

文章编号: 1671-1505(2024)06-1516-15 DOI:10.7605/gdtxb.2024.06.102

洛阳盆地古洪水剖面地球化学指标的 古气候指示意义*

李松翰¹ 张俊娜¹ 张小虎² 赵海涛³ 赵伯伦⁴ 韩子楠⁴

1 首都师范大学历史学院, 北京 100048

2 河南省文物考古研究院, 河南郑州 450000

3 中国社会科学院考古研究所, 北京 100101

4 北京联合大学应用文理学院, 北京 100191

摘要 地球化学指标在古气候研究中多用于黄土、湖泊等沉积物的分析, 河流沉积物由于沉积水动力变化大, 对其化学元素及其古气候指示意义的研究较少。文中对洛阳盆地 4~3.8 ka BP 龙山晚期古洪水 (SQ) 剖面地球化学指标的古气候指示意义进行了探讨。分析显示, 古洪水剖面的化学元素含量与中值粒径相关性显著。在排除物源、沉积再旋回和成岩钾交代作用对于化学元素的影响后, 根据各化学元素与中值粒径的相关系数进行分组, 并在同组内按照元素迁移强弱建立化学元素参数指标, 其结果与 CIA 粒度效应校正结果具有一致性, 均在距今 4 000 年前后的古洪水层呈低值, 指示相对干凉的气候。结合该剖面孢粉的分析结果, 认为洛阳盆地温凉的气候条件是距今 4 000 年前后古洪水事件发生的重要环境背景。虽然河流沉积过程的复杂性导致本研究具有一定的局限性, 但是通过相关系数分组建立比值参数的方法, 为探讨河流沉积物化学元素指标的古气候指示意义提供了新的思路。

关键词 洛阳盆地 古洪水 地球化学指标 相关性分析 气候事件

第一作者简介 李松翰, 男, 2001 年生, 硕士研究生, 研究方向为环境考古。E-mail: 2220202014@cnu.edu.cn。

通讯作者简介 张俊娜, 女, 1984 年生, 副教授, 研究方向为环境考古和第四纪古环境演变。E-mail: jun-nazhang84@163.com。

中图分类号: P532 文献标志码: A

Significance of palaeoclimate indicators of geochemical indexes of palaeoflood profiles in Luoyang Basin, China

LI Songhan¹ ZHANG Junna¹ ZHANG Xiaohu² ZHAO Haitao³ ZHAO Bolun⁴ HAN Zinan⁴

1 School of History, Capital Normal University, Beijing 100048, China

2 Henan Provincial Institute of Cultural Heritage and Archaeology, Zhengzhou 450000, China

3 Institute of Archaeology, Chinese Academy of Social Sciences, Beijing 100101, China

4 College of Applied Arts and Science of Beijing Union University, Beijing 100191, China

* 国家自然科学基金项目 (编号: 41971114)、国家社科基金重大项目 (编号: 21&ZD223, 18ZDA172) 和国家社科基金一般项目 (编号: 20BKG001) 联合资助。[Co-funded by the National Natural Science Foundation of China (No. 41971114), the major project of National Social Science Fund (Nos. 21&ZD223, 18ZDA172) and the general projects of the National Social Science Fund (No. 20BKG001)]

收稿日期: 2024-01-31 改回日期: 2024-08-08

Abstract In paleoclimate studies, geochemical indexes are predominantly employed in the analysis of loess, lake and other sediment types. However, the role of chemical elements in indicating palaeoclimate conditions in river sediments has been rarely investigated, primarily due to significant variations in sedimentary dynamics. In this paper, the significance of paleoclimate indicators derived from the geochemical index of the late Longshan Paleoflood section (SQ) dating from 4 to 3.8 ka BP in the Luoyang Basin. The analysis reveals a significant correlation between the chemical elements in the SQ profile and the median particle size. After accounting for the influences of provenance, sedimentary recycling and diagenetic potassium metasomatism on the chemical elements, the chemical elements were grouped based on the correlation coefficients with median particle size. Subsequently, we established chemical element parameter indexes according to the migration strength of the elements within the same group. The results are consistent with the CIA particle size effect correction findings, both indicating low values in the paleoflood layer, which suggests a dry and cool climate. Based on the results of palynology in this profile, it is concluded that the relatively mild, warm and cool climate in the Luoyang Basin serves as a significant environmental background for the occurrence of paleoflood events around 4 000 years ago. However, the complexity of the river deposition process presents limitations for this study. The method of grouping parameters offers a valuable approach to exploring the palaeoclimatic significance of chemical element indicators found in river sediments.

Key words Luoyang Basin, palaeoflood, geochemical indexes, correlation analysis, climate event

About the first author LI Songhan, born in 2001, a postgraduate student, is mainly engaged in research on environmental archaeology. E-mail: 2220202014@cnu.edu.cn.

About the corresponding author ZHANG Junna, born in 1984, an associate professor, is mainly engaged in researches on environmental archaeology and Quaternary palaeoenvironmental evolution. E-mail: junnazhang84@163.com.

1 概述

地球化学元素受古气候变化影响发生迁移和聚集,因此在第四纪古环境研究中其常作为有效的古气候替代性指标,并在黄土-古土壤(刘东生, 1985; 李拓宇等, 2013; Li *et al.*, 2022a; 杨宇哲等, 2023)、湖泊沉积(张虎才等, 2009; 郭志永等, 2011; Sun *et al.*, 2021; 宋德卓等, 2022)等研究中得到了广泛应用。河流作用是塑造地貌最普遍、最活跃的外营力之一,其通过侵蚀、搬运和堆积形成相应的河流沉积物,物源具有随机性,沉积水动力波动频繁。受水动力过程的影响,河流沉积物的化学元素分布规律通常与黄土不同,这一现象被称为“粒度效应”(赵一阳和喻德科, 1983; Lacey *et al.*, 2017),造成其结果难以直接用于解释古气候变化。目前,河流沉积物地球化学指标多用于沉积相判别(蓝先洪等, 1987; 宫钊彰等, 2014; 封志兵等, 2023)和物源示踪(杨守业等, 2007; 韩宗珠等, 2016)等。

在中国环境考古研究中,古洪水研究一直是一个热点问题(朱诚等, 1997; 杨晓燕等, 2005; 黄春长等, 2011; 张俊娜和夏正楷, 2011; Wu *et al.*, 2016; 董广辉等, 2018),对古洪水沉积物的化学元素指标分析主要集中于古洪水事件的判定、沉积特征分析和水文特征重建等。如,对中坝遗址疑似古洪水层的研究认为,高 Rb/Sr 值反映与洪水有关的高降雨量环境,洪水层沉积物的 TOC 含量、有机氮和汞的含量远低于文化层(朱诚等, 2005); 泾河杨官寨剖面(YGZ)化学元素参数被认为可用来识别古洪水滞流沉积层(SWD)(张玉柱等, 2012); 对重庆永川汉东城遗址古洪水的研究表明, CaO、Fe₂O₃ 和 MgO 等指标可指示水体变化,而 CIA 和 Rb/Sr 值则可指示降水和温度(李兰等, 2020)。总之,目前的古洪水沉积物研究缺乏对“粒度效应”下化学元素参数古气候指示意义的讨论(赵一阳和喻德科, 1983; 张玉柱等, 2012; Lacey *et al.*, 2017; 王浩宇等,

2021; Li *et al.*, 2022a)。虽然有学者采用 R-聚类分析或 R 型因子分析的方法对古洪水沉积物化学元素和相关参数进行分类并阐释其环境指示意义(宫钊彰等, 2014), 但对于物源、沉积过程、成岩过程等因素很少考虑(Borges *et al.*, 2008; Jian *et al.*, 2013; 赵占仑等, 2018; 傅寒晶等, 2021)。

大量环境考古工作表明, 距今 4000 年前后是中国古洪水的频发期, 在黄河流域和长江流域考古遗址中均发现了这一时期古洪水的证据(朱诚, 1997; 夏正楷和杨晓燕, 2003; 杨晓燕等, 2005; 黄春长等, 2011; 张俊娜和夏正楷, 2011; 顾洪亮等, 2012; 徐佳佳, 2017; Zhang *et al.*, 2019)。众多来自黄土(An *et al.*, 2005; 殷志强和秦小光, 2010; 徐新文等, 2020)、风沙沉积(邹晓君等, 2023)、湖相沉积(靳桂云和刘东生, 2001; 邹春辉等, 2020)、石笋(Wang *et al.*, 2005; Hu *et al.*, 2008; Tan *et al.*, 2018; 张振球等, 2023)、冰芯(段克勤等, 2012)的古气候记录均显示这一时期气候发生了显著波动, 但目前对于 4 ka BP 古洪水事件的气候背景及其与 4.2 ka BP 气候波动事件的联系仍未有明确认识, 而直接对已确定的古洪水剖面的古环境指标进行分析则是研究这一时期气候背景的重要手段。

SQ 剖面位于河南省洛阳盆地, 该剖面记录的龙山晚期古洪水事件被证明与二里头遗址的选址有重大关联(Zhang *et al.*, 2019), 故是黄河流域 4 ka BP 古洪水事件的代表性剖面。笔者在前期工作的基础上(张俊娜和夏正楷, 2011, 2012), 对洛阳盆地 4~3.8 ka BP 的古洪水(SQ)剖面进行化学元素分析, 在排除物源、沉积再旋回和钾交代作用的影响后, 通过对 CIA 进行粒度效应校正和相关性分组比值参数分析, 结合孢粉变化, 探讨 4~3.8 ka BP 前后古洪水事件发生的气候背景。

2 研究区概况

洛阳盆地位于河南省西部, 伊、洛两河穿越盆地而过, 至盆地东部汇合为伊洛河, 后沿东北向流出盆地汇入黄河。该地区位于暖温带向北亚热带的过渡带, 为暖温带大陆性季风气候, 年平均气温 12~14.7 °C, 气温年较差和日较差均较大; 年平均降雨量 500~650 mm, 降水量年际和季节变化较大, 呈现自南向北递减趋势。洛阳盆地内植被主要

为暖温带落叶阔叶林, 包括栓皮栎林、麻栎林和青檀林等; 林下普遍分布灌丛和草丛, 包括荆条、酸枣和白羊草等。

洛阳盆地地貌表现为自盆地外围向内依为低山丘陵、黄土台塬和伊洛河冲积平原。冲积平原可分为河漫滩和三级阶地: T3 阶地的形成年代尚不清楚; T2 阶地的形成年代约为距今 10 000 年前后(Storozum *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019); T1 阶地属于全新世阶地, 大约在距今 10 000 年前后开始堆积, 至距今 7000 年前后结束堆积(Zhang *et al.*, 2019)。

