球对比及海相地层的定年. 自然科学进展, 2002, **12**(9): 945-951.]
- [27] Mao CP, Chen J, Yuan XY *et al.* Seasonal variations in the Sr-Nd isotopic compositions of suspended particulate matter in the lower Changjiang River: Provenance and erosion constraints. *Chinese Science Bulletin*, 2011, **56**(22): 2371-2378.
- [28] Bouchez J, Lupker M, Gaillardet J *et al.* How important is it to integrate riverine suspended sediment chemical composition with depth? Clues from Amazon River depth-profiles. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2011, **75**(22): 6955-6970.
- [29] Wünnemann B, Wagner J, Zhang Y *et al.* Implications of diverse sedimentation patterns in Hala Lake, Qinghai Province, China for reconstructing Late Quaternary climate. *Journal of Paleolimnology*, 2012, **48**(4): 725-749.
- [30] Yang YP, Ma XY, Wang L *et al.* Evaluations of three methods used in carbonate content determination for lacustrine sediments. *J Lake Sci*, 2016, **28**(4): 917-924. DOI: 10.18307/2016.0426. [阳亚平, 马雪洋, 王林等. 湖泊沉积物碳酸盐含量3种测定方法的比较. 湖泊科学, 2016, **28**(4): 917-924.]
- [31] Jin Z, Wang S, Shen J *et al.* Weak chemical weathering during the Little Ice Age recorded by lake sediments. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2001, **44**(7): 652-658.
- [32] Bickle MJ. The role of metamorphic decarbonation reactions in returning strontium to the silicate sediment mass. *Nature*, 2004, **367**: 699-704.
- [33] Yang S, Jiang S, Ling H *et al.* Sr-Nd isotopic compositions of the Changjiang sediments: Implications for tracing sediment sources. *Science in China: Series D: Earth Sciences*, 2007, **50**(10): 1556-1565.

附录 紫坪铺水库和河漫滩沉积物元素含量和⁸⁷Sr/⁸⁶Sr 比值测定结果*

Appendix Elemental concentrations and ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr ratios for sediments from the Zipingpu reservoir and river bank											
样品号	深度/cm	K	Ca	Na	Mg	Al	Rb	Sr	CIA	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2 SE
		wt. %				μg/g					
ZPPA3-1-1	3.09~5.67	2.53	2.70	1.22	1.73	8.81	139	194	65.9	0.716834	0.000016
ZPPA3-1-2	72.93~75.52	2.45	3.52	1.27	1.75	8.15	126	207	63.8	0.717082	0.000020
ZPPA3-1-3	119.50~122.08	2.25	3.20	1.03	1.62	7.41	119	173	65.4	0.717630	0.000014
ZPPA3-2-1-1	171.09~173.27	2.12	3.85	1.10	1.91	7.48	117	181	65.1	0.716494	0.000020
ZPPA3-2-2-1	190.69~192.87	2.18	3.95	1.12	1.95	7.48	119	185	64.6	0.716441	0.000022
ZPPA3-2-2-2	247.31~249.49	2.21	4.11	1.14	2.01	7.57	121	188	64.5	0.716465	0.000020
ZPPA3-2-2-3	264.73~266.91	2.12	4.05	1.08	1.95	7.25	117	182	64.6	0.716579	0.000020
ZPPA3-2-2-4	308.29~310.47	2.10	4.19	1.14	1.95	7.21	116	192	63.8	0.716558	0.000020
ZPPA3-3-1-1	316.70~319.06	2.35	4.79	1.30	2.22	8.08	131	214	63.5	0.716112	0.000018
ZPPA3-3-2-1	353.25~355.61	2.09	4.24	1.12	1.97	7.16	113	187	64.0	0.716191	0.000022
ZPPA3-3-2-2	365.04~367.40	2.01	3.84	1.27	1.87	7.08	109	194	62.0	0.715670	0.000028
ZPPA3-3-2-3	388.62~390.97	2.14	4.12	1.39	1.99	7.57	113	210	61.6	0.715657	0.000034
ZPPA3-3-2-4	409.84~412.19	2.00	3.38	1.56	1.65	7.11	101	210	58.6	0.715118	0.000030
ZPPA3-3-2-5	421.62~423.98	1.99	3.25	1.49	1.65	7.03	101	197	59.2	0.715371	0.000026
ZPPA3-3-2-6	440.49~442.84	2.16	3.61	1.68	1.78	7.72	112	225	58.8	0.715156	0.000022
ZPPA3-3-2-7	456.99~459.35	1.84	2.85	1.37	1.49	6.67	96	191	59.9	0.715117	0.000026
ZPPA3-3-2-8	478.21~480.57	1.94	2.90	1.51	1.54	6.98	100	207	59.0	0.715012	0.000026
ZPPA3-4-1-1	486.43~488.54	2.06	3.11	1.62	1.66	7.52	120	240	59.1	0.714357	0.000030
ZPPA3-4-1-2	515.94~518.04	2.62	3.69	1.22	1.73	8.61	171	230	65.1	0.716256	0.000018
ZPPA3-4-2-1	530.69~532.80	2.77	4.55	1.14	1.79	8.85	185	231	66.1	0.716842	0.000024
ZPPA3-4-2-2	543.33~545.44	2.64	3.51	0.97	1.65	8.62	173	196	68.0	0.717626	0.000026
ZPPA3-4-2-3	560.19~562.30	2.54	3.48	0.96	1.62	8.66	170	197	68.6	0.717747	0.000020

