

## 黄土高原聚淤沉积旋回特征及地球化学划分<sup>①</sup>

王夏青<sup>1,2</sup>, 彭保发<sup>1,2</sup>, 李福春<sup>3</sup>, 阚 尚<sup>3</sup>

(1 湖南文理学院资源环境与旅游学院, 湖南常德 415000; 2 洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同发展中心, 湖南常德 415000;

3 南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

**摘要:**黄土高原聚淤/淤地坝内的沉积物是黄土再侵蚀搬运的直接结果, 以高堆积速率和多沉积旋回为特征, 是追踪该地区小流域土壤侵蚀、认识黄土高原地球关键带过程的理想载体。如何鉴定并有效划分沉积旋回是利用沉积序列恢复小流域土壤侵蚀和生态环境变化过程的基础。本文选取靖边和合水聚淤为代表, 通过典型可见沉积旋回的物理、地球化学和生物等指标综合分析, 较全面地认识沉积旋回特征, 进而提出划分旋回的有效地球化学指标。结果表明: 沉积旋回的下部粗颗粒层主要由粗粉砂和细砂组成, 以低含水量、高亮度为特征, 富集石英和锆石, Si 和 Zr 含量高; 上部细颗粒层主要由黏粒和细粉砂组成, 具水平层理, 含水量高, 亮度较低, 富集方解石、白云母、伊利石、绿泥石、高岭石等轻矿物, 高 Al、K、Fe、Rb、Ca 和 Sr 等造岩元素, 富含孢粉、有机碳氮、磷脂脂肪酸及微生物。在此基础上, 提出 Rb/Zr 比值是有效划分黄土高原聚淤/淤地坝沉积旋回的地球化学指标。这为深入认识黄土高原地球关键带中侵蚀风化、水文和生态环境变化等过程提供了研究载体和基础。

**关键词:** 沉积旋回; Rb/Zr 比; 聚淤/淤地坝; 地球关键带; 黄土高原

**中图分类号:** P539.2; P934 **文献标识码:** A

地处东亚季风边缘地带的中国黄土高原地表以强烈的土壤侵蚀和脆弱的生态环境为特征。该地区的土壤侵蚀涉及到地球关键带(earth's critical zone)研究的 3 大过程: 侵蚀风化过程、水文过程和生物地球化学过程, 是控制流域关键带物质、能量和信息流动与转化的重要节点<sup>[1-3]</sup>。因此, 示踪流域内土壤侵蚀与迁移过程和历史对认识黄土高原地球关键带功能具有重要的意义。

黄土高原分布有大量的聚淤、淤地坝和水库, 一些坝库具有确切形成或修建时间, 可以追溯到几百年前。这些聚淤/淤地坝将自坝体形成以来的经历再次侵蚀搬运的泥沙截留在坝库中, 并以沉积旋回为最小单元连续地保存下来, 形成约 10~60 m 不等的沉积序列<sup>[4-12]</sup>。因此, 黄土高原特有的坝库沉积物为高分辨率研究地球关键带中侵蚀和沉积、水文事件、土地利用等过程和历史提供了难得的地质载体<sup>[13-20]</sup>。然而, 有关黄土高原流域侵蚀过程和历史的研究主要集中在最近 60 a, 对历史时期黄土高原暴雨侵蚀过程的认识还十分有限。其中一个最大的障碍在于如何有效

地划分沉积旋回。

黄土高原聚淤/淤地坝沉积序列由物源一致且层理明显的沉积旋回叠加而成, 每个沉积旋回是单次暴雨侵蚀沉积作用的结果。每次暴雨后, 流域内的地表泥沙侵蚀进入聚淤和淤地坝, 通过分选作用, 形成两层结构的沉积旋回, 即下部粗颗粒层和上部细颗粒层。沉积旋回数量和产沙模数主要受控于暴雨的频率和强度<sup>[10]</sup>。一些学者对黄土高原坝库沉积序列开展了相关研究, 从沉积结构、孢粉<sup>[11, 21]</sup>、粒度分布<sup>[22-23]</sup>及元素组成<sup>[24]</sup>等方面描述了沉积旋回的特征。例如, 龙翼等<sup>[11]</sup>分析了黄土洼聚淤出露剖面长约 12.73 m 沉积序列的粒度和孢粉含量, 并根据两个指标划分了沉积旋回, 在此基础上计算了各旋回的产沙模数; Zhang 等<sup>[13]</sup>根据野外剖面观察、粒度和孢粉含量分布及经验性分析, 进一步提出了聚淤沉积旋回中年际冻融层的概念, 其是一年内末次旋回上部细颗粒层经历冻融作用的结果, 为沉积旋回的年际划分提供了依据。然而, 这些工作都是基于野外肉眼可见的、厚的沉积旋回的某一方面进行的, 缺乏对旋回全面的认

基金项目: 黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1622), 国家自然科学基金项目(41471114), 湖南省教育厅科研项目(17C1075)和湖南文理学院博士科研启动基金项目(E07017015)资助。

作者简介: 王夏青(1986—), 男, 山西昔阳人, 博士, 讲师, 主要从事小流域生态环境研究。E-mail: wangxq1517@hotmail.com

识,特别是难以识别一些肉眼不易分辨的旋回,更缺乏划分沉积旋回的有效指标,从而阻碍了沉积序列信息的全面提取及对流域地表过程的深入认识。

本文拟在全面分析黄土高原北部靖边聚淤、南部合水聚淤沉积旋回物理、地球化学、生物特征指标的基础上,提出高分辨率划分沉积旋回的地球化学指标,进而解析其物理、地球化学和生物特征耦合机制,从而为聚淤/淤地坝沉积序列旋回划分、反演流域侵蚀历史及生态环境演变过程,以及认识黄土高原地球关键带过程提供基础。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