水渠剖面(SQ 剖面)处于二里头遗址南界一条人工灌渠的北壁, 位于伊洛河二级阶地前缘, 具体坐标为 112°41'15.1"E、34°41'19.2"N(图 1)。依据野外沉积特征可将该剖面自上而下划分为 5 层: ①、②层为近现代和历史时期地层, ③层为灰褐色黏土质粉砂层, ④层为浅黄色细砂层, ⑤层为深褐色粉砂质黏土层。其中, ⑤层属于 T2 阶地顶部河流相堆积物, ④层和③层下部属于古洪水堆积(图 1)(张俊娜和夏正楷, 2011)。

3 样品采集与分析

按照 4 cm 间距在 SQ 剖面第③~⑤层连续采集沉积物样品 31 个(SQ1~SQ31), 在③层上部、中部和④层采集光释光测年样品 3 个(L1~L3)。粒度和孢粉的具体实验分析方法见张俊娜和夏正楷(2011, 2012)等的详细描述。测年结果显示, L1~L3 样品的 OSL 年代分别为 2.64 ka BP, 3.80 ka BP 和 4.04 ka BP(张俊娜和夏正楷, 2011)。

化学元素分析在北京大学造山带与地壳演化教育部重点实验室完成。常量元素测试的实验步骤为: 准确称取 0.4 g 烘干后的样品, 与 4 g 烘干后的四硼酸锂、偏硼酸锂、氟化锂混合溶剂一起放入铂金坩埚中搅拌均匀, 加入三四滴饱和溴化铵溶液, 放入高频熔融机中熔样制片, 使用美国赛默飞公司 ARL ADVANT XP+型顺序式 X 射线荧光光谱仪进行测量。常量元素分析误差小于 1%。微量元素的实验步骤为: 将粉碎至 200 目的样品置于烘箱 105 °C 烘烤 12 h; 称取 0.0250±0.0002 g 样品放置于不锈钢消解罐中, 加入 2 mL 氢氟酸、0.6 mL 硝酸和 5 滴高氯酸后将消解罐放入烘箱 185 °C 烘烤 72 h; 冷却后将消解罐放置在 150 °C 电热板上加热

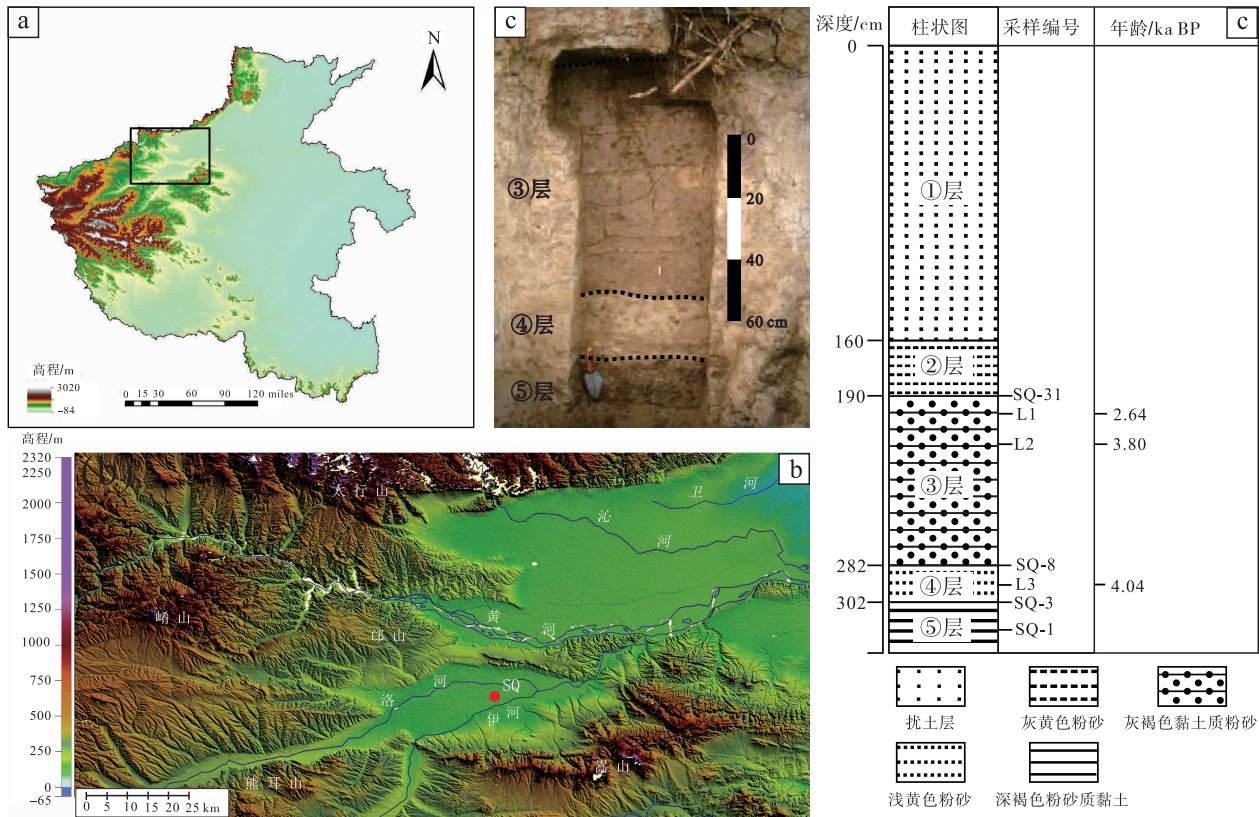


图 1 洛阳盆地位置与 SQ 剖面示意图
Fig. 1 Location of Luoyang Basin and SQ profile

蒸酸，待待样近干，加入 1~2 mL 硝酸复溶并蒸发近干；再加入 10 mL 左右浓度 2% 的稀硝酸溶液并置于 105 °C 电热板加热 12 h；用浓度 2% 的稀硝酸溶液溶解样品并转移至 25 mL 的容量瓶中定容摇匀。使用美国安捷伦科技有限公司 Agilent ICPMS 7500ce 型电感耦合等离子体质谱仪进行测量，微量元素分析误差小于 10%。

4 结果与分析

4.1 SQ 剖面元素特征

SQ 剖面中值粒径 (Md)、常量元素氧化物百分含量和微量元素含量曲线如图 2 所示。中值粒径、常量元素氧化物百分含量和微量元素含量的变化趋势在第④、⑤层之间具有明显的分界，在第③、④层之间具有一定的连续性，指示③、④层沉积为古洪水沉积。

在③层和④层沉积物的化学元素中，Zr、SiO₂、Sr、CaO 和 Na₂O 自下而上含量逐渐降低，Ba、Zn、K₂O、Cu、Rb、MgO、TFe₂O₃ 和 Al₂O₃

自下而上含量逐渐升高。各化学元素与中值粒径的相关系数依次为：0.7809 (Zr)、0.7554 (SiO₂)、0.7440 (Sr)、0.6705 (CaO)、0.6278 (Na₂O)、-0.0227 (Ba)、-0.5858 (Zn)、-0.6028 (K₂O)、-0.6408 (Cu)、-0.6447 (Rb)、-0.7095 (MgO)、-0.7403 (TFe₂O₃) 和 -0.7693 (Al₂O₃)。相关性分析显示，常用化学元素与中值粒径相关性显著，元素分布规律受到粒度效应的强烈影响。

4.2 化学蚀变指数 (CIA) 校正

CIA (化学蚀变指数) 可以衡量长石淋溶强度，是指示化学风化强度的常用指标 (Nesbitt and Young, 1982)，计算公式为：

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

其中，Al₂O₃、Na₂O、K₂O、CaO* 均为分子摩尔数；CaO* 为硅酸盐中 CaO 的分子摩尔数。

本研究所采集样品未用酸溶方法除去非硅酸盐的含 Ca 矿物，故采用 McLennan (1993) 提出的校正方法来计算 CIA，即当沉积物样品中的 CaO/Na₂O 的摩尔比值大于 1 时，以 Na₂O 的含量

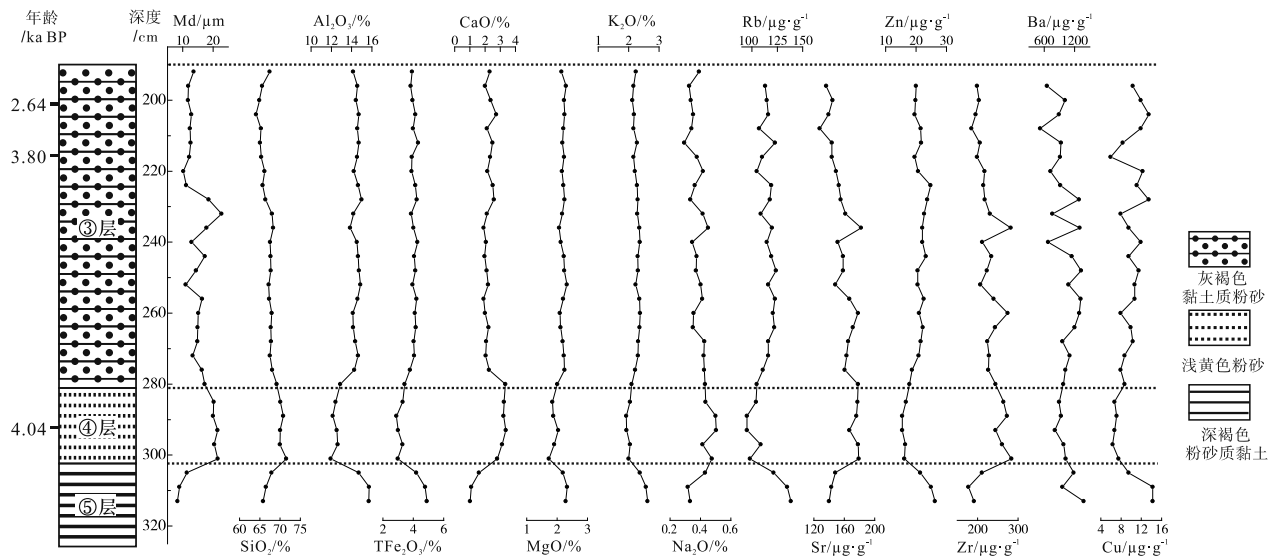


图 2 洛阳盆地 SQ 剖面③-⑤层沉积物中值粒径 (Md)、常量元素氧化物含量、微量元素含量曲线

Fig. 2 Curves of medium diameter, major elements oxides and trace elements of sediments in layer ③-⑤ of the SQ profile in Luoyang Basin

代替 CaO 含量计算 CIA; 当比值小于 1 时, 则直接以 CaO 的含量计算 CIA。计算结果表明, SQ 剖面各层 CIA 值均处于 65~85 之间, 为中等化学风化强度, 指示温暖湿润气候 (Nesbitt and Young, 1982)。

