

文章编号: 1000-0550(2012)05-0900-09

泾河下游古洪水滞流沉积物地球化学特征研究^①

张玉柱 黄春长 庞奖励 查小春 周亚利 周自翔 王娟 顾洪亮

(陕西师范大学旅游与环境学院 西安 710062)

摘要 通过沿泾河河谷广泛的野外考察,在高陵县杨官寨段发现典型的全新世黄土—土壤剖面。经过详细观测、系统采样和化学元素、粒度成分和磁化率等多指标测定,从剖面鉴别出两组古洪水滞流沉积层(SWD),分别记录了发生在4200~4000 a B. P.和3200~2800 a B. P.期间的特大洪水事件。该研究着重对古洪水滞流沉积层与黄土层和古土壤层的元素地球化学特征进行对比研究。结果表明:(1)在风成沉积物中,Fe₂O₃、Al₂O₃、K₂O、MgO等元素含量在古土壤层高于黄土层,而CaO和Na₂O元素含量则表现出相反的变化。表明风化成壤过程中,这些元素的迁移变化受到全新世以来气候变化和成壤作用的影响。而Zr、Hf、Ti、Cr、Y、Th等微量元素含量与地壳平均丰度相当,且变化甚微。这是由于这些微量元素主要包含在粗颗粒和重矿物之中,其化学性质比较稳定,具有强抗风化性,很少受到风化成壤作用的影响。(2)单个古洪水滞流沉积层,是洪水悬移质泥沙在高水位滞流环境中沉积形成的,分选性很好,故其底部多粗颗粒和重矿物沉积,Zr、Hf、Ti、Cr、Y、Th等微量元素含量呈现突出的尖峰;自下向上随着颗粒逐渐变细,粘粒成分增加,Fe₂O₃、Al₂O₃、K₂O、MgO等元素含量出现高峰。这两类元素由下向上的相互消长关系,与沙级颗粒含量和磁化率值变化规律对应,反映出古洪水滞流沉积层的基本理化特性。这个研究成果对于完善古洪水沉积学和水文学的方法和理论具有重要的科学价值。

关键词 泾河 古洪水 滞流沉积物 化学元素 全新世

第一作者简介 张玉柱 男 1987年出生 博士研究生 土地资源开发与环境演变研究 E-mail: ssdzyz@126.com
中图分类号 P539.6 **文献标识码** A

地球表层系统中各种元素的分布、赋存、迁移和配比规律,除因元素本身理化性质而具有不同特性外,还因其在风化、迁移和沉积过程中受气候环境等变化而产生地球化学行为的差异^[1-2]。因此,可利用沉积物中各种元素的时空分布变化与组合特征,来揭示过去环境变化和环境事件的发生规律^[3-6]。

黄河中游河谷全新世黄土—土壤剖面往往夹有古洪水沉积物。古洪水滞流沉积物(SWD)是由洪水携带的悬移质泥沙在高水位滞流环境当中形成的,是古洪水信息的主要载体。黄土和土壤层都是风成堆积物,是在沙尘暴气流当中悬浮状态下搬运沉积形成的。因此,古洪水滞流沉积物与黄土和古土壤的粒度、磁化率、石英砂表面特征、化学元素的分布、赋存、迁移和配比规律等必然存在区别。目前国内外已有很多学者从粒度、磁化率、石英砂表面特征、碳酸钙及烧失量指标来揭示两者的区别,并从黄土—土壤地层中识别其所夹的古洪水滞流沉积层^[7-23]。而用元素地球化学的方法来揭示黄土—土壤剖面中古洪水滞

流沉积物与风成堆积物区别的研究成果很少。笔者以泾河下游典型的黄土土壤剖面—杨官寨剖面(YGZ)为研究对象,通过元素地球化学方法对古洪水SWD与黄土和古土壤中元素含量变化分布进行对比研究,试图根据沉积物的元素地球化学特征,结合野外沉积学特征观察特性,从全新世黄土—土壤剖面中准确地识别出古洪水滞流沉积层,并深入地揭示其所记录的古洪水事件。

1 研究地点地层和年代

研究地点位于泾河下游北岸高陵县杨官寨段的一级河流阶地上,其北侧紧邻著名的杨官寨仰韶文化聚落遗址(图1)。高陵县属暖温带半湿润大陆性季风气候。年平均气温13.2℃,历年最高气温41.4℃,最低温度-20.8℃,年平均降水量540 mm左右。泾河下游北岸高陵县杨官寨段的一级河流阶地,上部为晚更新世晚期黄土和全新世黄土—土壤覆盖,地面平坦开阔,海拔375~380 m,其前沿高出泾河平水位

^①国家自然科学基金重点项目(批准号:41030637) 教育部博士点基金优先发展领域项目(编号:20110202130002),中央高校基本科研业务费专项基金(编号:GK201101002)的资助。
收稿日期:2011-09-08;收修稿日期:2011-12-21

15 ~ 18 m。泾河在该段为河谷狭窄,平水位河宽 100 ~ 120 m,两岸均为陡崖,剖面地层完整,层次清晰。底部为具有二元结构特征的河流阶地沉积层,上部覆盖层为马兰黄土上部和完整的全新世黄土—土壤层系,层次清楚,未经人为扰动,其土壤学和沉积学特征明显(图 2)。通过详细观测,从其中鉴别出两组古洪水滞流沉积层。

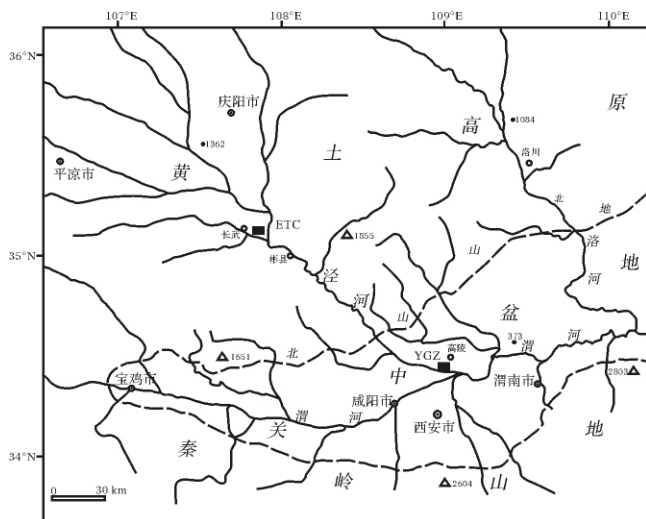


图 1 泾河河谷杨官寨剖面(YGZ)地理位置示意图
Fig. 1 Map showing the location of the YGZ site in the Jinghe River valley