**1.1.1 靖边花豹湾流域** 花豹湾流域(37°18'N, 108°36'E, 图 1A)位于陕西省靖边县王渠则镇花豹湾

村,无定河源头红柳河上游沟谷。流域内聚淤(JB-1)形成于清朝咸丰年间(公元 1851—1861 年),沟谷左岸黄土坡天然滑坡和坍塌阻截沟谷形成“聚淤”(图 1B)<sup>[25]</sup>。目前,该聚淤坝高 67 m,淤积地面平均海拔约 1 560 m,沟谷相对高差约 200 m。经野外实地测量,聚淤流域面积为 2.87 km<sup>2</sup>,纵长约 1.15 km,淤积地面面积约为 0.19 km<sup>2</sup>。野外勘察还发现,在聚淤的天然滑坡坝下游约 500 m 处,残留一块两侧被下切至原始沟谷的沉积台地,并于台地下游约 1 000 m 处发现一明显的古滑坡痕迹(图 1B)。由此判断,该台地是一古聚淤(JB-2)的沉积产物,其形成年代不详。古聚淤的淤积台面平均海拔约 1 550 m,沟谷相对高差约 250 m,流域面积为 7.87 km<sup>2</sup>,残留的台地面积约为 1.32 × 10<sup>5</sup> m<sup>2</sup>,厚约 5 m,总体积约为 6.68 × 10<sup>5</sup> m<sup>3</sup>。

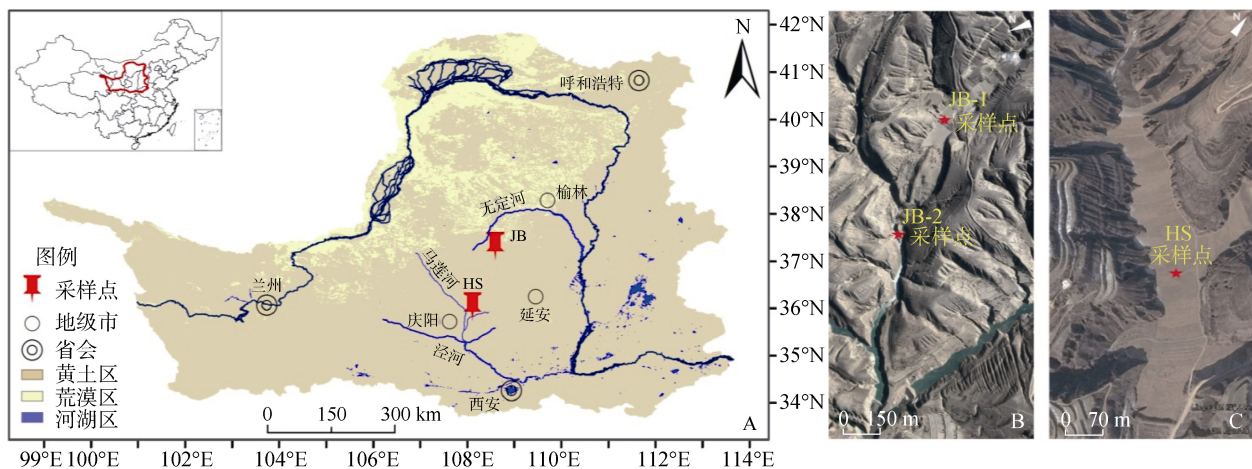


图 1 黄土高原靖边(JB)聚淤、合水(HS)聚淤地理位置(A)及采样点分布图(B: 靖边聚淤; C: 合水聚淤)

Fig. 1 Geographic locations (A) and sampling sites (B and C) of Jingbian (JB) and Heshui (HS) landslide-dammed reservoirs on Loess Plateau of China

该流域以破碎梁状丘陵带阶地地貌为特征,黄土层主要为上更新统上部风积黄绵土,其主要特点为土壤质地稍细,在雨水作用下极易受蚀。该地区属半干旱大陆性季风气候。据靖边县气象局 1957—1980 年测量和统计资料,该地年平均气温为 7.8℃,年平均降水量为 395.4 mm,降水主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 63%,其中以 7、8 月的降水量较为集中,且多为雷阵雨、暴雨等。该地年均蒸发量为 891.7 mm,约为降水量的 2.5 倍。该区水土流失严重,年产沙模数高达 1.68 × 10<sup>4</sup> t/(km<sup>2</sup>·a)<sup>[25]</sup>。

**1.1.2 合水老城镇流域** 合水老城镇流域位于甘肃省合水县老城镇,黄河的二级支流马莲河流域中游(图 1A)。合水聚淤(36°1' N, 108°7' E, HS, 图 1C)地处合水县老城镇段右岸。该聚淤因右岸黄土坡自然滑坡和坍塌,阻截沟谷并形成天然聚淤,距今已有 100

多年<sup>[26]</sup>。目前,该聚淤坝高 43 m,淤积地面平均海拔约 1 206 m,沟谷相对高差约 200 m,聚淤流域面积为 1.98 km<sup>2</sup>,纵长约 1.25 km,淤积地面面积约为 0.14 km<sup>2</sup>。流域内地形为典型的黄土高原沟壑,主要为第四纪黑垆土和黄绵土。该流域具有典型的温带大陆性季风气候,据当地气象局 1968—2006 年测量和统计资料,该地年平均气温为 9.4℃,年平均降水量为 557.7 mm,降水主要集中在 6—9 月,占全年降水量的 70%,且多为暴雨;年均蒸发量为 1 470.1 mm,约为降水量的 2.5 倍。合水县内水蚀地区的年产沙模数约为 3.1 × 10<sup>3</sup> t/(km<sup>2</sup>·a),水土流失较为严重<sup>[26]</sup>。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 岩心和散样采集** 于 2013 年 4—5 月利用螺旋钻在 JB-1 聚淤和 HS 聚淤进行钻探采样。钻探位置为各个聚淤近中心位置(图 1B, 1C),每一钻长