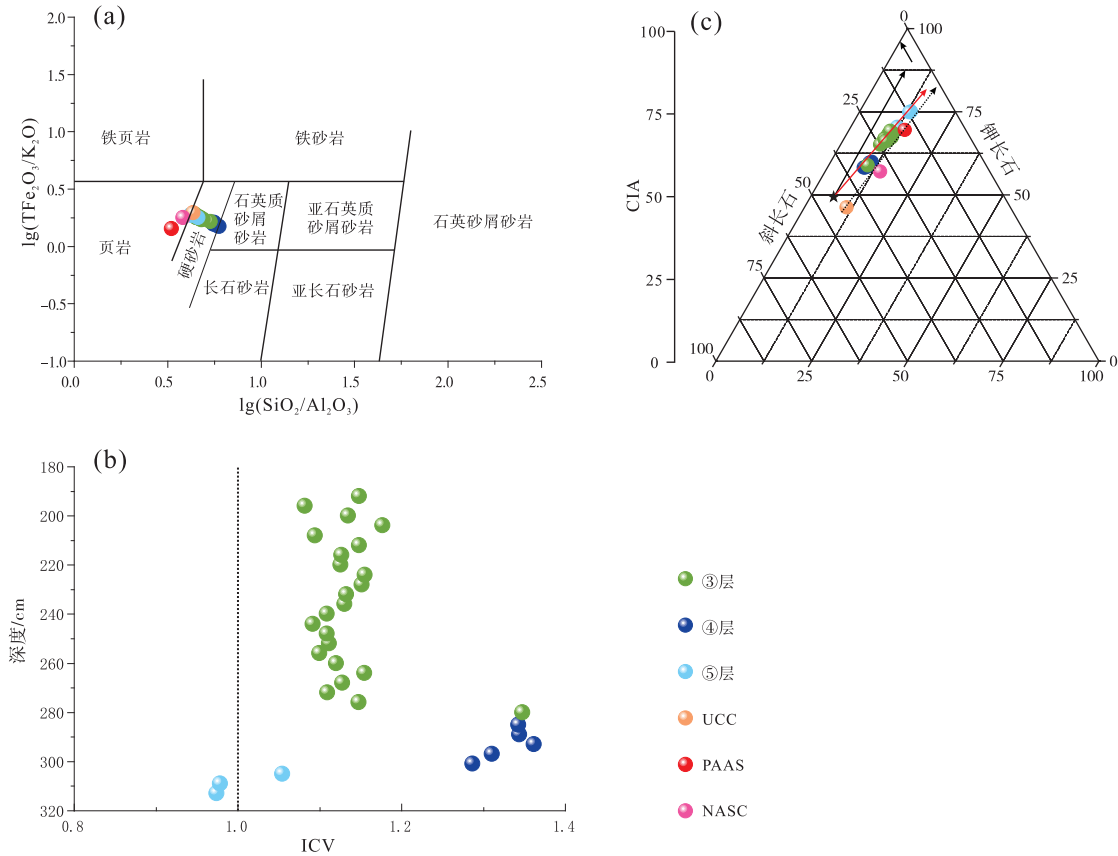
CIA 指数会受到物源差异 (赵占仑等, 2018)、粒度效应 (熊尚发等, 2008)、沉积旋回 (Borges *et al.*, 2008)、钾交代作用 (Jian *et al.*, 2013; 傅寒晶等, 2021) 等因素的影响, 使其数值不能真实反映实际风化程度。文中使用 $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 二元结构图、ICV (成分变异指数)、A-CN-K 图和粒度效应校正等方法对可能的影响因素进行检验。

$\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 二元结构图 (图 3-a) 显示, SQ 剖面物源⑤层主要以页岩风化物为主, ③层和④层主要为硬砂岩风化物, ③层包含少量的页岩风化物 (Gu *et al.*, 2023a)。伊洛河位于洛阳盆地内部, 最大汇水区域较为稳定, ③层和④层沉积物性质相同且均来自于洛阳盆地西南的崤山、熊耳山、嵩山等地区的山间坡地, 物源区稳定。ICV 值 (成分变异指数) (图 3-b) 在③、④和⑤层之间具有显著差异, 其中⑤层沉积物 ICV 值小于 1, 表明沉积物可能经过强烈风化或再沉积, 而③层和④层沉积物 ICV 值均大于 1, 说明沉积物应为首次沉积 (冯连君等, 2003; 徐小涛和

邵龙义, 2018)。A-CN-K 图可用于观测化学风化趋势, 并进一步探究成岩过程中钾交代作用导致的 CIA 偏差 (Jian *et al.*, 2013; 傅寒晶等, 2021; Gu *et al.*, 2023b)。在 A-CN-K 三角图 (图 3-c) 中, SQ 剖面沉积物呈现出条带状分布, 与 A-CN 连线和理想风化趋势线 (黑色箭头实线) 近似平行, 与 UCC 至 PAAS 的连线平行, 沉积物风化趋势与典型的初期大陆风化趋势一致 (黑色虚箭头虚线), 表明基本未受到成岩过程中钾交代作用的影响 (Nesbitt and Young, 1982; Jian *et al.*, 2013; 徐小涛和邵龙义, 2018; 邵学敏等, 2021)。以上分析说明, SQ 剖面中的③层和④层古洪水沉积物的 CIA 值未受到物源、沉积再旋回、钾交代作用的影响。

在 SQ 剖面中, CIA 值与中值粒径的相关系数为 -0.7157 , 表明其受到了粒度效应的显著影响。参考 Li 等 (2022b) 提出的方法对 SQ 剖面的 CIA 值进行校正, 具体公式为: $\text{CIA}_{\text{corrected}} = \text{CIAr} - [N_s - N_n] \times S$ (式中 CIAr 为 CIA 原值, N_s 为样品中值粒径或 Al/Si 值, N_n 为中值粒径均值或 Al/Si 均值, S 为中值粒径或 Al/Si 与原 CIA 指数线性拟合直线的斜率)。

在使用中值粒径进行校正后, CIA 值与中值粒径相关系数为 -0.0002 , ③层 CIA 均值 (79.46) 大于④层 (78.42); 在使用 Al/Si 值校正后, 与中



a— $\lg(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ - $\lg(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 二元结构图(修改自 Gu *et al.*, 2023a); b—A-CN-K图(修改自 Jian *et al.*, 2013), 图中黑色实线箭头表示理想风化趋势, 黑色虚线箭头表示初期大陆风化趋势; c—ICV(成分变异指数)分布图, $\text{ICV} = [X(\text{Fe}_2\text{O}_3) + X(\text{K}_2\text{O}) + X(\text{Na}_2\text{O}) + X(\text{CaO}^*) + X(\text{MgO}) + X(\text{MnO}) + X(\text{TiO}_2)] / X(\text{Al}_2\text{O}_3)$, 其中, $X(A)$ 为 A 的摩尔分数, CaO^* 为硅酸盐中的 CaO 含量, 本研究样品未用酸溶方法除去非硅酸盐的含 Ca 矿物, 故采用 McLennan(1993) 提出的校正方法进行计算, K_2O 为钾化校正后的含量

图 3 洛阳盆地 SQ 剖面③-⑤层沉积物物源、沉积旋回、钾交代作用检验

Fig. 3 Provenance, sedimentary cycle and potassium metasomatism test of sediments in layer ③-⑤ of SQ profile in Luoyang Basin

值粒径相关系数为 0.0178, ③层 CIA 均值 (79.25) 小于④层 (79.31) (图 4)。虽然与校正前相比, CIA 曲线在第④层的极低值被抹平, 但是 CIA 和校正曲线线性拟合得到的直线斜率均为正值, 说明 SQ 剖面的 CIA 值自下而上整体上逐渐增大, 环境逐渐转为暖湿。同时, 使用中值粒径校正后的 CIA 值与中值粒径相关性更弱, 可以更加准确地指示真实的风化程度。因此, 根据中值粒径校正后的 CIA 结果, ④层 CIA 平均值小于③层, 说明④层为相对干凉的阶段, 之后逐渐转暖。但由于③层和④层 CIA 均值均处于 65~85 之间, 指示整体气候仍较为温湿 (Nesbitt and Young, 1982)。

4.3 相关系数分组比值参数分析

按照元素与中值粒径的相关系数大小将常量元

素和微量元素进行分组(表 1), 同组化学元素受粒度效应影响程度相近, 其比值可以校正粒度效应对化学元素参数的影响。

依据分组后的同组内元素比值和化学元素迁移顺序的原则, 计算化学元素比值参数 (A), 具体计算公式为: $A = \text{迁移能力较弱的元素} / \text{迁移能力较强的元素}$ 。其中作为分子的化学元素迁移能力较弱, 作为分母的化学元素迁移能力较强。因此, 当气候偏暖湿时, 风化作用较强, A 值为高值; 当气候偏冷干时, 风化作用较弱, A 值为低值。常量元素中, 各个化学元素的迁移能力顺序为: $\text{K}_2\text{O} > \text{Na}_2\text{O} > \text{CaO} > \text{MgO} > \text{SiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3$ (靳鹤龄等, 2005), 即 Si 元素相对稳定, 在冷干气候条件下易富集; Al 和 Fe 较为稳定, 在暖湿的气候条件下易富集; Ca、Mg 为碱土金属, 在过渡型气候条件下

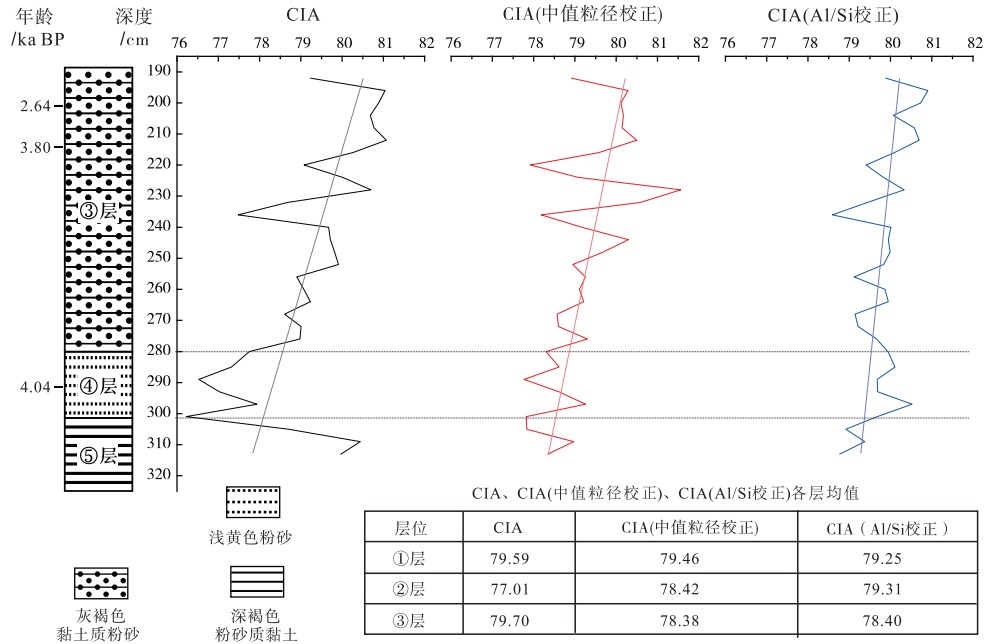


图 4 洛阳盆地 SQ 剖面③-⑤层沉积物风化蚀变指数 (CIA) 曲线和校正曲线

Fig. 4 Correction curve of chemical element parameters of sediments in layer ③-⑤ of the SQ profile in Luoyang Basin