图 2 含有古洪水滞流沉积层的杨官寨全新世黄土—土壤剖面图

Fig. 2 Holocene loess-soil profiles containing palaeoflood SWD on the roadcuts at Yangguanzhai site

根据野外观察剖面颜色、结构、构造、孔隙等宏观沉积学特征^[7]结合室内实验分析结果,将剖面划分

为:(1) 45 ~ 0 cm,现代表土层(MS), 浊棕色,粉沙质地,团粒结构,含有大量蚯蚓孔和粪粒,多根系,属典型耕作土壤;(2) 80 ~ 45 cm,近代黄土层(L₀), 浊黄橙色,粉沙质地,块状—团块状结构;(3) 102 ~ 80 cm,古洪水滞流沉积层组(SWD2), 浊橙色,细沙质粉沙,厚度 20 ~ 35 cm,可细分为 1 ~ 3 层;(4) 120 ~ 102 cm,全新世中期古土壤层上部(S_{0上}), 浊棕色,粉沙质地,团块—团粒结构,厚度 20 ~ 35 cm;(5) 140 ~ 120 cm,古洪水滞流沉积层组(SWD1-5), 浊黄橙色,细沙质粉沙质地,属典型的古洪水滞流沉积物;(6) 155 ~ 140 cm,古洪水滞流沉积层(SWD1-4), 浊黄橙色,细沙质粉沙质地,顶部有成壤改造现象;(7) 170 ~ 155 cm,古洪水滞流沉积层(SWD1-3), 浊黄橙色,细沙质粉沙质地;(8) 205 ~ 170 cm,古洪水滞流沉积层(SWD1-2), 浊黄橙色,细沙质粉沙质地,顶部有成壤改造现象;(9) 230 ~ 205 cm,古洪水滞流沉积层(SWD1-1), 浊黄橙色,细沙质粉沙质地;(10) 300 ~ 230 cm,全新世古土壤层下部(S_{0下}), 浊棕色,粘土质粉沙质地,团粒—团块结构,含有大量蚯蚓孔和粪粒。其中在 265 ~ 245 cm 有史前耕作扰动现象,并且含有木炭屑和陶屑等,对应于北侧杨官寨仰韶文化遗址(6 000 ~ 5 000 a B. P.)的文化层;(11) 330 ~ 300 cm,过渡性黄土层(L₁), 浊黄橙色,粉沙质地,显示弱成壤特征;(12) 330 cm 以下,马兰黄土(L₁), 浊黄橙色,粉沙质地,均质块状结构,疏松多孔隙,为马兰黄土上部。

2 研究方法

野外考察当中,在对剖面做详细地观察和地层划分的基础上,以每 2 cm 厚度高密度系统采样,共采集到 180 个样品。在实验室内,对样品进行了磁化率、粒度成分和化学元素成分的分析测试。具体方法如下:磁化率采用英国 Bartington 公司生产的 MS-2B 型磁化率仪测量,取研磨后的风干样品 10 g,将样品放入小塑料盒中,分别对每个样品进行高频和低频测量 3 次,取平均值,并以质量磁化率 m³ · kg⁻¹ 表达。粒度分析是取约 1 g(精度为 0.000 1 g)的风干土样,先后加入 10% 的 H₂O₂ 和 10% 的 HCl 除去有机质和钙质胶结物,经过加水清洗,静置 72 h 后加入适量(Na-PO₃)₆使颗粒充分分散,用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer—S 型激光粒度仪测量,测量精度为 1%。对于粒径 > 0.1 mm 的沙级颗粒,用筛分法测定,并用实体显微镜鉴定其成分。样品化学元素分析采用

荷兰 Panalytical 公司生产的 PW2403 型 X-Ray 荧光光谱仪。在测量过程中,为了保证数据质量,加入国家标准土壤参比物质样品,保证测定误差小于 5%。

(OSL) 光释光断代的方法: 在暗室中, 去掉不锈钢管两端 2 cm 厚的曝光部分, 用于测含水量和 U, Th, K 等放射性元素的含量。U, Th, K 含量采用中子活化法测定。采用实验室测得含水率加 10% ~ 15% 作为样品在地质历史时期的平均含水率。 α 效率系数取 0.035 ± 0.003 ^[24]。钢管内部未曝光的样品用 10% 的盐酸、30% 的 H_2O_2 分别去除碳酸盐和有机质, 再用超声波振荡仪将洗至中性的样品加入六偏磷酸钠振荡 10 min 使其充分分散, 分别用沉降法和筛分法分离出 4 ~ 11 μm 的细颗粒和对 $>40 \mu m$ 的较粗颗粒的分级。对于大于 40 μm 粒径的样品, 在室温下先用 37% 的氟硅酸溶液溶蚀一个周^[25], 再用 HF 溶蚀 40 min^[26], 然后加入 10% 的盐酸浸泡 45 min^[27] 以除去反应产生的氟化物沉淀。最后用清水洗至中性, 再用标准筛过筛得到 40 ~ 63 μm 的纯净石英颗粒。在直径 9.7 mm 的不锈钢片上涂抹少许硅胶, 将 40 ~ 63 μm 的样品单层平铺在其上面, 以备测试。石英的提纯情况用 110 $^\circ C$ 峰值和红外释光 (IRSL) 进行检测。所有样片均在 Ris ϕ TL/OSL DA-15 型自动化释光仪上进行实验测定。蓝光激发光源波长为 (470 \pm 30) nm, 红外激发光源波长为 (880 \pm 80) nm, 测量释光信号时的激发温度为 125 $^\circ C$ 。释光信号通过前端置有 3 mm 厚的 Hoya U-340 滤光片的 9523QB15 光电倍增管进行放大^[28]。人工 β 辐射源为 $^{90}Sr/^{90}Y$ 源, 照射剂量率约为 0.10475 Gy/s, 活度 1.48 Gq。通过 110 $^\circ C$ 峰值和 IR(红外) 检测发现, 40 ~ 63 μm 粒径样品的长石含量达到忽略不计的水平^[29], 因此, 用改进 SAR 法测定其等效剂量值 (De)^[30]。