样品号	深度/cm	K	Ca	Na	Mg	Al	Rb	Sr	CIA	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	2 SE
		wt. %				μg/g					
ZPPA3-4-2-4	581.27~583.38	2.33	3.79	0.92	1.65	8.04	154	203	68.2	0.716739	0.000028
ZPPA3-4-2-5	596.02~598.13	2.35	4.25	0.94	1.69	8.24	153	218	68.5	0.716575	0.000030
ZPPA3-4-2-6	610.77~612.88	2.34	4.03	0.98	1.65	7.89	152	215	67.0	0.716302	0.000022
ZPPA3-4-2-7	623.42~625.53	2.62	3.83	0.97	1.66	8.76	172	226	68.4	0.716797	0.000016
ZPPA3-4-2-8	642.39~644.49	2.74	3.32	0.89	1.66	9.02	177	201	69.5	0.717908	0.000014
ZPPA3-4-2-9	657.14~659.25	2.88	3.11	0.89	1.64	9.19	194	193	69.5	0.718376	0.000016
ZPPA3-5-1-1	679.44~681.47	2.80	2.96	0.92	1.60	8.30	150	183	67.2	0.718209	0.000018
ZPPA3-5-1-2	693.68~695.72	2.50	2.76	0.81	1.43	8.30	140	172	69.8	0.718186	0.000018
ZPPA3-5-2-1	713.01~715.05	2.53	2.93	0.84	1.49	8.72	139	172	70.3	0.718103	0.000020
ZPPA3-5-2-2	727.26~729.29	2.50	2.90	0.82	1.46	8.24	178	170	69.5	0.717796	0.000018
ZPPA3-5-2-3	749.64~751.67	2.25	3.23	0.81	1.45	7.87	127	175	69.7	0.717139	0.000022
ZPPA3-5-2-4	763.88~765.92	2.24	3.40	0.78	1.46	7.84	129	176	70.1	0.717108	0.000020
ZPPA3-5-2-5	776.09~778.13	2.16	3.74	0.64	1.40	7.46	121	168	71.7	0.717586	0.000014
YX01-1	0.00~2.05	1.84	4.07	1.16	1.61	5.81	—	243	59.4	0.715722	0.000018
YX01-4	6.10~8.00	1.80	4.25	1.24	1.57	5.37	—	226	56.5	0.715201	0.000014
YX01-8	13.90~16.05	2.07	3.67	1.14	1.58	6.13	—	235	60.1	0.716743	0.000014
YX01-11	20.20~22.30	2.32	3.79	1.07	1.66	6.96	—	246	63.0	0.717761	0.000020
YX01-14	26.30~28.45	1.84	5.00	1.22	1.90	5.89	—	235	58.9	0.716034	0.000022
YX01-17	32.10~34.25	1.67	5.90	1.44	1.83	5.10	—	228	53.1	0.714272	0.000016
YX01-21	40.15~42.25	1.80	4.76	1.82	1.62	5.47	—	232	49.9	0.713799	0.000016

* 样品号以 ZPPA 开头的是来自钻孔 A 的水库沉积物, YX01 开头的是来自钻孔 D 的河漫滩沉积物;—未测试.