2.5 m, 钻头长 10 cm, 钻孔直径为 10 cm, 样品取心率近 100%。JB-1 和 HS 聚湫分别钻取 22.25 m 和 30.43 m 的沉积岩心。其中, JB-1-10 段和 HS-34-2 段中可见典型沉积旋回, 用于分析其矿物特征, 所处深度分别为 3.74 ~ 3.85 m 和 26.16 ~ 26.25 m。散样划分以可见旋回分层为基础, 细颗粒层以 1 cm 间隔分样, 粗颗粒层以 2 cm 间隔分样, JB-1-10 段和 HS-34-2 段中典型旋回分别获得 9 个和 6 个样品<sup>[10]</sup>。

于 2014 年 11 月利用荷兰生产的冲击钻配以重型电冲击锤(HM 1800)钻探 JB-2 古聚湫沉积序列。取心器套入的塑料管长 1 m, 外径为 5 cm, 切割头长为 3 cm, 取心率为 100%。JB-2 台地共获取岩心 5.29 m, JB-2-2 段中 5 个典型可见旋回位于岩心的 1.28 ~ 1.44 m 处, 同样以 1 cm 和 2 cm 间隔获得 13 个散样, 用于分析含水量、色度、粒度、元素等。与此同时, 在 JB-2 台地右侧出露剖面深度为 62.0 ~ 66.5 cm(旋回 1)和 71.5 ~ 79.5 cm(旋回 2)的两个可见旋回以相同间隔分别采集 3 个和 5 个样品, 用于分析生物组成。

**1.2.2 试验方法** JB-2-2 岩心段在兰州大学西部环境教育部重点实验室利用 Avaatech XRF core scanner 进行扫描。首先, 利用该实验室的高质量 Geotek core splitter 岩心切割机对所有钻探岩心沿长轴进行切割和分离, 并利用塑料三角铲压平分离的岩心表面; 其次, 为了避免污染扫描仪测量探头和防止样品在扫描过程中变干, 在岩心表面覆盖 4  $\mu\text{m}$  Ultralene 薄膜, 且确保薄膜没有褶皱和在薄膜下不存在气泡。高分辨率 Avaatech XRF core scanner 的仪器设置分别为: 利用锆(Zr)管在 10 kV 电压下获取较轻元素(如 Al、Si、K、Ca 和 Fe)的信号值, 扫描步骤为 2 mm, 曝光时间为 20 s; 利用铅(Pb)管在 30 kV 电压下获取较重元素(如 Zr、Rb 和 Sr)的信号值, 扫描步骤为 2 mm, 曝光时间为 40 s。扫描的元素信号强度表示为峰域面积或计量数(peak area/ counts), 信号值提供了沉积序列元素组成的半定量信息<sup>[27-28]</sup>。JB-2-2 岩心段色度分布利用 Avaatech XRF core scanner 配备的像素高达 3×2048 pixels 色度照相机获得, 其扫描分辨率为 0.07 mm, 数据格式为 RGB 和 CIE-L\*-a\*-b\*两种。

利用烘干法测定 JB-2-2 岩心段散样的含水量; 粒度(各粒径的体积分数)利用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer-2000 型激光粒度仪测量, 其误差小于 2%。以上试验均在中国科学院地球环境研究所完成。

剖面样品(旋回 1 和旋回 2)的土壤有机碳(SOC)

和全氮(TN)含量分布利用重铬酸钾外加热法和凯氏定氮法测定; 微生物生物量碳(MBC)和微生物生物量氮(MBN)利用氯仿熏蒸-K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 提取法测定; 磷脂脂肪酸(PLFA)利用修正的 Bligh-Dyer 方法测定, 细菌、真菌和放线菌数量利用 PLFA 法测定。以上试验均在南京农业大学资源与环境科学学院完成<sup>[29]</sup>。

JB-1-10 段和 HS-34-2 段散样的矿物含量在中国科学院地球环境研究所利用荷兰帕纳科公司生产的 X'pert PRO MPD 多晶 X 射线衍射仪进行测量, 其仪器设置为: 使用铜靶和超能阵列探测器, Ni 片滤波, 工作管压和管流分别为 40 kV 和 40 mA, 扫描范围( $2\theta$ )为 5° ~ 70°, 扫描步长为 0.012°/步, 扫描速度 29.845 s/步。测量结果利用 X'pertHighscore Plus 软件和 ICDD PDF22003 卡片集进行矿物成分鉴定, 并用 Rietveld 精修选项进行半定量分析<sup>[30]</sup>。

## 2 结果分析

### 2.1 典型旋回的亮度、含水量、粒度和矿物含量分布

黄土高原聚湫/淤地坝沉积的典型旋回由两层结构组成, 即下部粗颗粒层和上部细颗粒层<sup>[10-13]</sup>, 该层理结构分选成层充分且足够厚时肉眼可见并易于识别。靖边聚湫 JB-2-2 岩心段的照片、亮度、含水量和粒度分布显示于图 2 中, 5 个旋回的粗、细颗粒层分布清晰可见。该段亮度值分布范围为 56.1 ~ 79.5  $\text{cd}/\text{m}^2$ , 旋回下部粗颗粒层表现为高值, 而上部细颗粒层显示为低值, 说明旋回下部较亮而上部较暗, 与肉眼观察一致。该段含水量分布范围为 56.1 ~ 193.5 g/kg, 含水量的最低值和最高值分别出现在 129.8 cm 和 142.8 cm 处, 总体均表现为下部粗颗粒层呈低值, 上部细颗粒层呈高值, 说明粗颗粒层含水量低, 细颗粒层含水量高。该段粒度分布总体表现为每个旋回下部粗颗粒层主要由粗粉砂和细砂组成, 上部细颗粒层主要由黏粒和细粉砂组成。

图 3 显示 HS 聚湫 HS-34-2 岩心段和 JB-1 聚湫 JB-1-10 岩心段典型可见旋回矿物组成。两段岩心段的典型可见旋回划分和理化特征详见 Wang 等<sup>[10]</sup>的研究报告。通过对两个典型可见旋回不同矿物组成的半定量分析, 石英在两个旋回中所占比例最大, 高达 35% ~ 65%(图 3)。该两个典型可见旋回的矿物组成总体表现为: 石英主要富集在下部粗颗粒层; 方解石、白云母、黏土矿物(伊利石、绿泥石、高岭石)集中在上部细颗粒层。该矿物分布特征与 JB-2 古聚湫中典型可见旋回的色度、含水量和粒度分布相匹配。