3 实验结果分析与讨论

3.1 古洪水事件年代的确定

泾河下游高陵杨官寨剖面 (YGZ) 全新世地层完整清晰, 其基本的黄土—土壤层序列, 与泾河流域长武县黄土高原 ETC 剖面^[31] 和泾河中游 CJC 剖面^[7, 18] 全新世黄土—土壤层结构相对应。结合 OSL 测年结果, 即 72.5 cm 为 (2960 \pm 80) a, 122.5 cm 为 (4010 \pm 240) a, 237.5 cm 为 (4300 \pm 160) a, 287.5 cm 为 (7390 \pm 370) a。通过地层学对比, 可以确定 YGZ 剖面的基本年代框架。而杨官寨新石器时代文化遗

址的文化遗物 (6 000 ~ 5 000 a B. P.) 在剖面 245 ~ 265 cm 的出现, 则更进一步证明这个年代序列是准确可靠的。马兰黄土顶部 (330 cm) 确定为全新世起点, 年代为 11 500 a B. P.; 330 ~ 300 cm 成壤作用渐渐增强, 这一时期是全新世早期逐渐升温期 (11 500 ~ 8 500 a B. P.); 300 cm 开始出现了强烈的成壤作用过程, 发育了全新世褐色土, 这一时期称为全新世大暖期 (8 500 ~ 3 100 a B. P.), 夹在古土壤 S_0 中上部的第 1 期古洪水事件 (SWD1), 包含 5 层古洪水沉积物, 其层位与泾河中游 CJC 剖面所记录的古洪水事件完全相同, 发生的年代在 4 200 ~ 4 000 a B. P. 期间^[7, 18]。同时, 它们也与漆水河流域 HXZ 剖面在客省庄文化时期 (4 200 ~ 4 000 a B. P.) 的特大古洪水事件年代相同^[8 ~ 10]。这一期古洪水事件对应世界各地环境变化记录当中在 4 200 ~ 4 000 a B. P. 发生的一次全球性的气候突变事件^[32 ~ 35]。古土壤 S_0 与现代风成黄土层 L_0 之间地层分界年代为 3 100 a B. P., 夹在两者之间的古洪水 SWD2 记录了第二期古洪水事件, 结合地层对比和光释光 (OSL) 测年数据, 确定该期古洪水事件发生的年代在 3 200 ~ 2 800 a B. P. 之间, 它与漆水河 HXZ 剖面^[8 ~ 10]、渭河宝鸡峡 GCZ 剖面^[21, 22] 和渭河天水段峡谷 DJP 剖面^[23] 记录到古洪水事件层位相同, 故其发生时代也完全对应。剖面从 80 cm 深度向上, 成壤作用明显减弱, 气候恶化, 风尘堆积作用形成近代黄土 L_0 , 从 45 cm 以上至地表为现代耕作层, 是在最近 1 500 年来风尘堆积物的基础上形成。

3.2 常量元素含量变化

第四纪地层和沉积物中常量元素及其含量变化具有特定的古环境意义。因此, 常量元素含量的变化对于鉴别古气候古水文事件是很好的代用指标^[36, 37]。

在泾河下游 YGZ 剖面, 我们选取 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 CaO 和 Na_2O 这 6 个常量元素来进行分析 (图 3)。总体看来, 整个剖面它们的变异系数很小, 分别为 0.093、0.053、0.052、0.047、0.067 和 0.106。这说明剖面中的常量元素组成具有高度均一性。如图 2 所示, Fe_2O_3 的含量介于 32.9 ~ 52.8 $g \cdot kg^{-1}$ 之间, Al_2O_3 的含量介于 102.8 ~ 129.3 $g \cdot kg^{-1}$ 之间, K_2O 的含量介于 18.9 ~ 25.1 $g \cdot kg^{-1}$ 之间, MgO 的含量介于 22.9 ~ 28.9 $g \cdot kg^{-1}$ 之间。 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 元素含量在古土壤层 S_0 当中呈现较高值, 在黄土层位 (L_1 、 L_1 、 L_0) 含量值都较低, 而在古洪水

SWD 中, 它们的含量变化波动性比较大, 并且与粘粒成分 ($<0.005\text{ mm}$) 含量变化趋势一致。在每个单层 SWD 的顶部出现峰值。在剖面中, Fe_2O_3 的含量与磁化率值和粘粒含量成显著正相关, 相关系数分别为 0.752 和 0.899。 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 元素含量在古土壤层 S_0 上下部呈现较高值, 并且变化趋势一致(图 3、图 4a-c), 这主要是由于全新世中期大暖期气候温湿, 降水较多, 风化成壤作用和次生粘化作用强烈, 淋溶作用旺盛, CaO 、 Na_2O 等易溶碳酸盐类淋失, 从而使它们相对富集。在剖面中这些元素含量与粘粒含量密切相关, 可见古土壤层 S_0 中次生粘土矿物含量的增加, 也是造成这些元素富集的重要因素。在全新世中期古土壤层 S_{0T} 265 ~ 245 cm 处, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 元素含量显著降低, 而该层位又发现了木炭屑和陶屑等人类活动的遗物, 表明人类活动对风化成壤作用产生了影响。这可能是杨官寨仰韶文化 (6000 ~ 5000 a B. P.) 时期人类聚落建设和旱作农业耕作活动造成的结果。在各个黄土层位这些元素含量都呈现低值, 显然是由于黄土堆积时期气候干旱, 降水量减少, 蒸发量增大, 矿物的次生风化作用减弱, CaO 、 Na_2O 等碳酸盐类的淋溶作用减弱, 土壤的碱性增强。在现代黄土层 MS 中, Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 元素含量变化显著, 主要是由于最近 1500 年来气候相对变暖, 加之人类的耕作活动, 促进了风化成壤作用, 使土壤中的可溶盐淋失, 次生粘土矿物增加。在每个古洪水 SWD 中, 这些元素含量从下向上逐渐增高, 在顶部出现峰值。这是因为古洪水 SWD 都是

