

3 万年来卤阳湖沉积物地球化学元素变化特征及其环境意义

颜永毫^{1,2}, 周杰^{1,3*}, 何忠¹, 周新鄂⁴, 赵克良⁴, 杨林海⁵, 隆浩⁶

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所/西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院昆明分院, 昆明 650204; 4. 中国科学院古脊椎与古人类研究所, 北京 100044;
5. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000; 6. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 利用荧光光谱仪、等离子发射光谱, 测定关中盆地卤阳湖区沉积物(0~280 cm)元素含量变化, 在光释光定年与R型聚类分析基础上, 探讨3万年来该区26种元素的地球化学行为特征及环境意义。结果表明: 卤阳湖沉积物元素大致可分4类: 第1类Si、Zr、Hf、Na, 指示4.6 ka B. P. 后湖泊萎缩, 外源沉积减少; 第2类Ga、U、Sr, 指示4.6 ka B. P. 和2.0 ka B. P. 前后的湖区干旱气候; 第3类Cu、Hg、Mn、Mg, 指示4.6 ka B. P. 后湖水咸度的增加; 第4类Ti、Sb、Pb、V、Th、Co、Fe、Bi、Cs、Zn、Ni、Rb、Ga、K、Al, 这15种元素指示湖水咸度与周边人为活动的增加。元素变化特征说明, 卤阳湖在33~10.4 ka B. P. 之间, 沉积环境稳定, 全新世前期(10.4~4.6 ka B. P.)湖水变淡, 4.6 ka B. P. 后, 外源沉积减少, 湖水咸度升高, 在2.0 ka B. P. 前后, 湖泊干旱造成大量盐分生成, 之后, 虽气候转湿, 但人为活动增加使湖泊快速走向衰亡。

关键词: 湖泊沉积物; 气候变化; 地球化学元素; 卤阳湖

中图分类号: P595 文献标识码: A 文章编号: 1009-2242(2016)03-0208-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2016.03.036

The Characteristics of Geochemical Elements in Luyang Lake Sediments and Its Paleoclimatic Environmental Implications for the Last 30,000 Years

YAN Yonghao^{1,2}, ZHOU Jie^{1,3}, HE Zhong¹, ZHOU Xinying⁴,
ZHAO Keliang⁴, YANG Linhai⁵, LONG Hao⁶

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049; 3. Kunming Branch, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650204; 4. Institute of Vertebrate Paleontology and Paleoanthropology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100044; 5. Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000;
6. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

Abstract: The characteristics of 26 geochemical elements and their environmental implications in Luyang Lake sediments (0~280 cm) for the last 30,000 years in Guanzhong basin were discussed based on the element contents determined by fluorescence spectrometer and plasma emission spectrometry, the OSL dating results and the R-type cluster analysis. Results showed the geochemical elements in Luyang Lake sediments could be divided into four categories: The first include Si, Zr, Hf, Na, indicating the decreased exogenous clastics and the lake shrink after 4.6 ka B. P., the second included Ga, U, Sr, indicating the arid climate at 4.6 ka B. P. and 2.0 ka B. P., the third included Cu, Hg, Mn, Mg, indicating the increasing lake salty since 4.6 ka B. P., the fourth contained 15 elements, Ti, Sb, Pb, V, Th, Co, Fe, Bi, Cs, Zn, Ni, Rb, Ga, K, Al, indicating the increasing lake salinity and the human activities around the lake. Different behaviors of geochemical elements in Luyang Lake indicated the sedimentary environment in Luyang Lake was stable between 33 ka B. P. and 10.4 ka B. P., then the lake salinity decreased in the early Holocene (10.4~4.6 ka B. P.) while increased after 4.6 ka B. P. accompanying with the reduced exogenous clastics. The drying process at 2.0 ka B. P. caused a lot of salt formation, then the climate turned relatively wet, however, the increasing human activities accelerated the lake disappearance.

Key words: lake sediments; climate change; geochemical elements; Luyang Lake

收稿日期: 2016-01-23

资助项目: 中国科学院战略先导专项(XDB03020300); 国家自然科学基金项目(41472156); 中国科学院西部之光(Z111021308); 西北农林科技大学基础科研项目基金(Z109021430, Z109021537); 留学基金委访学学者项目(201504910452)

第一作者: 颜永毫(1986—), 男, 博士研究生, 主要从事侵蚀环境演变研究。E-mail: yanyonghao111@126.com

通信作者: 周杰(1964—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事环境演变与可持续发展研究。E-mail: zhoujie@ms.xab.ac.cn