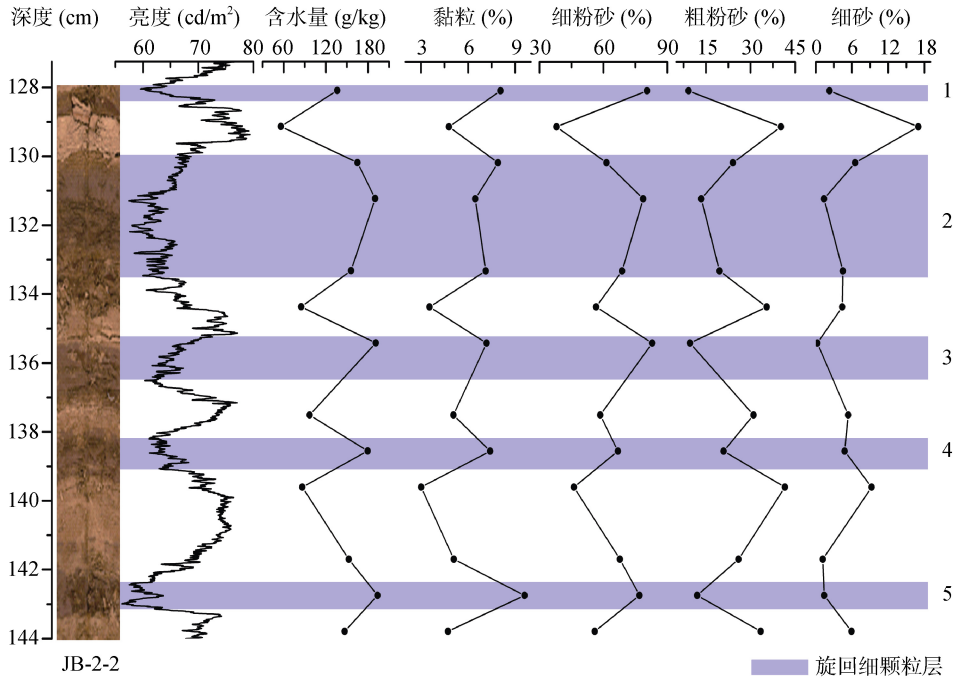


图 2 JB-2-2 岩心段 5 个典型可见旋回亮度、含水量和粒度分布

Fig. 2 Luminance, water contents and grain size distributions of five representative visible deposition couplets in JB-2-2 core section along with optical image

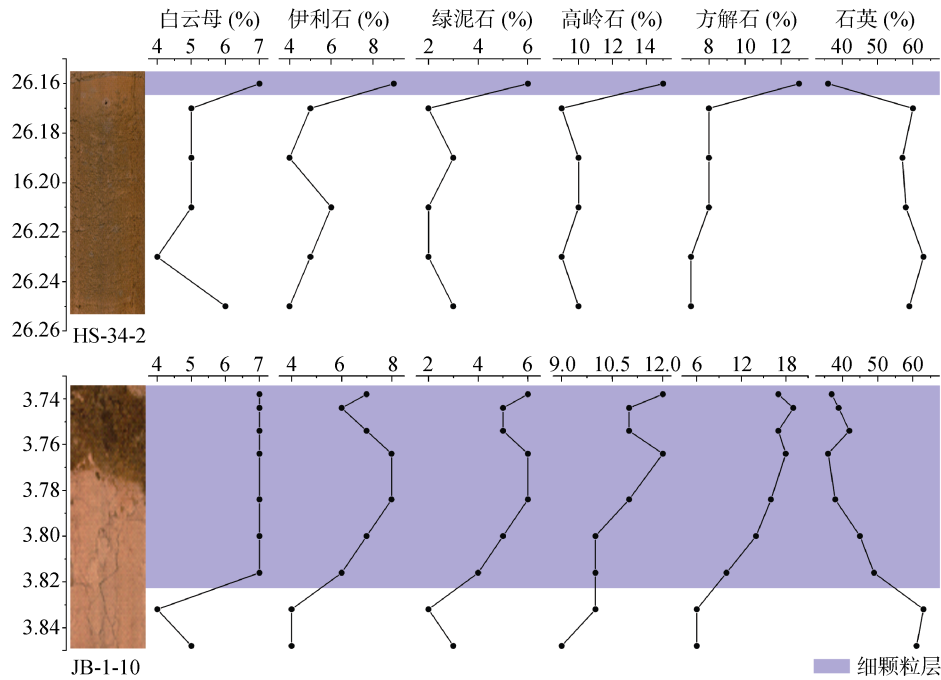


图 3 HS-34-2 和 JB-1-10 岩心段典型可见旋回矿物组成

Fig. 3 Mineralogical compositions of representative visible deposition couplets in HS-34-2 and JB-1-10 core sections along with optical images

### 2.2 典型旋回的元素分布

JB-2 古聚淤 JB-2-2 岩心段 5 个可见旋回的元素分布通过高分辨率 XRF 岩心原状扫描获得。单个元素的信号强度和分布受多种因素的影响，如 X 射线源(能力强度、光管类型)、曝光时间、沉积物物理特征等<sup>[31-37]</sup>。在最佳仪器设置下，扫描的元素信号强度

主要受岩心表面平整度、岩心裂隙、粒度与矿物一致性、岩心基质、有机质含量、含水量、薄膜下水汽等表面物理属性的影响。研究表明，含水量对原子量 26(Fe)的元素(特别是 Al、Si)影响较大，而原子量较大的元素(如 Rb、Sr、Zr)几乎不受其影响<sup>[31-33]</sup>，其他所有因素对元素信号强度的影响基本一致。