河流悬移质泥沙在高水位滞流环境中形成的沉积物, 其缓慢沉积, 分选良好, 底部多细沙, 中部为粉沙, 顶部多粘土成分, 甚至出现所谓粘土盖层^[7, 38]。

图 3 所示, 在 YGZ 剖面中 CaO 和 Na_2O 元素的含量分别介于 $61.3 \sim 92.5\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $13.0 \sim 21.4\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。 CaO 和 Na_2O 元素含量变化曲线与粘粒、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 含量变化曲线呈现镜像关系。在古土壤层 S_0 中含量低, 在黄土层含量较高。尤其是 Na_2O 与 Fe_2O_3 含量变化在剖面中分布呈显著负相关, 相关系数为 -0.883 (图 3、图 4d)。而且 Na_2O 与 Al_2O_3 元素的关系也是如此。它们的含量在古土壤层 S_0 上下部呈现较低值, 黄土层位含量值则都较高。这主要与黄土和土壤层在风化成壤过程当中长石的蚀变作用和所产生次生粘土矿物种类有关^[39, 40]。长石特别是斜长石富含 Na, 钾长石、伊利石和云母富含 K, 而斜长石的风化速率远大于钾长石。全新世中期大暖期古土壤层 S_0 形成时期, 气候温暖湿润, 降水比较多, 长石类矿物风化分解, CaO 和 Na_2O 等易溶碳酸盐类淋失。在黄土堆积时期由于气候较干旱, 降水减少, 长石类矿物风化微弱, CaO 和 Na_2O 等易溶碳酸盐类淋溶作用减弱。古洪水 SWD 是暴雨洪水从流域侵蚀搬运而来的新鲜沉积物, 尚未受到风化成壤作用的影响, 其中的元素尚未发生显著地分异, 因而 CaO 和 Na_2O 等易溶碳酸盐类含量仍然较高。但是因为暴雨古洪水事件, 可能发生在不同的支流流域, 其搬运来的泥沙性质会有所不同, 故而有的 SWD 层 CaO 的含量较低。

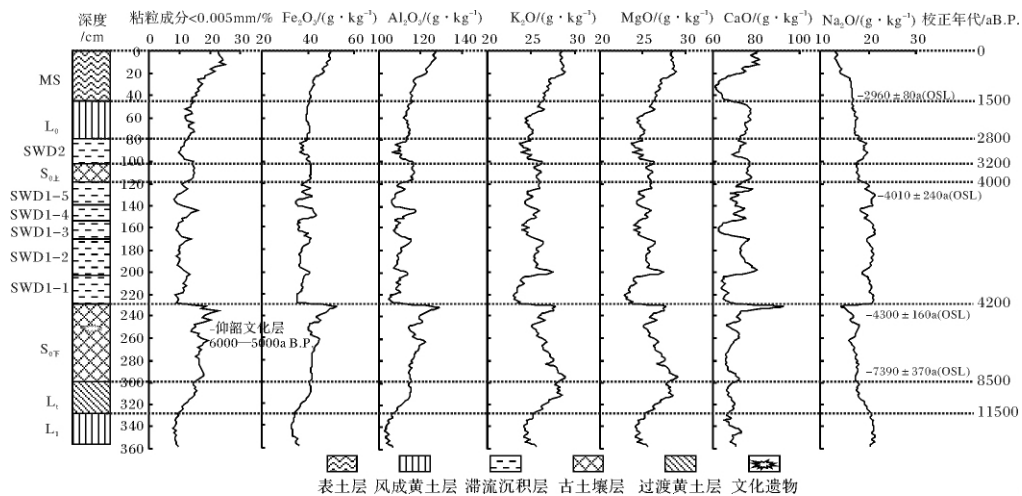


图 3 泾河杨官寨全新世剖面 (YGZ) 粘粒成分、 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 CaO 和 Na_2O 含量变化曲线图

Fig. 3 Curves of clay, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , K_2O , MgO , CaO and Na_2O in the YGZ profile in the Jinghe River valley

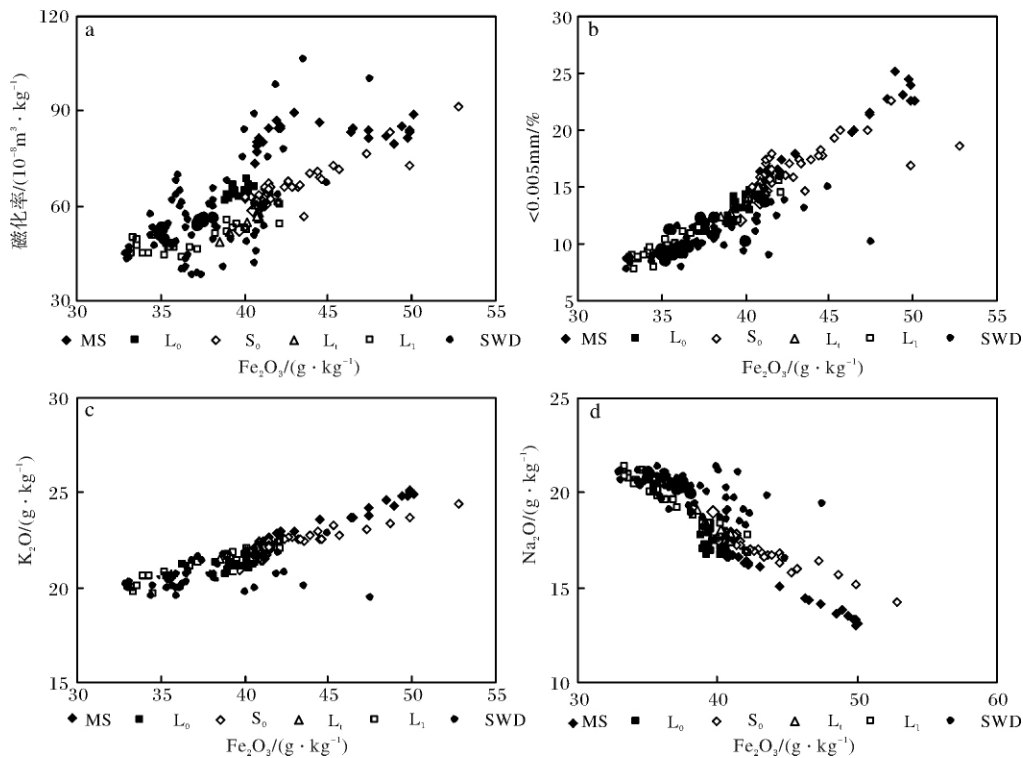


图4 泾河杨官寨全新世剖面(YGZ)的(a)磁化率和 Fe_2O_3 (b)粘粒成分和 Fe_2O_3 , (c) K_2O 和 Fe_2O_3 (d) Na_2O 和 Fe_2O_3 关系散点图