表 1 洛阳盆地 SQ 剖面③-⑤层沉积物常量元素氧化物、微量元素与中值粒径的相关系数和分组

Table 1 Correlation coefficient between major element oxides, trace elements and medium diameter and its classification of sediments in layer ③-⑤ of SQ profile of Luoyang Basin

相关系数	常量元素	微量元素
0.8~0.6	SiO ₂ 、CaO、Na ₂ O	Zr、Sr
0~-0.2		Ba
-0.4~-0.6		Zn
-0.6~-0.8	K ₂ O、MgO、TFe ₂ O ₃ 、Al ₂ O ₃	Cu、Rb

易淋溶迁移; K 和 Na 多储存于长石中, 在暖湿条件下易被淋溶迁移。在微量元素中, Cu 在湿润的酸性淋溶环境中较为活跃 (刁桂仪等, 1996); Rb 原子半径较大, 易被带负电的黏土矿物吸附而留在原地产生富集或因易溶物质的迁移而相对富集 (陈骏等, 1996); Zr 的化学风化过程十分稳定, 通常被作为稳定元素衡量其他元素的迁移情况 (Hutton, 1977); Sr 属于分散元素, 在湿润的酸性淋溶条件下以 Sr²⁺ 的形式随土壤溶液发生迁移 (陈骏等, 1996)。依据分组结果, 结合化学元素迁移性质, 在 SQ 剖面中选取的化学元素参数 A 包括: MgO/K₂O、Al₂O₃/MgO、Al₂O₃/K₂O、SiO₂/Na₂O、TFe₂O₃/MgO、SiO₂/CaO、Fe₂O₃/K₂O、CaO/Na₂O、Al₂O₃/TFe₂O₃、Rb/Cu 和 Zr/Sr (以 TFe₂O₃ 代替

Fe₂O₃ 进行计算)。各化学元素参数在 SQ 剖面中的分布如图 5 所示。

在 ③ 层和 ④ 层中, MgO/K₂O、Al₂O₃/MgO、Al₂O₃/K₂O、SiO₂/Na₂O、TFe₂O₃/MgO、SiO₂/CaO、Fe₂O₃/K₂O 平均值均在 ③ 层最高 (依次为 0.9708、6.5791、6.3823、178.3314、1.8368、30.1746、1.7793), 在 ④ 层最低 (依次为 0.9473、6.5723、6.2100、152.4867、1.6508、22.4815、1.5569)。CaO/Na₂O、Al₂O₃/TFe₂O₃、Rb/Cu 和 Zr/Sr 平均值在 ④ 层最高 (依次为 6.8109、3.9927、6.24115、1.5513), 在 ③ 层最低 (依次为 6.0304、3.5883、5.4625、1.4274)。

为进一步选取能够反演沉积环境与气候的参数, 需要计算并比较所有组合与中值粒径的相关系数以进行二次检验。在所有组合中, 与中值粒径相关系数绝对值小于 0.3 的组合有 MgO/K₂O (-0.1140)、Al₂O₃/MgO (-0.1747) 和 Al₂O₃/K₂O (-0.2756), 受粒度效应的影响较弱; 在 0.3~0.6 之间的组合有 CaO/Na₂O(0.3567)、Rb/Cu (0.3583)、SiO₂/Na₂O(-0.5368)、TFe₂O₃/MgO (-0.5424)、SiO₂/CaO(-0.5715) 和 Zr/Sr(0.5717), 受粒度效应的影响适中; 大于 0.6 的组合有 Al₂O₃/TFe₂O₃(0.6258) 和 Fe₂O₃/K₂O (-0.7747), 受到粒度效应的影响较为强烈。对于化学元素参数

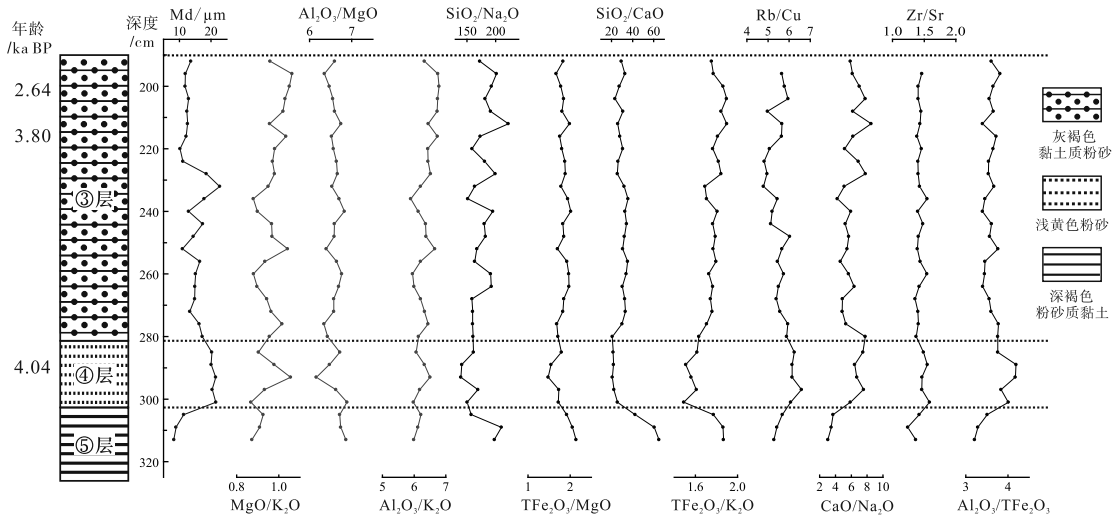


图 5 洛阳盆地 SQ 剖面③-⑤层沉积物化学元素比值参数曲线

Fig. 5 Curve of chemical element parameters of sediments in layer ③-⑤ of SQ profile in Luoyang Basin

与中值粒径相关系数绝对值大于 0.3 的组合, 在进行古气候的分析时予以舍弃, 而以受粒度效应影响较弱的 MgO/K_2O 值、 Al_2O_3/MgO 值和 Al_2O_3/K_2O 值作为主要判断依据。

MgO/K_2O 值、 Al_2O_3/MgO 值和 Al_2O_3/K_2O 值随时间变化的 3 条曲线均显示, 第④层平均值均小于③层, 表明④层沉积物风化作用较弱, 环境相对干凉。但是, 3 条曲线的均值在③和④层的差异较小, 说明气候变化较为温和, 为渐变式过渡。

5 讨论

5.1 SQ 剖面化学元素参数特征及古气候意义

对 SQ 剖面沉积物 $\lg(SiO_2/Al_2O_3) - \lg(Fe_2O_3/K_2O)$ 二元结构图、ICV (成分变异指数)、A-CN-K 图(图 3) 的分析表明, 剖面中③层和④层古洪水沉积物未受到物源、沉积再旋回和成岩钾交代作用的影响。CIA 粒度效应校正的结果表明古洪水层沉积环境温暖湿润, ④层为相对冷干的阶段。按照化学元素与中值粒径的相关系数进行分组后, 对同组内的元素按照迁移强弱顺序进行比值计算建立古气候参数, 通过古气候参数与中值粒径相关性检验, 选取受粒度效应影响较弱的参数进行古气候的反演, 结果显示, 在 SQ 剖面③层和④层中, 化学元素比值参数在④层呈现低值, 化学风化程度较低, 环境相对冷干。这一分析结果与 CIA 粒度效应校正后的结果一致, 多数参数曲线分

布特征具有一致性, 参数与中值粒径相关系数显著降低, 表明该方法具有可行性。

SQ 剖面的孢粉组合的结果(张俊娜和夏正楷, 2011) 显示(图 6), 第 4 孢粉带(第⑤层) 中铁杉属、冷杉属较多, 阔叶树以桦属为主, 草本植物主要为蒿和藜, 蕨类以卷柏为主, 存在一定量的指纹藻, 指示了针阔混交森林草原环境。在第 3 孢粉带(第④层) 中, 木本/非木本 (AP/NAP) 值较大, 木本植物以落叶阔叶树为主, 铁杉属含量较低, 不见冷杉属, 草本植物以蒿属、藜科和蓼科为主, 蕨类仅有少量卷柏属, 湿生指纹藻和双星藻数量较多, 指示了针阔混合的森林环境。第 2 孢粉带(第③层下部) AP/NAP 值减小, 木本植物含量有所降低, 铁杉属、冷杉属含量增多, 草本植物含量增多, 包括蒿属、藜科、毛茛科、蓼科、芸香科等, 蕨类中卷柏属含量增多, 湿生指纹藻和双星藻数量下降, 指示针阔混交森林草原环境。

4.04~3.8 ka BP 的洪水层(④-③层) 对应剖面孢粉带中第 3 至第 2 孢粉带。这一时期 AP/NAP 值变小; 第④层松属孢粉含量明显增加, 第③层铁杉属和冷杉属孢粉含量增加, 都指示了气候干凉的趋势(赵辰辰等, 2019; 杨坤美等, 2022)。③层中所含的桦属、栎属、榆属等阔叶树孢粉可能与高能洪水所携带的上游山区林地孢粉有关(许清海等, 2001); 湿生指纹藻和双星藻等湿生植物含量的增高, 可能与洪水期河漫湿地的形成有关(毛礼米等, 2011)。从 SQ 剖面第 3 孢粉带和第 2 孢