JB-2-2 岩心段 Zr 和 Si 元素信号强度分布基本一致,其分布范围分别为 $(3.7 \sim 8.3) \times 10^3$  counts 和 $(3.1 \sim 9.9) \times 10^4$  counts,两个元素的峰值均出现在各旋回的粗颗粒层中,说明 Zr 和 Si 元素富集在该层中(图 4)。为了识别其他元素(Al、K、Fe、Rb、Ca 和 Sr)在旋回中的分布特征,利用 Zr 元素信号分布作为元素比值的分母消除扫描过程中岩心表面物理属性对所有元

素信号强度的一致影响(图 4)。JB-2-2 岩心段 Al/Zr、K/Zr、Fe/Zr、Rb/Zr、Ca/Zr 和 Sr/Zr 在 5 个可见旋回中的分布基本一致,其分布范围依次为:0.5~1.4、3.3~9.1、14.6~35.1、0.4~0.6、16.1~48.2 和 1.1~1.6。相比于 Zr 和 Si,这些元素的峰值均出现在每个旋回的细颗粒层中,表明 Al、K、Fe、Rb、Ca 和 Sr 元素主要富集于该层中。

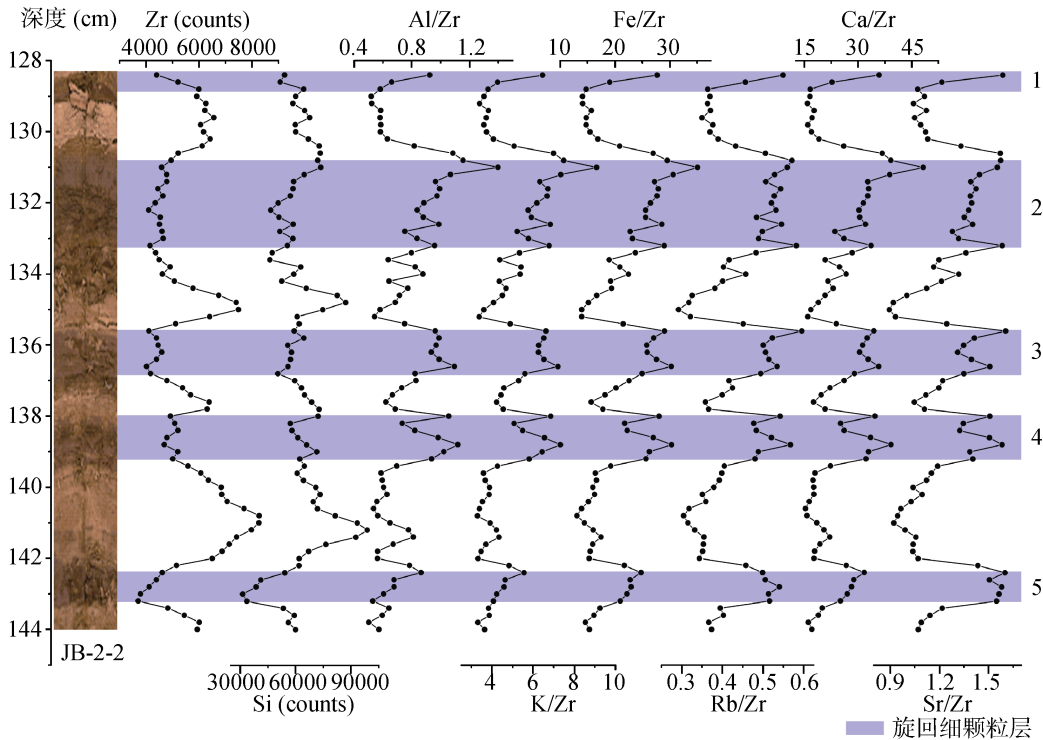


图 4 JB-2-2 岩心段 5 个典型可见旋回元素分布

Fig. 4 Elemental distributions of five representative visible deposition couplets in JB-2-2 core section along with optical image

### 2.3 典型旋回的微生物及孢粉分布

对 JB-2 古聚淤两个典型沉积旋回各层的 SOC、TN、MBC、MBN、PLFA、细菌、真菌和放线菌含量分析表明,8 种生物指标均在各旋回的细颗粒层中表现为高值,而低值出现在旋回的粗颗粒层中(表 1),

说明土壤有机质和微生物主要富集于旋回的细颗粒层中<sup>[29]</sup>。前人有关淤地坝和聚淤典型旋回粗、细颗粒层的孢粉含量分析表明,各旋回的孢粉含量高值均出现在细颗粒层中,最高值达 2 775 粒/g,表明孢粉主要富集于每个旋回的细颗粒层中<sup>[21]</sup>。

表 1 JB-2 古聚淤沉积典型旋回的微生物特征分布

Table 1 Distributions of biological characters in representative deposition couplets in JB-2 paleolandslide-dammed reservoir

JB-2 古聚淤	SOC (g/kg)	TN (g/kg)	MBC (mg/kg)	MBN (mg/kg)	PLFA (nmol/g)	细菌 (nmol/g)	真菌 (nmol/g)	放线菌 (nmol/g)	
旋回 1	细颗粒层(62~63 cm)	3.56	0.57	59.00	34.48	15.28	9.68	2.84	2.75
	粗颗粒层(63~66.5 cm)	1.12	0.31	39.92	20.39	6.14	4.08	0.77	0.93
旋回 2	细颗粒层(71~73 cm)	4.70	0.64	67.48	40.48	14.88	10.75	2.96	1.16
	粗颗粒层(73~79.5 cm)	1.76	0.31	46.67	27.04	8.46	5.50	1.50	1.09