Fig. 4 Biplots showing the relationships between (a) magnetic susceptibility and Fe_2O_3 (b) clay and Fe_2O_3 (c) K_2O and Fe_2O_3 (d) Na_2O and Fe_2O_3 in the YGZ profile in the Jinghe River valley

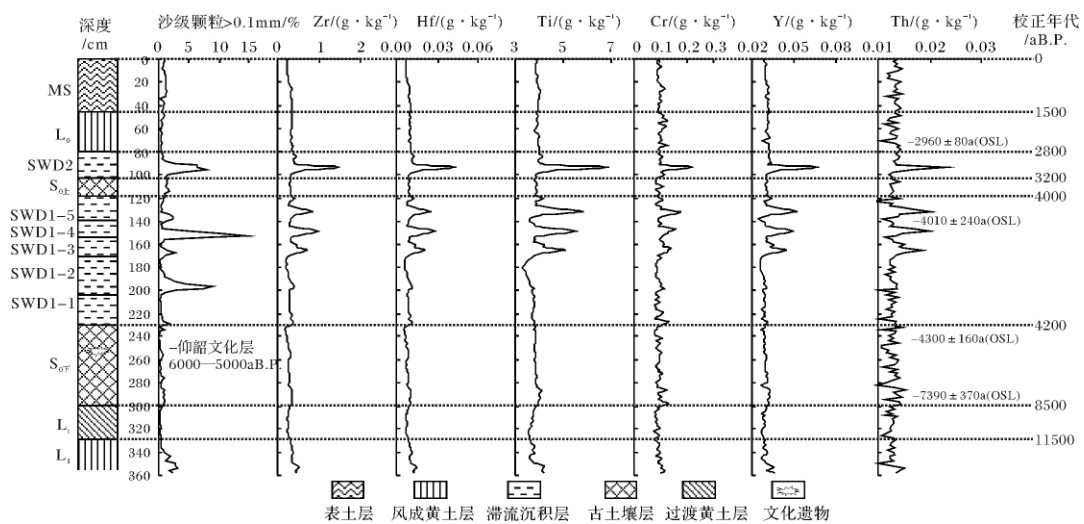


图5 泾河杨官寨全新世剖面(YGZ)沙级颗粒含量、Zr、Hf、Ti、Cr、Y和Th含量变化曲线图

Fig. 5 Curves of sand-sized particles, Zr, Hf, Ti, Cr, Y and Th in the YGZ profile in the Jinghe River valley

3.3 微量元素含量变化

在泾河下游 YGZ 剖面选取 Zr、Hf、Ti、Cr、Y 和 Th 这 6 个微量元素来进行深入分析(图 5)。总体来看,剖面中它们的变异系数分别为 0.398、0.398、0.095、0.167、0.141、0.118,变异系数也较小。在剖面中的

黄土和古土壤层内,它们的含量变化很小,与黄土高原黄土和地壳平均丰度相当^[31]。但是它们在全新世古洪水 SWD 含量急剧变化,通常表现为在单个 SWD 层的底部出现异常尖锐的峰值,向中上部则急速降低。

如图5所示,Zr和Hf是稀有元素,在黄土中它们主要赋存于锆石、辉石、角闪石和磁铁矿等矿物中^[41,42]。在YGZ剖面中Zr元素含量介于 $0.178 \sim 1.528 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,Hf元素含量介于 $0.005 \sim 0.044 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。Ti和Cr属于铁族元素,在风化物 and 土壤中,钛元素多以非晶质或细晶质的二氧化钛(TiO_2)金红石存在,而且这些含钛矿物都具有较高的抗风化性。Ti不易遭受淋滤,因而黄土中Ti的含量比许多微量元素都高。含铬矿物和含钛矿物一样都具有较高的抗风化性^[34,35]。剖面中Ti元素含量介于 $3.640 \sim 4.476 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,Cr元素含量介于 $0.090 \sim 0.223 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。Y是稀土元素^[41],在黄土的弱碱性环境中,稀土元素以溶解状态进行迁移的能力非常有限,在风化过程中稀土元素多以其矿物碎屑残留在土壤沉积物中^[43]。剖面中Y元素含量介于 $0.026 \sim 0.068 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。Th是天然放射性元素,在黄土中没有发现独立的钍矿物,它们是以类质同象或杂质元素的形式存在于黄土中的磷灰石、锆石等矿物中^[41,42]。剖面中Th元素含量介于 $0.011 \sim 0.023 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间。

在泾河下游YGZ剖面中Zr、Hf、Ti、Cr、Y和Th微量元素在黄土和古土壤层含量变化差异很小,这主要是由于这些微量元素化学性质比较稳定,具有强抗风化性,在风化成壤过程中很少受到影响^[41,42]。但是这些微量元素含量变化曲线在单个古洪水SWD的底部都呈现出突出的尖峰,并且与 $>0.1 \text{ mm}$ 沙级颗粒含量变化趋势完全一致。这有力地证明这些元素与粗颗粒和重矿物密切相关。这是因为古洪水SWD都是河流悬移质泥沙在高水位滞流环境中形成的沉积物,其缓慢沉积的过程当中,分选良好。这样就单个古洪水SWD来说,其底部为粗颗粒和重矿物颗粒沉积,含有较多像Zr、Hf等重矿物元素成分。向上颗粒逐渐变细,粘粒有所增加,上部含有较多粘土矿物元素成分,故 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 等常量元素含量在单个SWD顶部出现高值。所以说在单个古洪水滞流沉积层内,这两类元素由下向上呈现出相互消长关系,清晰地表现出沉积过程当中的分选作用。这是与风成黄土和古土壤最重要的区别。因此,根据沉积物的地球化学特征,结合野外考察获得的沉积学宏观特征,就可以从全新世黄土古土壤地层当中准确地识别出古洪水的沉积夹层。