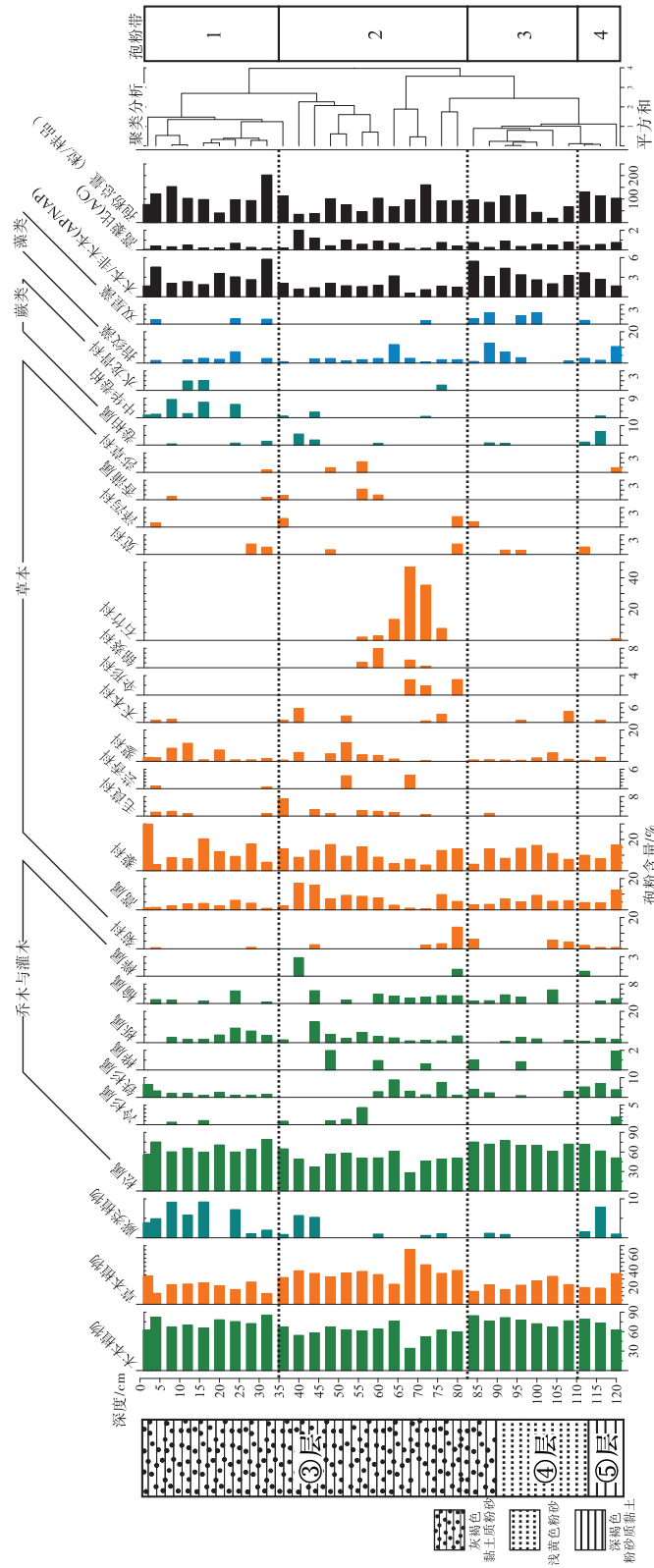


图 6 洛阳盆地 SQ 剖面 ③-⑤层沉积物孢粉图(据张俊娜和夏正楷,2011)
 Fig. 6 Pollen diagram of sediments in layer ③-⑤ of the SQ profile in Luoyang Basin(after Zhang and Xia,2011)

粉带中孢粉组合可见, 4.04~3.8 ka BP 期间气候环境有一定的干凉化趋势。

综合化学元素和孢粉的分析结果, SQ 剖面中, 4.04~3.8 ka BP 古洪水期间的气候应处于相对干凉阶段。但是需要注意, 孢粉分析指示的洪水期生态环境仍然较为优良, 附近山区为针阔混交林, 河流流域内生长各种陆生草本植物, 河漫湿地生长着藻类等湿生植物, 推测当时属于较为温凉的气候环境。

5.2 4 ka 古洪水事件发生的气候背景

SQ 剖面粒度与磁化率的分析表明, 在 4 ka BP 前后, 洛阳盆地发生了一次漫上河流阶地的异常洪水事件, 剖面中③层和④层为该次洪水事件的沉积(张俊娜和夏正楷, 2012)。使用已有的年代数据, 通过线性内插推断 SQ 剖面④层底部的年代为 4068 a BP, 即洪水事件发生的年代上限为 4068 a BP。贵州董哥洞 DA 石笋(Wang *et al.*, 2005)和洛阳盆地灰嘴剖面(陈亮等, 2023)的研究表明, 4.2 ka 气候事件的时间分别为 4400~3950 a BP 和 4155~3995 cal a BP。虽然不同地区 4.2 ka 气候事件的发生时间存在差异, 但洛阳盆地 4 ka 古洪水事件的时间上限已经进入此次气候事件的时间范围。

4.2 ka 气候事件被认为是一次全球范围内的降温事件, 但对应的降水量和湿度在不同区域具明显差异(Bond *et al.*, 1997; de Menocal, 2001)。如, Wu 和 Liu (2004) 认为 4 ka BP 前后中国东亚季风区呈现出北方干旱、南方洪涝的降水格局; 而 Sun 等(2019)的研究认为这一时期普遍出现寒冷干燥的气候, 而且在黄河中下游和长江流域伴随着极端的干旱。董哥洞 DA 石笋的记录(Wang *et al.*, 2005)在 4500~4000 a BP 之间出现了剧烈的季风减弱事件, 降雨量整体较低(图 7-a)。渤海湾西海岸 NDG 钻孔(You *et al.*, 2024)在 4450~4070 a BP 之间孢粉数量明显降低, 出现了明显的干旱, 之后逐渐变得湿润。鸭子海(Wang *et al.*, 2022)的孢粉记录显示在 4150~3880 a BP 期间, 夏季风明显减弱, 降水量急剧减少。距 SQ 剖面较近的九仙洞 C996-1 石笋(Cai *et al.*, 2010)的 $\delta^{18}\text{O}$ 记录显示 3900~4200 a BP 出现了 EASM (东亚夏季风) 剧烈减弱的现象(图 7-b)。黄土高原南缘乌鸦洞 WY12 石笋(Tan *et al.*, 2018)的 $\delta^{18}\text{O}$ 记

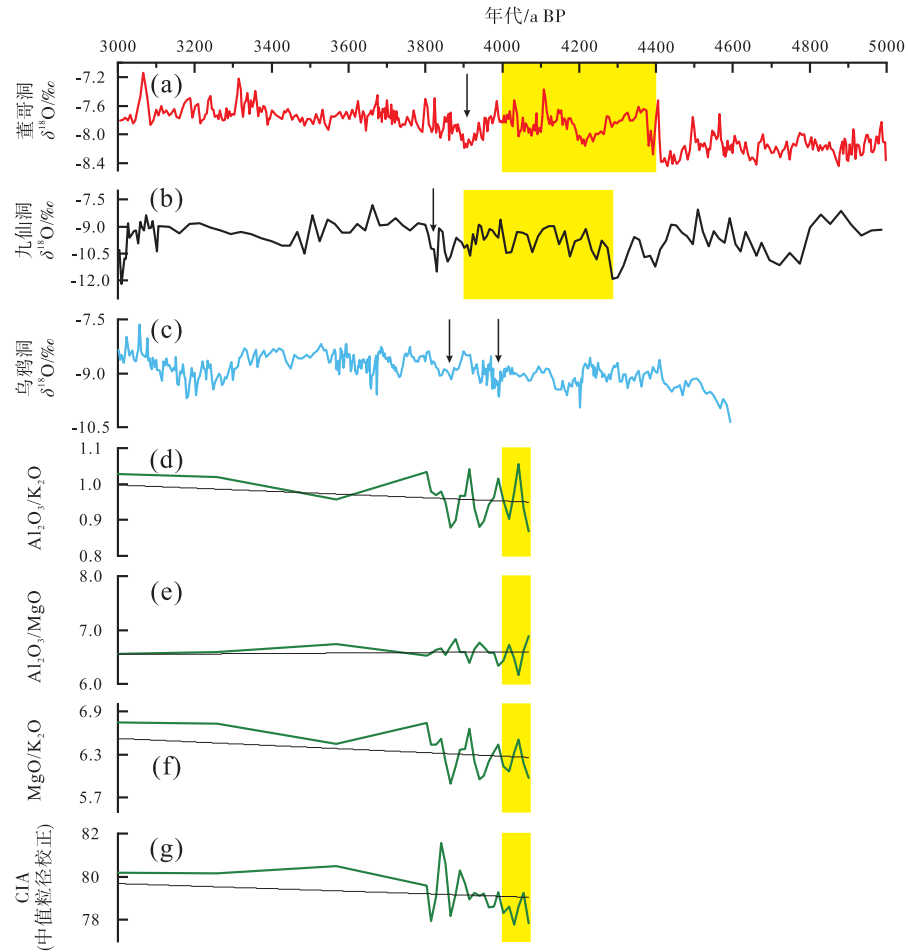
录显示在 4 ka BP 前后降水量变化剧烈(图 7-c), 但对应的洪水发生初期, $\delta^{18}\text{O}$ 为持续的高值, 表明该阶段相对干旱。寺河南剖面(孙雄伟和夏正楷, 2005)、柿园剖面(许俊杰等, 2013)和大河村岩心(Ren *et al.*, 2021)的研究均显示在 4 ka BP 前后洛阳盆地及周边地区出现了气候干凉化的趋势。位于洛阳盆地的灰嘴遗址 HZ-1 剖面(陈亮等, 2023)记录了在 4155~3995 cal a BP 期间发生的干旱事件。以上分析说明, 在不同地区的 4.2 ka 气候事件记录中, 虽然存在起止时间、降雨量和湿度的时空差异, 但在 4 ka BP 前后均出现不同程度的夏季风减弱事件。从 SQ 剖面来看, CIA 校正值得在④层呈低值, 化学元素比值参数在该层也为低值, 说明在古洪水发生时期化学风化作用较弱, 气候相对干凉。洛阳盆地位于秦岭淮河以北, 属于东亚季风区, 盆地内部沉积物的化学风化作用主要受到气温和降水等气候因素的控制, 因此推测古洪水发生时为相对干凉的气候环境。SQ 剖面的孢粉分析结果也证实了这一结论。

第四纪古气候研究表明, 当古气候处于过渡期(Zhao *et al.*, 2017)或处于季风状态异常时期, 古洪水事件极易发生(Huang *et al.*, 2010; 黄春长等, 2011; Guo *et al.*, 2015)。董哥洞 DA 石笋、九仙洞 C996-1 石笋和乌鸦洞 WY12 石笋均记录了 4 ka BP 前后出现的异常降雨事件。在 4.2 ka 事件中, SQ 剖面中木本、草本植物含量降低, 可能指示了气候冷干和人类活动共同所致的植被退化和森林覆盖率的降低, 这可能导致流域内拦蓄降雨径流的能力下降, 增大了极端降雨事件(Tan *et al.*, 2018)中洪水发生的概率(赵宏飞, 2018)。

综合多个 4.2 ka 气候事件的研究结果, 认为在 4.2 ka 气候事件中, 各地起止时间、降水湿度的时空分布存在较大差异, 但均在 4 ka BP 前后出现了夏季风减弱、降雨量减少的相对干凉阶段。这一结果与 SQ 剖面化学元素和孢粉的分析结果一致。因此, 认为 SQ 剖面记录的古洪水事件是在 4 ka BP 前后气候相对干凉化的背景下发生的异常洪水事件。