### 3 讨论

#### 3.1 典型沉积旋回特征

黄土高原聚淤/淤地坝沉积旋回的物质主要来源于流域再侵蚀搬运的黄土,被坝体截留后,侵蚀泥沙发生分选和成层作用,粗颗粒物率先沉积,细颗粒物随后沉积,进而形成两层结构的旋回,即下部粗颗粒层和上部细颗粒层。该旋回层理结构在其分选充足且足够厚时肉眼可见,一些细颗粒层在出露剖面可呈现“冻豆腐”结构<sup>[10, 13]</sup>。通过综合分析来自黄土高原南部合水聚淤和北部靖边聚淤 HS-34-2、JB-1-10 和 JB-2-2 岩心段、JB-2 古聚淤出露剖面典型可见旋回,其物理特征为:下部粗颗粒层亮度较高,主要由粗粉砂和细砂组成,含水量低,石英富集在该层。较石英密度更大、质量更重的锆石在分选过程中更易快速沉积<sup>[38]</sup>,因此也主要集中在粗颗粒层中。上部细颗粒层亮度较低,主要由黏粒和细粉砂组成,含水量高,较轻的矿物如方解石、白云母、黏土矿物(伊利石、绿泥石、高岭石)富集在该层。沉积旋回的地球化学特征表现为:Si 和 Zr 主要富集在下部粗颗粒层中,而 Al、K、Fe、Rb、Ca 和 Sr 元素在上部细颗粒层的含量较高。这一结果与岳大鹏等<sup>[24]</sup>分析黄土洼聚淤沉积旋回的化学特征基本一致。旋回的生物特征表现为:上部细颗粒层的 SOC、TN、MBC、MBN、PLFA、细菌、真菌、放线菌和孢粉<sup>[21]</sup>等均显著高于下部粗颗粒层。这些特征有助于在利用聚淤/淤地坝沉积序列反演小流域不同时期生态环境和地球关键带生态过程时,仅需分析各旋回上部细颗粒层的生物特征,有效减少了试验工作量和费用。

黄土高原典型聚淤沉积旋回的物理、地球化学和生物特征分布表明,它们之间存在相互耦合的机制。当暴雨侵蚀流域沟谷地表物质汇入聚淤后,侵蚀泥沙在水体中发生分选和成层作用,含有锆石和石英的细砂、粗粉砂率先沉积在下部,导致 Zr 和 Si 元素集中在下部粗颗粒层中;细砂及粗粉砂颗粒间的间隙较大<sup>[39-40]</sup>,土壤孔隙水易向下流失,且单位体积颗粒数较少,故而粗颗粒层的含水量较低、亮度较高。随后,相对较轻的细粉砂和黏粒覆盖于粗颗粒层上部,其中黏土矿物、方解石、云母等矿物富集在该层,进而导致 Al、K、Fe、Rb、Ca 和 Sr 元素的含量较高;此外,在黏粒中有更多的交换性  $Ca^{2+}$ ,使得 Ca 和 Sr 进一步富集在该层。黏粒和细粉砂颗粒间较为致密,孔隙水不易流失,故而细颗粒层的含水量较高、亮度

较低。由于质量较轻、黏粒吸附及丰富的有机质,孢粉、生物有机质、微生物等也主要富集在该层<sup>[41]</sup>。这些物理、化学和生物过程的相互耦合形成了沉积旋回相对一致的变化特征。

#### 3.2 划分旋回的地球化学指标

前人对黄土高原聚淤/淤地坝沉积旋回的研究主要通过对沉积序列出露剖面的野外观测和经验性分析,基于亮度、结构、层理和粒度组成划分沉积旋回并以 1 cm 的分辨率采集样品和室内实验分析<sup>[11-13, 19-23]</sup>。这些传统方法仅可用于识别足够厚的沉积旋回,然而聚淤/淤地坝沉积序列中存在一些无法用肉眼识别的旋回<sup>[10]</sup>。本课题前期的研究表明,基于高分辨率 XRF 岩心连续扫描技术(XRF Core Scanning, XRF-CS)获得的元素分布可清晰指示旋回各层次的界限及侵蚀泥沙不同颗粒由快到慢的沉积过程<sup>[10]</sup>。在此,本研究根据上述沉积旋回的变化特征,通过 XRF-CS 获得的元素分布提出有效的地球化学指标,以高分辨率地识别沉积序列中的所有可见和不可见(无法用肉眼识别)的沉积旋回。

通过对沉积岩心表面原位测量,XRF-CS 可获取分辨率高达 0.1 mm 的、连续的元素信号强度。该技术特别适用于类似黄土的颗粒较细(黏粒和细粉砂)、组成均匀的沉积序列元素分析<sup>[28-29]</sup>,因此 XRF-CS 为黄土沉积序列中元素分布提供了最佳的分析工具<sup>[10, 42-43]</sup>,进而为识别沉积旋回的地球化学特征和指标提取提供了条件。

研究表明,利用富集在粗颗粒中的元素与集中在细颗粒中的元素比值(如 Zr/Rb、Si/Al 和 Zr/Al)可以分辨黄土和古土壤层<sup>[38, 44-45]</sup>。考虑到由于较轻的原子量,Al 和 Si 在 XRF-CS 扫描时易受光管质地和沉积物表面属性的影响而导致测量精度较差<sup>[46]</sup>,本研究着重考虑 Zr/Rb 比值划分沉积旋回的有效性。上述聚淤沉积旋回的理化特征表明,Zr 主要存在于抗风化的锆石中,其在侵蚀泥沙的分选过程中由于高密度和质量快速沉积于旋回粗颗粒层底部;Rb 以类质同象存在于含 K 的云母和黏土矿物中,其主要富集在旋回的细颗粒层顶部;两个元素 Zr 和 Rb 在旋回成层后稳定存在于粗颗粒层和细颗粒层中,不随孔隙水在冻融作用下向上迁移<sup>[10]</sup>。因此,XRF-CS 获得的高分辨率 Rb/Zr 比值可作为高分辨率划分聚淤沉积旋回的有效地球化学指标。由图 4 可见,高 Rb/Zr 比值可以清晰指示上部细颗粒层,而下部粗颗粒层以低 Rb/Zr 比值为特征,从而有效地划分了各旋回及层理的界限。