湖泊沉积物作为流域物质的汇,保存着有关流域气候、自然环境以及人类活动变化方面的大量信息^[1,2]。因此,研究湖泊沉积物地球化学元素特征,是提取古环境古气候信息,重建沉积环境序列,评价人为活动对环境影响的重要方法^[3,4]。湖泊沉积物中的元素来源可分为流域侵蚀外源碎屑成分和水体内生沉淀成分2类^[5]。因此,湖泊沉积物元素变化不仅与流域内的植被、地形、气候等环境因素有关,而且与湖水温度、酸碱度、氧化还原状态等湖水自身物化性质有关^[6,7]。沉积物化学元素变化特征是多种环境因素共同作用的结果。

不同元素在湖泊沉积物中的环境指示意义不同。元素Al、Si、K、Ti在多数研究中均被认为与外源碎屑物质输入有关^[8]。而元素Ca、Sr易迁移,其富集程度与湖泊水位、矿化度有密切关系。Zr多富集于重矿物中,与粗颗粒沉积物有很高的相关性^[9]。研究中,除了利用单一元素含量变化特征,还可借助 $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、Rb/Sr、CIA、ICV、气候C值等多种不同元素的组合变化特征来进行沉积物区域环境变迁的研究^[7,10]。

湖泊沉积物元素的影响因素众多,变化特征复杂。不同区域条件下的湖泊沉积物元素对环境变迁的响应特征存在较大差别,并没有一致结论^[4]。因此,对某一地区而言,需要开展本地化试验验证,才能确定该地区湖泊沉积物地球化学元素行为特征与气候环境变化的关系。

本研究选取关中盆地卤阳湖区为对象,采用XRF荧光光谱仪、ICP-AES等离子发射光谱仪,对该地区湖泊沉积物中多种化学元素含量进行测定,并通过聚类分析方法进行了归类,在前期工作基础上,讨论了卤阳湖区元素地球化学行为对气候环境变化的响应特征,以期增加对利用湖泊沉积物地球化学元素反演气候环境变化信息的认识,为后续该地区长时间尺度研究工作奠定基础。

1 研究区概况及样品采集

卤阳湖位于陕西省关中盆地东北部与渭北黄土高原台塬区交接部分,处在蒲城县与富平县交界,属古三门湖在关中盆地的子遗湖泊。湖区地势开阔,由西北向东南倾斜,东西长18.4 km,南北平均宽4.1 km,属暖温带大陆性季风气候,年均气温14.5℃,降水521.8 mm,土质粘重,土壤类型以盐化潮土为主。卤阳湖区现今可分为东滩和西滩两部分,人工硝池占比较大,其次是芦苇沼泽,东滩开挖有人工湖——天骄湖,湖区周边为盐碱改良农地包围^[11]。

采样点位于卤阳湖区东滩天骄湖东侧,采样时间为2014年4月。采样时,该处正为修建一码头进行地基开挖,开挖深度大约3.5 m。因此,我们自剖面顶端向下每隔2 cm,采样140个,总深度为280 cm,

并分别于5,35,65,80,100,140,200,280 cm处,用直径2.5 cm、长约20 cm的无缝钢管垂直砸入剖面,采集光释光定年样品。采集后用锡纸包裹钢管,并装于黑色布袋中避光保存。

2 试验方法和数据分析

(1)样品测定:元素测定以剖面深度80 cm为界,以上每隔4 cm测定一个样品,以下每隔8 cm测定一个样品,共测定54个样品。

(2)光释光定年:定年样品送于中科院南京地理与湖泊研究所释光年代实验室进行测定,首先用盐酸和双氧水去除样品中碳酸盐和有机质,然后用氢氟酸对提取后样品进行刻蚀,接着用稀盐酸洗净氟化物后,使用红外信号检测保证无长石污染,最后用硅油把石英样品平铺至不锈钢片上进行测试,具体方法可参见该文献^[12]。

(3)元素测定:主量元素测定采用XRF荧光光谱仪,具体过程是加入硝酸锂助熔剂,充分混合后,高温熔融(约1000℃),然后将熔融物倒入铂金模子,形成扁平玻璃片后,再利用XRF(Axios Max PANalytica,荷兰)进行测定,最后结果换算成氧化物以百分含量(%)表示。微量金属元素测定用ICP-AES等离子体发射光谱进行,需用高氯酸、硝酸、氢氟酸和盐酸进行消解,蒸干后用稀硝酸溶液定容,再用ICP-AES(Varian VISTA,美国)测定,结果用 $\mu\text{g/g}$ 表示。