4 结论

在全新世古洪水沉积学与水文学研究当中,正确

鉴别古洪水滞流沉积层是很关键的第一步。我们在泾河下游杨官寨地点的第一级河流阶地的黄土盖层当中,通过详细地野外观察研究、地层划分和系统采样,并且进行了以OSL测年和地层对比为基础的断代和一系列的实验测试,获得了大量的基础性数据。本文重点研究了YGZ剖面中常量元素(Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 、 CaO 、 Na_2O)和微量元素(Zr、Hf、Ti、Cr、Y、Th)的含量变化分布规律研究,得出以下结论。

(1) 黄土和土壤层的常量元素(Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO)含量变化呈现出很好的规律性,并且与磁化率值、粘粒含量变化曲线密切相关。这是因为在全新世风化成壤演变过程当中,可溶性盐类 CaO 、 Na_2O 成分淋失,造成了 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 等常量元素的相对富集。尤其是在全新世中期大暖期强烈风化成壤过程当中,这种淋失与富集表现的很突出。这也说明这些常量元素含量指标与磁化率和粒度成分指标能够有效地揭示全新世以来的气候变化和成壤环境的变化。在全新世黄土和古土壤层中的微量元素(Zr、Hf、Ti、Cr、Y、Th)含量变化甚微,且大都与地壳平均丰度相当。这是因为微量元素主要存在于重矿物当中,他们在全新世沙尘暴搬运和沉积过程当中充分混合,且因其化学性质比较稳定,在风化成壤过程中受影响不太。

(2) 古洪水SWD中的常量元素(Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO)和微量元素(Zr、Hf、Ti、Cr、Y、Th)含量变化甚大,互为消长,对比分明,表现出显著地规律性。在单个古洪水SWD层中,自下而上,常量元素逐渐增加,而微量元素含量急剧减少。这是因为古洪水SWD是河流洪水悬移质泥沙在高水位滞流环境中形成的沉积物,沉积过程缓慢,沉积分选良好。就单个古洪水SWD层来说,其底部多含粗颗粒和重矿物沉积,含有较多像Zr、Hf、Ti、Cr等重矿物元素成分。向上颗粒逐渐变细,粘粒有所增加,故上部含有较多粘土矿物元素成分,因而 Fe_2O_3 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 MgO 等与粘土相关元素含量出现高值。这说明在古洪水SWD中这些常量元素和微量元素含量变化规律与古洪水SWD的粒度效应相关。这正是古洪水SWD区别于黄土和土壤层最显著的地球化学特征。因此,根据沉积物的地球化学特征,结合野外考察获得的沉积学宏观特征,就可以从全新世黄土古土壤地层当中准确地识别出古洪水的沉积夹层。

(3) 通过野外考察观测,多指标分析测试,尤其是元素地球化学指标与磁化率和粒度指标结合,鉴别

出 YGZ 剖面存在两组古洪水滞流沉积层。它们记录了全新世时期泾河流域实际发生过的两期多次特大古洪水事件。其中全新世中期的古土壤层 S_0 中上部所夹的第一组 5 层古洪水 SWD 记录的第一期 5 次特大洪水事件,发生在 4 200 ~ 4 000 a B. P.。它们与泾河中游彬县 CJC 剖面 and 关中盆地漆水河 HXZ 剖面的记录的古洪水事件都发生在全球性气候突变事件之中。古土壤层 $S_{0上}$ 与近代黄土 L_0 界限鉴别出第二组古洪水滞流沉积层。它们记录到的第二期多次古洪水事件,发生年代为 3 200 ~ 2 800 a B. P.。这一期古洪水事件与关中盆地漆水河 HXZ 剖面、渭河宝鸡峡 GCZ 剖面 and 渭河天水段峡谷 DJP 剖面^[23] 在 3 200 ~ 3 000 a B. P. 发生的古洪水事件完全对应,发生在全新世大暖期结束之际的环境恶化过程之中。

本研究成果着重研究了古洪水滞流沉积物区别于黄土土壤的地球化学特征,用元素地球化学方法从全新世黄土土壤地层中准确地识别出古洪水滞流沉积层,并深入地揭示其所记录的古洪水事件,这对于完善古洪水沉积学和水文学的方法和理论具有重要的科学价值。

参考文献 (References)