6 结论

1) 洛阳盆地 SQ 剖面中③-⑤层沉积物的化学元素分析结果表明, 化学元素的分布特征与粒度相关性显著, 受到“粒度效应”的影响。



a—董哥洞 DA 石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Wang *et al.*, 2005); b—九仙洞 C996- $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Cai *et al.*, 2010); c—乌鸦洞 WY12 $\delta^{18}\text{O}$ 记录 (Tan *et al.*, 2020); d—SQ 剖面 $\text{MgO}/\text{K}_2\text{O}$ 值变化曲线; e—SQ 剖面 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 值变化曲线; f—SQ 剖面 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O}$ 值变化曲线; g—SQ 剖面 CIA 值 (中值粒径校正) 变化曲线。黄色条带代表季风减弱/降雨量减少或冷干的时段, 黑色箭头代表异常降水的时段

图 7 洛阳盆地 SQ 剖面③-⑤层沉积物元素比值参数与其他全新世环境变化曲线对比图

Fig. 7 Comparison of chemical element ratio parameters of sediments in layer ③-⑤ of the SQ profile in Luoyang Basin with other Holocene environmental change curves

2) 通过计算 SQ 剖面样品的 $\text{Lg}(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3) - \text{Lg}(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{K}_2\text{O})$ 参数、ICV (成分变异指数)、A-CN-K 参数等对影响化学蚀变指数 (CIA) 的因素进行检验, 结果显示 SQ 剖面 CIA 值未受到物源、沉积再旋回、钾交代作用的影响。在此基础上, 对 CIA 值进行“粒度效应”的校正, 结果显示, ④层 CIA 均值低于③层, 说明④层为相对干凉, 但③层和④层 CIA 均值均处于 65~85 之间, 表明洪水发生期间, 气候整体处于温暖湿润阶段。

3) 按照相关系数对化学元素进行分组, 在组内依据化学元素迁移规律建立比值参数。SQ 剖面化学元素的相关系数分组比值参数分析结果显示, 受“粒度效应”影响较小的参数在④层呈现低值,

但③层和④层差别较小, 说明气候相对干凉, 但整体变化较小。这一结果与 4.2ka 气候事件中 4 ka BP 前后的气候记录一致。结合 SQ 剖面孢粉的分析结果, 洛阳盆地 4 ka BP 前后古洪水事件发生在较为温凉的气候背景下。

需要注意的是, 文中对化学元素进行的相关系数分组比值参数分析仅是研究古气候过程的一种简化模型。由于实际情况中成岩和风化过程以及河流沉积过程、成土过程的复杂性, 河流沉积物的化学元素的来源和成因也非常复杂, 未来需要更多的研究来探讨河流沉积物化学元素指标的地球化学原理及其所反映的沉积环境和古气候信息等问题。

致谢 感谢中国社会科学院考古研究所二里头工作队许宏、王宏章等老师对SQ剖面田野取样工作的支持!

参考文献 (References)

- 陈骏, 仇纲, 季峻峰, 鹿化煜. 1996. 最近 130 ka 黄土高原夏季风变迁的 Rb 和 Sr 地球化学证据. 科学通报, 41(21): 1963-1966. [Chen J, Qiu G, Ji J F, Lu H Y. 1996. Rb and Sr geochemical evidence for the recent 130 ka summer monsoon change in the Loess Plateau. Chinese Science Bulletin, 41(21): 1963-1966]
- 陈亮, 冯兆东, 冉敏, 惠争闯, 李开封, 李洪彬, 刘畅, 张祥洋. 2023. 洛阳盆地的 4.2 ka 气候事件和人类活动. 科学通报, 68(5): 546-562. [Chen L, Feng Z D, Ran M, Hui Z C, Li K F, Li H B, Liu C, Zhang Y Y. 2023. The 4.2 ka climate event and human activities in Luoyang Basin of Central Plains of China. Chinese Science Bulletin, 68(5): 546-562]
- 刁桂仪, 文启忠, 吴明清, 潘景瑜. 1996. 黄河中游马兰黄土中若干微量元素平均含量及相关性研究. 海洋地质与第四纪地质, 16(2): 85-92. [Diao G Y, Wen Q Z, Wu M Q, Pan J Y. 1996. Study on the average contents and correlativity of trace elements in Malan loess from the middle reaches of the Yellow River. Marine Geology & Quaternary Geology, 16(2): 85-92]
- 董广辉, 张帆宇, 刘峰文, 张东菊, 周爱锋, 杨谊时, Wang Guanghui. 2018. 喇家遗址史前灾害与黄河大洪水无关, 中国科学: 地球科学, 48(4): 467-475. [Dong G H, Zhang F Y, Liu W F, Zhang D J, Zhou A F, Yang Y S, Wang G H. 2018. Multiple evidences indicate no relationship between prehistoric disasters in Lajia site and outburst flood in upper Yellow River valley, China. Science China Earth Sciences, 48(4): 467-475]
- 段克勤, 姚檀栋, 王宁练, 徐柏青, L. G. Thompson. 2012. 青藏高原中部全新世气候不稳定性的高分辨率冰芯记录. 中国科学(D辑: 地球科学), 42(9): 1441-1449 [Duan K Q, Yao T D, Wang N L, Xu B Q, Thompson L G. 2012. The high resolution ice core record of the Holocene climate instability in the central Tibetan plateau. Scientia Sinica Terrae, 42(9): 1441-1449]
- 冯连君, 储雪蕾, 张启锐, 张同钢. 2003. 化学蚀变指数(CIA)及其在新元古代碎屑岩中的应用. 地学前缘, 10(4): 539-544. [Feng L J, Chu X L, Zhang Q R, Zhang T G. 2003. CIA(chemical index of alteration) and its applications in the Neoproterozoic clastic rocks. Earth Science Frontiers, 10(4): 539-544]
- 傅寒晶, 简星, 梁杭海. 2021. 硅酸盐化学风化强度评估的沉积物指标与方法研究进展. 古地理学报, 23(6): 1192-1209. [Fu H J, Jian X, Liang H H. 2021. Research progress of sediment indicators and methods for evaluation of silicate chemical weathering intensity. Journal of Palaeogeography (Chinese Edition), 23(6): 1192-1209]
- 封志兵, 付佳, 聂逢君, 李满根, 张博程, 杨舒琪, 盛洲宁, 黄昊. 2023. 鄱阳湖赣江三角洲沉积物中铀、钍地球化学特征及影响因素. 东华理工大学学报(自然科学版), 46(2): 150-156. [Feng Z B, Fu J, Nie F J, Li M G, Zhang B C, Yang S Q, Sheng Z N, Huang H. 2023. Geochemical characteristics and influencing factors of uranium and thorium in the sediments of Ganjiang Delta, Poyang Lake, Jiangxi Province. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 46(2): 150-156]
- 宫钊彰, 刘勇, 代彦臣, 邢力, 王祥东, 李广雪. 2014. 现代黄河口晚更新世以来沉积地球化学特征. 海洋地质前沿, 30(11): 22-31. [Gong C Z, Liu Y, Dai Y C, Xing L, Wang X D, Li G X. 2014. Geochemical features of the modern Yellow River mouth since late Pleistocene. Marine Geology Frontiers, 30(11): 22-31]
- 部学敏, 屈欣, 王萌, 张思悦, 张姚姚, 李继彦. 2021. 柴达木盆地西北部长垄状雅丹沉积物地球化学元素组成及指示意义. 中国沙漠, 41(3): 127-136. [Gao X M, Qu X, Wang M, Zhang S Y, Zhang Y Y, Li J Y. 2021. Composition of geochemical elements and its implications for long-ridge yardang in the northwestern Qaidam Basin, China. Journal of Desert Research, 41(3): 127-136]
- 顾洪亮, 黄春长, 周亚利, 庞奖励, 查小春, 张玉柱. 2012. 关中盆地杨官寨遗址古洪水事件释光测年. 地理研究, 31(10): 1837-1848. [Gu H L, Huang C C, Zhou Y L, Pang J L, Zha X C, Zhang Y Z. 2012. OSL dating study the palaeoflood events recorded in the Yangganzhai Neolithic Ruins in the Guanzhong Basin. Geographical Research, 31(10): 1837-1848]
- 郭志永, 翟秋敏, 沈娟. 2011. 黄河中游涇池盆地湖泊沉积记录的古气候变化及其意义. 第四纪研究, 31(1): 150-162. [Guo Z Y, Zhai Q M, Shen J. 2011. Palaeoclimatic changes since the deglaciation revealed by lacustrine sediments in Mianchi basin of western Henan Province, Central China and the implication for Chinese culture development. Quaternary Sciences, 31(1): 150-162]
- 韩宗珠, 艾丽娜, 陈筱林, 王传, 刘涵, 孙宇菲. 2016. 南黄海泥质区西北缘 B01 孔黏土粒级沉积物地球化学特征及其物质来源的识别. 中国海洋大学学报(自然科学版), 46(10): 82-91. [Han Z Z, Ai L N, Chen X L, Wang C, Liu H, Sun Y F. 2016. Geochemical characteristics of sediments and provenance of B01 core in northwest margin of South Yellow Sea mud area. Periodical of Ocean University of China, 46(10): 82-91]
- 黄春长, 庞奖励, 查小春, 周亚利. 2011. 黄河流域关中盆地史前大洪水研究: 以周原漆水河谷地为例. 中国科学: 地球科学, 41(11): 1658-1669. [Huang C C, Pang J L, Zha X C, Zhou Y L. 2011. Study on prehistoric flood in Guanzhong Basin of Yellow River Basin: taking Qishui River Valley in Zhouyuan as an example. Scientia Sinica Terrae, 41(11): 1658-1669]
- 靳桂云, 刘东生. 2001. 华北北部中全新世降温气候事件与古文化变迁. 科学通报, 46(20): 1725-1730. [Jin G Y, Liu D S. 2001. Middle Holocene cooling climate events and ancient cultural changes in northern North China. Chinese Science Bulletin, 46(20): 1725-1730]
- 靳鹤龄, 李明启, 苏志珠, 董光荣, 赵晖. 2005. 220 ka BP 来萨拉乌苏河流域地质剖面地球化学特征及其对全球气候变化的响应. 冰川冻土, 27(6): 861-868. [Jin H L, Li M Q, Su Z Z, Dong G R, Zhao H. 2005. Geochemical features of a profile in Salawusu river valley and their response to global climate changes since 220 ka BP. Journal of Glaciology and Geocryology, 27(6): 861-868]
- 蓝先洪, 马道修, 徐明广, 周清伟, 张光威. 1987. 珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义. 海洋地质与第四纪地质, 7(1): 39-49.