## 4 结论

1) 黄土高原聚淤沉积旋回具有的特征为下部粗颗粒层主要由粗粉砂和细砂组成, 松散、含水量低, 亮度高, 富集石英等重矿物, Si 和 Zr 元素含量高; 上部细颗粒层主要由黏粒和细粉砂组成, 含水量高、亮度低, 呈水平层理, 较轻的矿物如方解石、白云母、黏土矿物(伊利石、绿泥石、高岭石)集中在该层, Al、K、Fe、Rb、Ca 和 Sr 元素含量较高, 孢粉、SOC、TN、MBC、MBN、PLFA、细菌、真菌和放线菌等均富集在该层中。

2) XRF 岩心连续扫描的 Rb/Zr 比被推荐用于高分辨率划分聚淤/淤地坝沉积旋回的有效地球化学指标。

**致谢:** 感谢中国科学院地球环境研究所金章东研究员和中国科学院水利部成都山地与灾害环境研究所张信宝研究员对论文构思和撰写的指导, 中国科学院地球环境研究所肖军、张飞对样品采集和分析的协助, 兰州大学西部环境与气候变化研究院潘燕辉对 XRF 岩心扫描的指导 and 帮助。

### 参考文献:

- [1] Richter D D, Mobley M L. Monitoring earth's critical zone[J]. *Science*, 2009, 326: 1067–1068
- [2] 杨建锋, 张翠光. 地球关键带: 地质环境研究的新框架[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(3): 98–104
- [3] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, 70(12): 1859–1869
- [4] Xu X Z, Zhang H W, Zhang O Y. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China[J]. *Environmental Science & Policy*, 2004, 7(2): 79–86
- [5] Ran D C, Luo Q H, Zhou Z H, et al. Sediment retention by check dams in the Hekouzhen-Longmen Section of the Yellow River[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2008, 23(2): 159–166
- [6] Jin Z, Cui B L, Song Y, et al. How many check dams do we need to build on the Loess Plateau?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(16): 8527–8528
- [7] Yu Y G, Wang H J, Shi X F, et al. New discharge regime of the Huanghe (Yellow River): Causes and implications[J]. *Continental Shelf Research*, 2013, 69: 62–72
- [8] Wang S A, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. *Nature Geoscience*, 2016, 9(1): 1–5
- [9] 刘震. 黄土高原地区水土保持淤地坝规划概述[J]. *中国水土保持*, 2003(12): 11–13
- [10] Wang X Q, Jin Z D, Chen L M, et al. High-resolution X-ray fluorescence core scanning of landslide-dammed reservoir sediment sequences on the Chinese Loess Plateau: New insights into the formation and geochemical processes of annual freeze-thaw layers[J]. *Geoderma*, 2016, 279: 122–131
- [11] 龙翼, 张信宝, 李敏, 等. 陕北子州黄土丘陵区古聚淤洪水沉积层的确定及其产沙模数的研究[J]. *科学通报*, 2009, 54(1): 73–78
- [12] Wang Y F, Chen L D, Fu B J, et al. Check dam sediments: An important indicator of the effects of environmental changes on soil erosion in the Loess Plateau in China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2014, 186(7): 4275–4287
- [13] Zhang X B, Walling D E, He X, et al. Use of landslide-dammed lake deposits and pollen tracing techniques to investigate the erosional response of a small drainage basin in the Loess Plateau, China, to land use change during the late 16th century[J]. *Catena*, 2009, 79(3): 205–213
- [14] Castillo C, Perez R, Gomez J A. A conceptual model of check dam hydraulics for gully control: efficiency, optimal spacing and relation with step-pools[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(5): 1705–1721
- [15] Polyakov V O, Nichols M H, Mcclaran M P, et al. Effect of check dams on runoff, sediment yield, and retention on small semiarid watersheds[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 69(5): 414–421
- [16] Zhao G J, 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
- [17] Zhao G J, Kondolf G M, Mu X M, et al. Sediment yield reduction associated with land use changes and check dams in a catchment of the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2017, 148: 126–137
- [18] Li X G, Wei X, Wei N. Correlating check dam sedimentation and rainstorm characteristics on the Loess Plateau, China[J]. *Geomorphology*, 2016, 265: 84–97
- [19] Chen F X, Fang N F, Wang Y X, et al. Biomarkers in sedimentary sequences: indicators to track sediment sources over decadal timescales[J]. *Geomorphology*, 2017, 278: 1–11
- [20] Wei Y H, He Z, Li Y J, et al. Sediment yield deduction from check-dams deposition in the weathered sandstone watershed on the north Loess Plateau, China[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28: 217–231
- [21] 张信宝, Walling D E, 贺秀斌, 等. 黄土高原小流域植被变化和侵蚀产沙的孢粉示踪研究初探[J]. *第四纪研究*, 2005, 25(6): 60–66
- [22] 李勋贵, 李占斌, 魏霞. 黄土高原淤地坝坝地淤积物两个重要物理特性指标研究[J]. *水土保持研究*, 2007, 14(2): 218–220
- [23] 汪亚峰, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 黄土高原小流域淤地坝泥沙粒度的剖面分布[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(10): 2461–2467
- [24] 岳大鹏, 袁晓宁, 李奎, 等. 陕北子洲黄土洼地淤地淤积剖面元素分布特征分析[J]. *干旱区地理*, 2014, 37(5): 875–882
- [25] 靖边县地方志编纂委员会. 靖边县志[M]. 西安: 陕西人民出版社, 1993: 41–167
- [26] 合水县志编纂委员会. 合水县志[M]. 兰州: 甘肃文化出版社, 2006: 81–387