- 刘英俊,王鹤年,曹励明,等. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社,1984: 1-220 [Liu Yingjun, Wang Henian, Cao Liming, *et al.* Geochemical Characteristics of Elements [M]. Beijing: Science Press, 1984: 1-220]
- 邓宏文,钱凯. 沉积地球化学与环境分析[M]. 兰州: 甘肃科学技术出版社,1993: 1-154 [Deng Hongwen, Qian Kai. Sedimentary Geochemistry and Environmental Analysis [M]. Lanzhou: Gansu Science and Technology Press, 1993: 1-154]
- 刁桂仪,文启忠. 黄土风化成土过程中主要元素迁移序列[J]. 地质地球化学,1999,27(1): 21-26 [Diao Guiyi, Wen Qizhong. The migration series of major elements during loess pedogenesis [J]. Geology-Geochemistry, 1999, 27(1): 21-26]
- 刁桂仪,文启忠,吴明清,等. 黄河中游马兰黄土中若干微量元素的平均含量及相关性研究[J]. 海洋地质与第四纪地质,1996,16(2): 85-92 [Diao Guiyi, Wen Qizhong, Wu Mingqing, *et al.* Study on the average contents and correlativity of trace elements in Malan Loess from the middle reaches of the Yellow River [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1996, 16(2): 85-92]
- Gallego T D, Martinez R F, Paytan A, *et al.* Pliocene Holocene evolution of depositional conditions in the eastern Mediterranean: Role of anoxia. productivity at time of sapropel deposition [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 246(2-4): 424-439
- Michela A, Philip A Meyers. Trace element indicators of increased primary production and decreased water-column ventilation during deposition of latest Pliocene sapropels at five locations across the Mediterranean Sea [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2007, 249(3-4): 425-443
- Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, *et al.* Extraordinary floods of 4100-4000aB. P. recorded at the late Neolithic Ruins in the Jinghe river gorges, middle reach of the Yellow river, China [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2010, 289: 1-9
- Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zha Xiaochun, *et al.* Extraordinary floods related to the climatic event at 4200aB. P. on the Qishuihe River, middle reaches of the Yellow River, China [J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30: 460-468
- Zha Xiaochun, Huang Chunchang, Pang Jiangli. Palaeofloods recorded by slackwater deposits on the Qishuihe River in the middle reaches of the Yellow River [J]. Journal of Chinese Geography, 2009, 19(6): 681-690
- 查小春,黄春长,庞奖励. 关中西部漆水河全新世特大洪水与环境演变[J]. 地理学报,2007,62(3): 292-300 [Zha Xiaochun, Huang Chunchang, Pang Jiangli. Holocene extreme floods and environmental change of Qishuihe River in Western Guanzhong Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(3): 292-300]
- Yang Dayuan, Yu Ge, Xie Yuebo, *et al.* Sedimentary records of large Holocene floods from the middle reaches of the Yellow River, China [J]. Geomorphology, 2000, 33: 73-88
- 潘凤英,袁丁. 兴化市乌金荡湖相沉积层中鉴别洪水沉积标志的研究[J]. 南京师大学报:自然科学版,1996,19(3): 78-84 [Pan Fengying, Yuan Ding. Floodwater depositional marks of lake facies deposit in Wujindan Lake within Xinghua city [J]. Journal of Nanjing Normal University: Natural Science, 1996, 19(3): 78-84]
- 谢悦波,杨达源. 古洪水平流沉积基本特征[J]. 河海大学学报,1998,26(6): 5-10 [Xie Yuebo, Yang Dayuan. Basic characteristics of paleoflood slackwater deposits [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 1998, 26(6): 5-10]
- 谢悦波,王文辉,王平. 古洪水平流沉积粒度特征[J]. 水文,2000,20(4): 18-20 [Xie Yuebo, Wang Wenhui, Wang Ping. Characteristics of grain size for palaeoflood slackwater deposits [J]. Journal of China Hydrology, 2000, 20(4): 18-20]
- 朱诚,于世永,史威,等. 南京江北地区全新世沉积与古洪水研究[J]. 地理研究,1997,16(4): 23-30 [Zhu Cheng, Yu Shiyong, Shi Wei, *et al.* Holocene deposits and Paleo-floods on the north bank of the Yangtze River, Nanjing area [J]. Geographical Research, 1997, 16(4): 23-30]
- 杨晓燕,夏正楷,崔之久. 黄河上游全新世特大洪水及其沉积特征[J]. 第四纪研究,2005,25(1): 80-85 [Yang Xiaoyan, Xia Zhengkai, Cui Zhijiu. Holocene extreme floods and its sedimentary characteristic in the upper reaches of the Huanghe River valley [J]. Quaternary Sciences, 2005, 25(1): 80-85]
- 孙素梅,黄春长,庞奖励,等. 黄土地区河谷古洪水平流沉积物特征研究[J]. 土壤通报,2009,40(1): 72-76 [Sun Sumei, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* The study on characteristics of slackwater deposits of palaeoflood sedimentary in the loess regions [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2009, 40(1): 72-76]
- 李瑜琴,黄春长,查小春,等. 泾河中游龙山文化晚期特大洪水