- [Lan X H, Ma D X, Xu M G, Zhou Q W, Zhang G W. 1987. Some geochemical indicators of the Pearl River Delta and their facies significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 7(1): 39-49]
- 李兰,白九江,代玉彪. 2020. 重庆永川汉东城遗址地层记录的长江上游唐代洪水事件. *第四纪研究*, 40(2): 556-567. [Li L, Bai J J, Dai Y B. 2020. Flood event recorded by the layer of Handongcheng Site and its significance to the upper reaches of Yangtze River. *Quaternary Sciences*, 40(2): 556-567]
- 李拓宇,莫多闻,朱高儒,王海斌,张翼飞,郭媛媛. 2013. 晋南全新世黄土剖面常量元素地球化学特征及其古环境意义. *地理研究*, 32(8): 1411-1420. [Li T Y, Mo D W, Zhu G R, Wang H B, Zhang Y F, Guo Y Y. 2013. Geochemical characteristics of major elements and its paleoenvironmental significance of Holocene loess profile in southern Shanxi, China. *Geographical Research*, 32(8): 1411-1420]
- 刘东生. 1985. 黄土与环境. 北京: 科学出版社, 238-264. [Liu D S. 1985. *Loess and Environment*. Beijing: Science Press, 238-264]
- 毛礼米,王伟铭,舒军武,杨小丽. 2011. 长江三角洲地区全新世蕨类孢子与藻类: 以奉贤 DY03 钻孔的产出类型为例. *古生物学报*, 50(2): 154-165. [Mao L M, Wang W M, Shu J W, Yang X L. 2011. Holocene spores and microscopic algae from the Yangtze Delta, East China. *Acta Palaeontologica Sinica*, 50(2): 154-165]
- 孙雄伟,夏正楷. 2005. 河南洛阳寺河南剖面中全新世以来的孢粉分析及环境变化. *北京大学学报(自然科学版)*, 41(2): 289-294. [Sun X W, Xia Z K. 2005. Paleoenvironment changes since mid-Holocene revealed by a palynological sequence from Sihenan profile in Luoyang Henan Province. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 41(2): 289-294]
- 宋德卓,薛积彬,孙升升,钟巍. 2022. 海南小海潟湖沉积物地球化学揭示的近千年气候环境变化. *地球化学*, 51(2): 202-212. [Song D Z, Xue J B, Sun S S, Zhong W. 2022. Climate and environmental changes revealed by sedimentary geochemical elements of the Xiaohai Lagoon (Hainan) during the last millennium. *Geochimica*, 51(2): 202-212]
- 王浩宇,张玉柱,黄春长,谭志海,邱海军,王宁练,贾雅娜,邹明博,于艺堃,阿依迪那·赛勒别克. 2021. 洛阳盆地龙山文化晚期大洪水地球化学特征及其社会影响研究. *地层学杂志*, 45(2): 168-179 [Wang H Y, Zhang Y Z, Huang C C, Tan Z H, Qiu H J, Wang N L, Jia Y N, Zou M B, Yu Y K, A Yi-dina S. 2021. Geochemical characteristics and social influence of paleoflood events in the late Longshan culture within the Luoyang Basin. *Journal of Stratigraphy*, 45(2): 168-179]
- 夏正楷,杨晓燕. 2003. 我国北方 4 ka B. P. 前后异常洪水事件的初步研究. *第四纪研究*, 23(6): 667-674. [Xia Z K, Yang X Y. 2003. Preliminary study on the flood events about 4 ka B. P. in north China. *Quaternary Sciences*, 23(6): 667-674]
- 熊尚发,朱园健,周茹,卢海建,丁仲礼. 2008. 白水黄土—红黏土化学风化强度的剖面特征与粒度效应. *第四纪研究*, 28(5): 812-821. [Xiong S F, Zhu Y J, Zhou R, Lu H J, Ding Z L. 2008. Chemical weathering intensity and its Grain-size dependence for the loess-red clay deposit of the Baishui section, Chinese loess plateau. *Quaternary Science*, 28(5): 812-821]
- 徐佳佳. 2017. 成都平原中晚全新世典型遗址环境考古研究. 南京大学博士学位论文. [Xu J J. 2017. Mid to Late Holocene environmental archaeology in Chengdu Plain, China. Doctoral dissertation of Nanjing University]
- 许俊杰,莫多闻,王辉,周昆叔. 2013. 河南新密溱水流域全新世人类文化演化的环境背景研究. *第四纪研究*, 33(5): 954-964. [Xu J J, Mo D W, Wang H, Zhou K S. 2013. Preliminary research of environment archaeology in Zhenshui River, Xinmi city, Henan. *Quaternary Sciences*, 33(5): 954-964]
- 许清海,李润兰,朱峰,阳小兰,梁文栋. 2001. 华北平原冲积物孢粉沉积相研究. *古地理学报*, 3(2): 55-63. [Xu Q H, Li R L, Zhu F, Yang X L, Liang W D. 2001. Pollen sedimentary facies of fluvial sediments on North China Plain. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 3(2): 55-63]
- 徐小涛,邵龙义. 2018. 利用泥质岩化学蚀变指数分析物源区风化程度时的限制因素. *古地理学报*, 20(3): 515-522. [Xu X T, Shao L Y. 2018. Limiting factors in utilization of chemical index of alteration of mudstones to quantify the degree of weathering in provenance. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 20(3): 515-522]
- 徐新文,赵庆,邱海军. 2020. 黄土磁化率对千年—百年尺度气候事件的记录及其古气候意义. *西北大学学报(自然科学版)*, 50(3): 411-419 [Xu X W, Zhao Q, Qiu H J. 2020. Millennial and centennial time scale climate change recorded by Chinese loess magnetic susceptibility and its paleoclimatic implications. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 50(3): 411-419]
- 杨坤美,向芳,台梓含,王运生,由文智,喻显涛. 2022. 巧家盆地第四纪孢粉特征及其古气候意义. *成都理工大学学报(自然科学版)*, 49(3): 324-337. [Yang K M, Xiang F, Tai Z H, Wang Y S, You W Z, Yu X T. 2022. Quaternary sporopollen characteristics and paleoclimate significance in Qiaojia Basin, Yunnan Province, China. *Journal of Chengdu University of Technology (Science & Technology Edition)*, 49(3): 324-337]
- 杨守业,蒋少涌,凌洪飞,夏小平,孙敏,王德杰. 2007. 长江河流沉积物 Sr-Nd 同位素组成与物源示踪. *中国科学(D 辑: 地球科学)*, 37(5): 682-690. [Yang S Y, Jiang S Y, Ling H F, Xia X P, Sun M, Wang D J. 2007. Sr-Nd isotopic composition and provenance tracing of sediments in the Yangtze River. *Science China: Earth Sciences*, 37(5): 682-690]
- 杨晓燕,夏正楷,崔之久. 2005. 黄河上游全新世特大洪水及其沉积特征. *第四纪研究*, 25(1): 80-85. [Yang X Y, Xia Z K, Cui Z J. 2005. Holocene extreme floods and its sedimentary characteristic in the upper reaches of the Yellow River. *Quaternary Sciences*, 25(1): 80-85]
- 杨宇哲,岳大鹏,赵景波,王晓宁,刘怡婷,刘蓉. 2023. 陕西横山地区 L₃ 黄土与 S₃ 古土壤元素地球化学特征与环境变化. *地理科学进展*, 42(2): 364-379. [Yang Y Z, Yue D P, Zhao J B, Wang X N, Liu Y T, Liu R. 2023. Characteristics of geochemical weathering of L₃ and S₃ loess-paleosol section in the Hengshan area, Shaanxi Province. *Progress in Geography*, 42(2): 364-379]
- 殷志强,秦小光. 2010. 末次冰期以来松嫩盆地东部榆树黄土堆积及其环境意义. *中国地质*, 37(1): 212-222. [Yin Z Q, Qin X G. 2010. The Yushu loess deposition in eastern Songnen Basin since the