- [27] Croudace I W, Rindby A, Rothwell R G. ITRAX: description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner[J]. Geological Society, London, Special Publications, 2006, 267(1): 51–63
- [28] Rothwell R G. Micro-XRF studies of sediment cores: A perspective on capability and application in the environmental sciences[M]. Springer: Micro-XRF Studies of Sediment Cores, 2015: 1–21
- [29] 阚尚, 李福春, 田智宇, 等. 陕西靖边花豹湾聚淤坝地土壤的微生物群落结构特征及其影响因子[J]. 土壤, 2016, 48(2): 291–297
- [30] 曾蒙秀, 宋友桂. 新疆伊犁昭苏黄土剖面中的矿物组成及其风化意义[J]. 地质论评, 2013, 59(3): 575–586
- [31] Tjallingii R, Rohl U, Kolling M, et al. Influence of the water content on X-ray fluorescence core-scanning measurements in soft marine sediments[J]. Geochemistry Geophysics Geosystems, 2007, 8, doi: 10.1029/2006GC001393
- [32] Lowemark L, Chen H F, Yang T N, et al. Normalizing XRF-scanner data: A cautionary note on the interpretation of high-resolution records from organic-rich lakes[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2011, 40(6): 1250–1256
- [33] Hennekam R, de Lange G. X-ray fluorescence core scanning of wet marine sediments: methods to improve quality and reproducibility of high-resolution paleoenvironmental records[J]. Limnology and Oceanography: Methods, 2012, 10: 991–1003
- [34] Bertrand S, Hughen K, Giosan L. Limited influence of sediment grain size on elemental XRF core scanner measurements[M]. Springer: Micro-XRF Studies of Sediment Cores, 2015: 473–490
- [35] Maclachlan S E, Hunt J E, Croudace I W. An empirical assessment of variable water content and grain-size on X-ray fluorescence core-scanning measurements of deep sea sediments[M]. Springer: Micro-XRF Studies of Sediment Cores, 2015: 173–185
- [36] Weltje J G, Bloemsa R M, Tjallingii R, et al. Prediction of geochemical composition from XRF core scanner data: A new multivariate approach including automatic selection of calibration samples and quantification of uncertainties[M]. Springer: Micro-XRF Studies of Sediment Cores, 2015: 507–534
- [37] Huang J J, Löwemark L, Chang Q, et al. Choosing optimal exposure times for XRF core-scanning: Suggestions based on the analysis of geological reference materials[J]. Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 2016, 17(4): 1558–1566
- [38] Liang L J, Sun Y B, Beets C J, et al. Impacts of grain size sorting and chemical weathering on the geochemistry of Jingyuan loess in the northwestern Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 69: 177–184
- [39] 谢林妤, 白玉洁, 张凤宝, 等. 沙层厚度和粒径组成对覆沙黄土坡面产流产沙的影响[J]. 土壤学报, 2017, 54(1): 60–72
- [40] 庞奖励, 黄春长, 查小春, 等. 商丹盆地黄土母质发育土壤的微形态特征及其诊断意义[J]. 土壤学报, 2015, 52(2): 272–280
- [41] 刘钊, 魏天兴, 朱清科, 等. 黄土丘陵沟壑区典型林地土壤微生物、酶活性和养分特征[J]. 土壤, 2016, 48(4): 705–713
- [42] Liang L J, Sun Y B, Yao Z Q, et al. Evaluation of high-resolution elemental analyses of Chinese loess deposits measured by X-ray fluorescence core scanner[J]. Catena, 2012, 92: 75–82
- [43] Sun Y B, Liang L J, Bloemendal J, et al. High-resolution scanning XRF investigation of Chinese loess and its implications for millennial-scale monsoon variability[J]. Journal of Quaternary Science, 2016, 31(3): 191–202
- [44] Liu L W, Chen J, Chen Y, et al. Variation of Zr/Rb ratios on the Loess Plateau of Central China during the last 130000 years and its implications for winter monsoon[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(15): 1298–1302
- [45] Chen J, Chen Y, Liu L W, et al. Zr/Rb ratio in the Chinese loess sequences and its implication for changes in the East Asian winter monsoon strength[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2006, 70(6): 1471–1482
- [46] Jones A F, Macklin M G, Brewer P A. A geochemical record of flooding on the upper River Severn, UK, during the last 3750 years[J]. Geomorphology, 2012, 179(1): 89–105



## Features and Geochemical Identification Index of Deposition Couplets in Landslide-dammed Reservoirs on Loess Plateau of China

WANG Xiaqing<sup>1,2</sup>, PENG Baofa<sup>1,2</sup>, LI Fuchun<sup>3</sup>, KAN Shang<sup>3</sup>

(1 *College of Resources and Environment and Tourism, College of Hunan Arts and Science, Changde, Hunan 415000, China*; 2 *Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction & Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Changde, Hunan 415000, China*; 3 *College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China*)

**Abstract:** The sediment in the landslide-dammed/check dam reservoirs on the Loess Plateau of China is the direct result of the erosion and retransfer of loess and is characterized by high deposition rate and lots of deposition couplets, thus it is an ideal object to trace erosion flux and understand the processes of the Earth's Critical Zone. How to exactly identify and plot out the couplet is the basis for using the sediment sequence to recover soil erosion and eco-environment change within a small catchment. In this study, Jingbian (paleo) and Heshui landslide-dammed reservoirs in the north of Loess Plateau were choose as the study sites based on field investigation and documents records. Meanwhile, the physical, geochemical and biological characters of the representative couplets were analyzed in order to comprehensively understand the feature of the couplet and further put forwards the effective geochemical identification index. The results showed that the lower coarse-grained layer in the couplet was composed of coarse silts and fine sands, which was characterized by low water content and high luminance, enriched with quartz and zircon, along with high Si and Zr. On the other hand, the upper fine-grained one was characterized by high contents of clays and fine silts, high water content, low luminance and lenticular bedding, correlating well with high contents of calcite, muscovite, illite, chlorite and kaolinite, along with high Al, K, Fe, Rb, Ca, and Sr. Pollen, organic carbon and nitrogen, phospholipid fatty acids, microorganism also concentrated in this layer. Then, Rb/Zr ratios by XRF core scanning are recommended as the ideal geochemical index to identify deposition couplets within the sediment sequence. These results provide the scientific foundation on deeply realizing the processes of erosion and weathering, hydrology and eco-environment change in the Earth's Critical Zone on the Loess Plateau.

**Key words:** Deposition couplet; Rb/Zr ratio; Landslide-dammed/Check dam reservoirs; Earth's Critical Zone; Loess Plateau