- 水文学研究[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 541-552 [Li Yuqin, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Palaeoflood occurred in the late period of the Longshan Culture in the middle reaches of the Jinghe River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 541-552]
- 19 李晓刚, 黄春长, 庞奖励, 等. 关中西部漳水全新世古洪水水平流沉积地层研究[J]. 地层学杂志, 2009, 33(2): 198-205 [Li Xiaogang, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Stratigraphy of Holocene palaeoflood slackwater deposits in the Weishui River valley of the Western Guanzhong Basin [J]. *Journal of Stratigraphy*, 2009, 33(2): 198-205]
- 20 李晓刚, 黄春长, 庞奖励, 等. 黄河壶口段全新世古洪水事件及其水文学研究[J]. 地理学报, 2010, 65(11): 1371-1380 [Li Xiaogang, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Hydrological studies of the Holocene Palaeoflood in the Hukou Reach of the Yellow River [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(11): 1371-1380]
- 21 万红莲, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河宝鸡峡全新世特大洪水水文学研究[J]. 第四纪研究, 2010, 30(2): 430-440 [Wan Honglian, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Hydrological studies of the Holocene extreme flood in the Baojixia Gorges of the Weihe River [J]. *Quaternary Sciences*, 2010, 30(2): 430-440]
- 22 万红莲, 黄春长, 查小春, 等. 渭河宝鸡峡全新世古洪水事件研究[J]. 陕西师范大学学报, 2010, 38(2): 77-80 [Wan Honglian, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Palaeoflood events in the Baojixia Gorges of the Weihe River [J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science*, 2010, 38(2): 77-80]
- 23 朱向锋, 黄春长, 庞奖励, 等. 渭河天水峡谷全新世特大洪水水文学研究[J]. 地理科学进展, 2010, 29(7): 840-846 [Zhu Xiangfeng, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.* Palaeo-Hydrological studies of the Holocene extreme floods in the Tianshui Gorges of the Weihe River [J]. *Progress in Geography*, 2010, 29(7): 840-846]
- 24 Lai Zhongping. Chronology and the upper dating limit for loess samples from Luochuan section in the Chinese Loess Plateau using quartz OSL SAR protocol[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2010, 37: 176-185
- 25 Armitage S J, Bailey R M. The measured dependence of laboratory beta dose rates on sample grain size [J]. *Radiation Measurements*, 2005, 39: 123-127
- 26 Buylaert J P, Murray A S, Vandenberghe D, *et al.* Optical dating of Chinese loess using sand-sized quartz: Establishing a time frame for Late Pleistocene climate changes in the western part of the Chinese Loess Plateau [J]. *Quaternary Geochronology*, 2008, 3: 99-113
- 27 Roberts H M. Assessing the effectiveness of the double-SAR protocol in isolating a luminescence signal dominated by quartz [J]. *Radiation Measurements*, 2007, 42: 1627-1636
- 28 Btter-Jensen L, Banerjee D, Duller, *et al.* Blue light emitting diodes for optical stimulation of quartz in retrospective dosimetry and dating [J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 1999, 84: 335-340
- 29 Duller G A T. Distinguishing quartz and feldspar in single grain luminescence measurements [J]. *Radiation Measurements*, 2003, 37: 161-165
- 30 Murray A S, Wintle A G. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol [J]. *Radiation Measurements*, 2000, 32: 57-73
- 31 Huang Chunchang, Pang Jiangli, Su Hongxia, *et al.* The Ustic Isohumisol (Chernozem) distributed over the Chinese Loess Plateau: Modern soil or palaeosol? [J]. *Geoderma*, 2009, 150: 344-358
- 32 Knox J C. Sensitivity of modern and Holocene floods to climate change [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19: 439-457
- 33 Mayewski P A, Rohling E E, Curt Stager J, *et al.* Holocene climate variability [J]. *Quaternary Research*, 2004, 62: 243-255
- 34 Porter S C, Zhou W J. Synchronism of Holocene East Asian monsoon variations and North Atlantic drift-ice tracers [J]. *Quaternary Research*, 2006, 65: 443-449
- 35 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件 [J]. 中国科学: B 辑, 1992, 22: 1300-1308 [Shi Yafeng, Kong Zhaocheng, Wang Sumin, *et al.* Fluctuation and important events in the mid-Holocene Optimum in China [J]. *Science in China: Series B*, 1992, 22: 1300-1308]
- 36 高尚玉, 董光荣, 李保生, 等. 萨拉乌苏河第四纪地层中化学元素的迁移和聚集与古气候的关系 [J]. 地球化学, 1985, 3: 269-276 [Gao Shangyu, Dong Guangrong, Li Baosheng, *et al.* Migration and accumulation of chemical elements in the Quaternary strata of the Salawusu River Area in relation to climatic evolution [J]. *Geochimica*, 1985, 3: 269-276]
- 37 李铮华, 王玉海. 黄土沉积的地球化学记录与古气候演化 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 41-47 [Li Zhenghua, Wang Yuhai. The geochemical record of loess deposit and paleoclimatic evolution [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(2): 41-47]
- 38 任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1981: 77-100 [Ren Mingda, Wang Nailiang. *Generality of Modern Sedimentation Environment* [M]. Beijing: Science Press, 1981: 77-100]
- 39 Gallet S, Jahn B M, Torii M. Geochemical characterization of the Luochuan loess-palaeosol sequence, China and palaeoclimatic implications [J]. *Chemical Geology*, 1996, 133: 67-88
- 40 李徐生, 韩志勇, 杨守业, 等. 镇江下蜀土剖面的化学风化强度与元素迁移特征 [J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1174-1184 [Li Xusheng, Han Zhiyong, Yang Shouye, *et al.* Chemical weathering intensity and element migration features of the Xiashu loess profile in Zhenjiang [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(11): 1174-1184]
- 41 马舒原, 张虎林. 109 种化学元素浅释 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1988: 61-220 [Ma Shuyuan, Zhang Hulin. *Explanation of 109 Chemical Elements* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988: 61-220]
- 42 文启忠. 中国黄土地球化学 [M]. 北京: 科学出版社, 1989: 64-120 [Wen Qizhong. *Geochemistry of Chinese Loess* [M]. Beijing: Science Press, 1989: 64-120]
- 43 米小建, 黄春长, 庞奖励, 等. 宁夏长城塬全新世黄土土壤剖面微量元素动态与成壤变化 [J]. 陕西师范大学学报, 2010, 38

(3): 85-90 [Mi Xiaojian, Huang Chunchang, Pang Jiangli, *et al.*
Trace elements and pedogenic changes in the Holocene Loess soil on

the Changchengyuan Loess tableland in Ningxia [J]. Journal of
Shaanxi Normal University: Natural Science, 2010, 38(3): 85-90]

Geochemical Characteristics of the Holocene Flood Slackwater Deposits in the Lower Reaches of the Jinghe River

ZHANG Yu-zhu HUANG Chun-chang PANG Jiang-li ZHA Xiao-chun
ZHOU Ya-li ZHOU Zi-xiang WANG Juan GU Hong-liang

(College of Tourism and Environmental Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062)

Abstract: Through widespread field survey along the Jinghe River valley, a Holocene loess-soil profile with interbedded flood slackwater deposits (SWD) was found at the YGZ site at the riverbank near the Yangguanzhai village. Samples were collected systematically and the chemical elements, grain-size distribution and magnetic susceptibility were measured in the laboratory. All of these indexes showed that there are two bedsets of palaeoflood slackwater deposits in the profile. They have recorded the extraordinary palaeoflood events occurred during 4200–4000aB. P. and 3200–2800aB. P., respectively. The comparative study of the geochemical difference between palaeoflood slackwater deposits and the eolian loess and soil showed that: (1) The concentrations of major elements Fe_2O_3 , Al_2O_3 , K_2O , MgO are higher in the palaeosol (S_0) and lower in the loess (L_1 , L_t , L_0). The abundances of elements CaO and Na_2O showed a reversed change, indicating that these elements were affected by weathering and pedogenesis along with the Holocene climatic change. The abundances of trace elements including Zr , Hf , Ti , Cr , Y and they are very stable and close to the averages in the Earth's crust. This is because these trace elements are connected with the coarse fraction and heavy minerals. They have stable chemical properties and are not much affected by weathering and pedogenesis. (2) In a single palaeoflood slackwater deposit (SWD) bed, the sorted deposition in floodwater resulted in a concentration of the coarse fraction and heavy minerals at the bottom of the SWD bed. Thus, Zr , Hf , Ti , Cr , Y and other trace elements show a prominent peak. However, the increased abundance of clay minerals resulted in an increase in the major elements including Fe_2O_3 , Al_2O_3 , K_2O , MgO in the top of a SWD bed. This change is well consistent with the change of sand-sized particles and magnetic susceptibility in a SWD bed. These physico-chemical features are very useful in identifying palaeoflood slackwater deposits in the eolian sediment profiles. These findings are of great importance in palaeoflood hydrology.

Key words: Jinghe River; palaeoflood; slackwater deposit; chemical elements; Holocene