- last glacial period and its environmental significance. *Geology in China*, 37(1): 212-222]
- 张虎才, 张文翔, 常凤琴, 杨伦庆, 雷国良, 杨明生, 蒲阳, 类延斌. 2009. 稀土元素在湖相沉积中的地球化学分异: 以柴达木盆地贝壳堤剖面为例. *中国科学(D辑: 地球科学)*, 39(8): 1160-1169. [Zhang H C, Zhang W X, Chang F Q, Yang L Q, Lei G L, Yang M S, Pu Y, Lei Y B. 2009. Geochemical differentiation of rare earth elements in lacustrine sediments: taking the shell dyke section of Qaidam Basin as an example. *Science China (Series D: Earth Sciences)*, 39(8): 1160-1169]
- 张俊娜, 夏正楷. 2011. 中原地区 4 ka BP 前后异常洪水事件的沉积证据. *地理学报*, 66(5): 685-697. [Zhang J N, Xia Z K. 2011. Deposition evidences of the 4 ka BP flood events in Central China Plains. *Acta Geographica Sinica*, 66(5): 685-697]
- 张俊娜, 夏正楷. 2012. 洛阳二里头遗址南沉积剖面的粒度和磁化率分析. *北京大学学报(自然科学版)*, 48(5): 737-743. [Zhang J N, Xia Z K. 2012. Analysis on grain size and magnetic susceptibility of the sediment section in the south of Erlitou site, Luoyang. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 48(5): 737-743]
- 张玉柱, 黄春长, 庞奖励, 查小春, 周亚利, 周自翔, 王娟, 顾洪亮. 2012. 泾河下游古洪水滞流沉积物地球化学特征研究. *沉积学报*, 30(5): 900-908. [Zhang Y Z, Huang C C, Pang J L, Zha X C, Zhou Y L, Zhou Z X, Wang J, Gu H L. 2012. Geochemical characteristics of the Holocene flood slack water Deposits in the Lower Reaches of the Jinghe River. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(5): 900-908]
- 张振球, 张伟宏, 刘树双, 翟秀敏, 邵庆丰. 2023. 贵州石笋记录的中晚全新世东亚夏季风变化. *沉积学报*, 41(1): 196-205. [Zhang Z Q, Zhang W H, Liu S S, Zhai Q M, Shao Q F. 2023. Variation in the East Asian Summer Monsoon during the Middle and Late Holocene inferred from a stalagmite record in Guizhou, China. *Acta Sedimentologica Sinica*, 41(1): 196-205]
- 赵辰辰, 王永波, 胥勤勉. 2019. 2.5 Ma 以来中国陆地孢粉记录反映的古气候变化. *海洋地质与第四纪地质*, 40(4): 175-191. [Zhao C C, Wang Y B, Xu Q M. 2019. Climate changes on Chinese continent since 2.5 Ma: evidence from fossil pollen records. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 40(4): 175-191]
- 赵宏飞. 2018. 近 1 万年以来特征时期黄土高原土壤侵蚀及其对黄河下游沉积的影响. 西北农林科技大学硕士学位论文. [Zhao H F. 2018. Soil erosion in the Loess Plateau and its impact on sedimentation in the Lower Yellow River in the past 10,000 years. Masteral dissertation of Northwest A & F University]
- 赵一阳, 喻德科. 1983. 黄海沉积物的地球化学分析. *海洋与湖沼*, 14(5): 432-446. [Zhao Y Y, Yu D K. 1983. Geochemical analysis of the Yellow Sea sediments. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 14(5): 432-446]
- 赵占仑, 温小浩, 汤连生, 李保生, 牛东风, 孟洁, 杨庆江. 2018. 化学蚀变指数指示古气候变化的适用性探讨. *沉积学报*, 36(2): 333-353. [Zhao Z L, Wen X H, Tang L S, Li B S, Niu D F, Meng J, Yang Q J. 2018. Applicability of chemical alteration index to indication of paleoclimate change by different sedimentary facies. *Acta Sedimentologica Sinica*, 36(2): 333-353]
- 中国社会科学院考古研究所. 2014. 二里头: 1999~2006. 北京: 文物出版社, 1239-1263. [Institute of Archaeology, Chinese Academy of SoCIAL Sciences. 2014. Erlitou: 1999-2006. Beijing: Cultural Relics Publishing House, 1239-1263]
- 朱诚, 于世永, 史威, 戴东升, 赵宁曦. 1997. 南京江北地区全新世沉积与古洪水研究. *地理研究*, 16(4): 24-31. [Zhu C, Yu S Y, Shi W, Dai D S, Zhao N X. 1997. Holocene deposits and paleofloods on the north bank of the Yangtze River, Nanjing area. *Geographical Research*, 16(4): 24-31]
- 朱诚, 郑朝贵, 马春梅, 孙智彬, 朱光耀, 王慧麟, 高华中, 王朋岭, 黄润. 2005. 长江三峡库区中坝遗址地层古洪水沉积判别研究. *科学通报*, 50(20): 58-68. [Zhu C, Zheng C G, Ma C M, Sun Z B, Zhu G Y, Wang H L, Gao H Z, Wang P L, Huang R. 2005. Study on the discrimination of ancient flood deposits in the Zhongba Site of the Three Gorges Reservoir Area of the Yangtze River. *Chinese Science Bulletin*, 50(20): 58-68]
- 邹春辉, 赵强, 毛龙江. 2020. 鲁北平原东部巨淀湖岩心沉积物记录的全新世环境演变. *古地理学报*, 22(6): 1209-1220. [Zou C H, Zhao Q, Mao L J. 2020. Holocene environmental evolution recorded by core sediments of Judian Lake in the east of Lubei Plain, Shandong Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 22(6): 1209-1220]
- 邹晓君, 马运强, 李志忠, 靳建辉, 刘瑞, 谭典佳, 陶通炼. 2023. 古尔班通古特沙漠南缘风沙沉积记录的中晚全新世气候变化. *中国沙漠*, 43(6): 98-110. [Zou X J, Ma Y Q, Li Z Z, Jin J H, Liu R, Tan D J, Tao T L. 2023. Mid-Late Holocene climate change recorded by eolian sand deposition in the southern margin of Gurbantunggut Desert. *Journal of Desert Research*, 43(6): 98-110]
- An C B, Tang L Y, Barton L, Chen F H. 2005. Climate change and cultural response around 4000 cal yr B. P. in the western part of Chinese Loess Plateau. *Quaternary Research*, 63(3): 347-352.
- Bond G, Showers W, Cheseby M, Lotti R, Almasi P, de Menocal P, Priore P, Cullen H, Hajdas I, Bonani G. 1997. A pervasive millennial-scale cycle in north Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 278(5341): 1257-1266.
- Borges J B, Huh Y, Moon S, Noh H. 2008. Provenance and weathering control on river bed sediments of the eastern Tibetan Plateau and the Russian Far East. *Chemical Geology*, 254(1-2): 52-72.
- Cai Y J, Tan L C, Cheng H, An Z S, Edwards R L, Kelly M J, Kong X G, Wang X F. 2010. The variation of summer monsoon precipitation in Central China since the last deglaciation. *Earth and Planetary Science Letters*, 291: 21-31.
- de Menocal P B. 2001. Cultural responses to climate change during the Late Holocene. *Science*, 292(5517): 667-673.
- Gu Z D, Jian X, Liu G X. 2023a. A new age, provenance and tectono-sedimentary setting of the middle Dengying Formation of the terminal Ediacaran in the western Yangtze Block, South China. *Marine and Petroleum Geology*, 157: 106509.
- Gu Z D, Jian X, Liu G X, Shen X T, Fu H J, Zhai X F, Jiang H. 2023b. Age, provenance and tectonic setting of the Tonian-Cryogenian clastic successions in the northwest Bikou terrane, NW Yangtze Block, Cen-

- tral China. *Precambrian Research*, 397: 107197.
- Guo Y Q, Huang C C, Pang J L, Zha X C, Zhou Y L, Wang L S, Zhang Y Z, Hu G M. 2015. Investigating extreme flood response to Holocene palaeoclimate in the Chinese monsoonal zone: a palaeoflood case study from the Hanjiang River. *Geomorphology*, 238: 187–197.
- Hu C Y, Henderson G M, Huang J H, Xie S C, Sun Y, Johnson K R. 2008. Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth and Planetary Science Letters*, 266: 221–232.
- Huang C C, Pang J L, Zha X C, Zhou Y L, Su H X, Li Y Q. 2010. Extraordinary Floods of 4100–4000 a BP recorded at the Late Neolithic Ruins in the Jinghe River Gorges, Middle Reach of the Yellow River, China. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 289: 1–9.
- Hutton J. 1977. Titanium and zirconium minerals. Dixon J B, Wed S B, Minerals in soil environments. Madison: Soil Science Society of America, 673.
- Jian X, Guan P, Zhang W, Feng F. 2013. Geochemistry of Mesozoic and Cenozoic sediments in the northern Qaidam Basin, northeastern Tibetan Plateau: implications for provenance and weathering. *Chemical Geology*, 360: 74–88.
- Lacey J P, Evrard O, Smith H G, Blake W H, Olley J M, Minella J P G, Owens P N. 2017. The challenges and opportunities of addressing particle size effects in sediment source fingerprinting: a review. *Earth-Science Reviews*, 169: 85–103.
- Li F, Yang S, Breecker D O, Ramos E J, Huang X, Duan Z, Guo Y L, Li C, Mei X. 2022b. Responses of silicate weathering intensity to the Pliocene-Quaternary cooling in East and Southeast Asia. *Earth and Planetary Science Letters*, 578: 117301.
- Li P, Zhang C X, Wu H B, Gao Z W. 2022a. Geochemical characteristics of Holocene loess-paleosol sequences in central Chinese Loess Plateau and their implications for East Asian monsoon evolution. *Quaternary International*, 616: 99–108.
- McLennan S M. 1993. Weathering and global denudation. *Journal of Geology*, 101(2): 295–303.
- Nesbitt H W, Young G M. 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 229: 715–717.
- Ren X L, Xu J J, Wang H, Storzum M, Lu P, Mo D W, Li T Y, Xiong J G, Kidder T R. 2021. Holocene fluctuations in vegetation and human population demonstrate social resilience in the prehistory of the Central Plains of China. *Environmental Research Letters*, 16: 055030.
- Staubwasser M, Sirocko F, Grootes P M, Segl M. 2003. Climate change at the 4.2 ka termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability. *Geophysical Research Letters*, 30: 1425–1429.
- Storzum M J, Mo D W, Wang H, Ren X L, Zhang Y F, Kidder T. R. 2017. Anthropogenic origins of a late Holocene, basin-wide unconformity in the middle reaches of the Yellow River, the Luoyang Basin, Henan Province, China. *Quaternary Research*, 87(3): 423–441.
- Sun W W, Ni Z Y, Meng X Q, Jiang Q F, Zhang E L. 2021. Environmental change recorded by radionuclides and organic geochemical signatures in a sediment core from Lake Daihai, North China. *Catena*, 206: 105564.
- Sun Q L, Liu Y, Wünnemann B, Peng Y J, Jiang X Z, Deng L J, Chen J, Li M T, Chen Z Y. 2019. Climate as a factor for Neolithic cultural collapses approximately 4000 years BP in China. *Earth-Science Reviews*, 197: 102915.
- Tan L C, Shen C C, Cai Y J, Cheng H, Edwards R L. 2018. Great flood in the middle-lower Yellow River reaches at 4000 a BP inferred from accurately-dated stalagmite records. *Science Bulletin*, 63(4): 206–208.
- Tan L C, Li Y Z, Wang X Q, Cai Y J, Lin F Y, Cheng H, Ma L, Sinha A, Edwards R L. 2020. Holocene monsoon change and abrupt events on the western Chinese Loess Plateau as revealed by accurately-dated *stalagmites*. *Geophysical Research Letters*, 47(20): e2020GL090273.
- Wang D D, Li M Y, Zhang S R, Xu Q H, Wu L W. 2022. Spatial and temporal characteristics of the precipitation response to the 4.2 ka event in the Asian summer monsoon region. *Global and Planetary Change*, 214: 103854.
- Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, He Y Q, Kong X G, An Z S, Wu J Y, Kelly M J, Dykoski C A, Li X D. 2005. The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science*, 308(5728): 854–857.
- Wu Q L, Zhao Z J, Liu L, Granger D E, Wang H, Cohen D J, Wu X H, Ye M L, Yosef O B, Lu B, Zhang J, Zhang P Z, Yuan D Y, Qi W Y, Cai L H, Bai S B. 2016. Outburst flood at 1920 BCE supports historicity of China's Great Flood and the Xia dynasty. *Science*, 353(6299): 579–582.
- Wu W X, Liu T S. 2004. Possible role of the “Holocene Event 3” on the collapse of Neolithic Cultures around the Central Plain of China. *Quaternary International*, 117(1): 153–166.
- You H F, Li Y C, Zhang S R, Ge Y W, Zhang Z, Zhang W S, Wang Y, Fan B S, Wang R R, Cao Y H, Li C G. 2024. Climate and sea-level fluctuations on the western coast of Bohai Bay during the 4.2 ka event: multi-proxy evidence from the Nandagang area of Cangzhou, China. *Quaternary Science Reviews*, 324: 108467.
- Zhang J N, Zhang X H, Xia Z K, Xu H, Zhao H T. 2019. Geomorphic changes along the Yiluo River influenced the emergence of the first urban center at the Erlitou Site, Central Plains of China. *Quaternary International*, 521: 90–103.
- Zhao X H, Wang J P, Wei M J, Lai Z P, Fan M J, Zhao J X, Pan B L, Zhao Y H, Li X P, Zhao Q Y. 2017. Optically stimulated luminescence dating of Holocene palaeoflood deposits in the middle reach of the Yongding River, China. *Quaternary International*, 453: 37–47.

(责任编辑 张西娟; 英文审校 刘贺娟)