(4)数据分析:利用SPSS 17.0软件,采用R型聚类方法对样本按个案进行聚类分析,操作过程中选用组间联接方法,度量标准选择Pearson相关系数进行。

3 结果与分析

3.1 天骄湖剖面岩性特征、年代框架与气候变化背景

天骄湖剖面概况和光释光定年结果见图1。剖面自下而上依颜色可分为4个单元:单元4,280~140 cm(33.4~10.7 ka B. P.),浅棕色,主要由粗粉砂构成,有机质含量少;单元3,140~80 cm(10.7~4 ka B. P.),暗棕色,基本由中粉砂构成,有机质含量较高;单元2,80~40 cm(4~2.0 ka B. P.),粒度偏细,主要由细粉砂构成,呈青灰色,50~40 cm段则呈灰白色,含有大量盐分;单元1,40~0 cm(2.0 ka B. P.),主要由黏粒构成,呈棕褐色,有机质含量高。

根据光释光测年结果(图1),天骄湖剖面底界(280 cm)年龄为33.4 ka B. P.,涵盖了末次冰盛期(26~19 ka B. P.)^[13]以来的气候变化信息。根据定年及前期碳酸盐研究结果,可将卤阳湖区气候变化分为以下2个阶段:(1)末次冰期阶段(33.4~10.7 ka B. P.),气候干冷,在18 ka B. P.左右达到极盛,之后进入冰消期(18~10.7 ka B. P.),气候开始回暖,降水逐渐增多;(2)全新世阶段

(10.7 ka B.P. ~至今),气候加速回暖,并于 7.5~4.6 ka B.P.,达到降水气温的最适宜期(大暖期),4.6 ka B.P.后,气候整体变冷干,2.0 ka B.P.前后干旱较强烈,之后气候相对转湿并保持稳定。

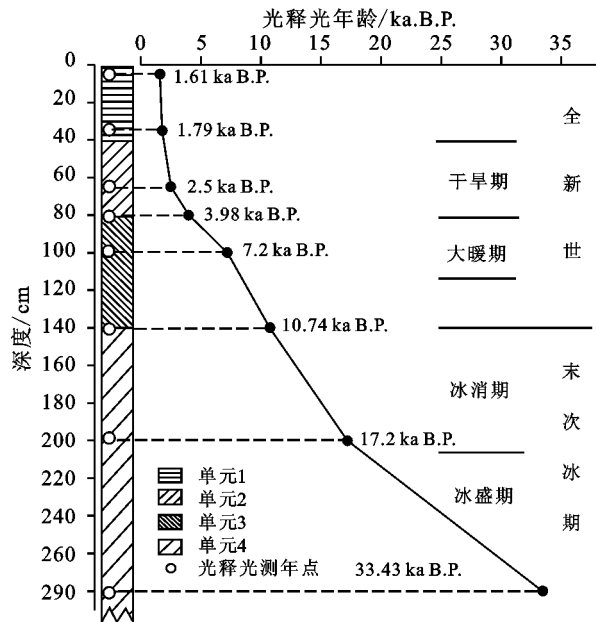


图 1 天骄湖剖面岩性特征、光释光定年结果及气候期划分

3.2 元素分类结果与变化特征

利用 R 型聚类方法,可对地球化学行为相似的元素进行归类。根据图 2 中的聚类分析结果,大致可将元素剖面变化曲线分为图 3 中的 4 类:

第一类:Si、Na、Hf、Zr,这 4 种元素以 4.6 ka B.P. 为界,变化特征可分 2 个阶段。第一阶段从 33.4 ka B.P. 到 7.5 ka B.P.,含量几无变化,从 7.5 ka B.P. 到 4.6 ka B.P.,含量有微弱增加。第二阶段从 4.6 ka B.P. 至今,整体呈减小趋势,波动较大,在 4.6 ka B.P. 和 2.0 ka B.P. 时有明显减少,2.0 ka B.P. 后,含量稳定。

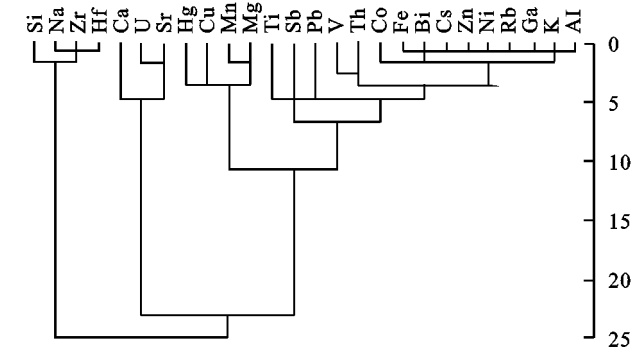


图 2 元素 R 型聚类等级树形图

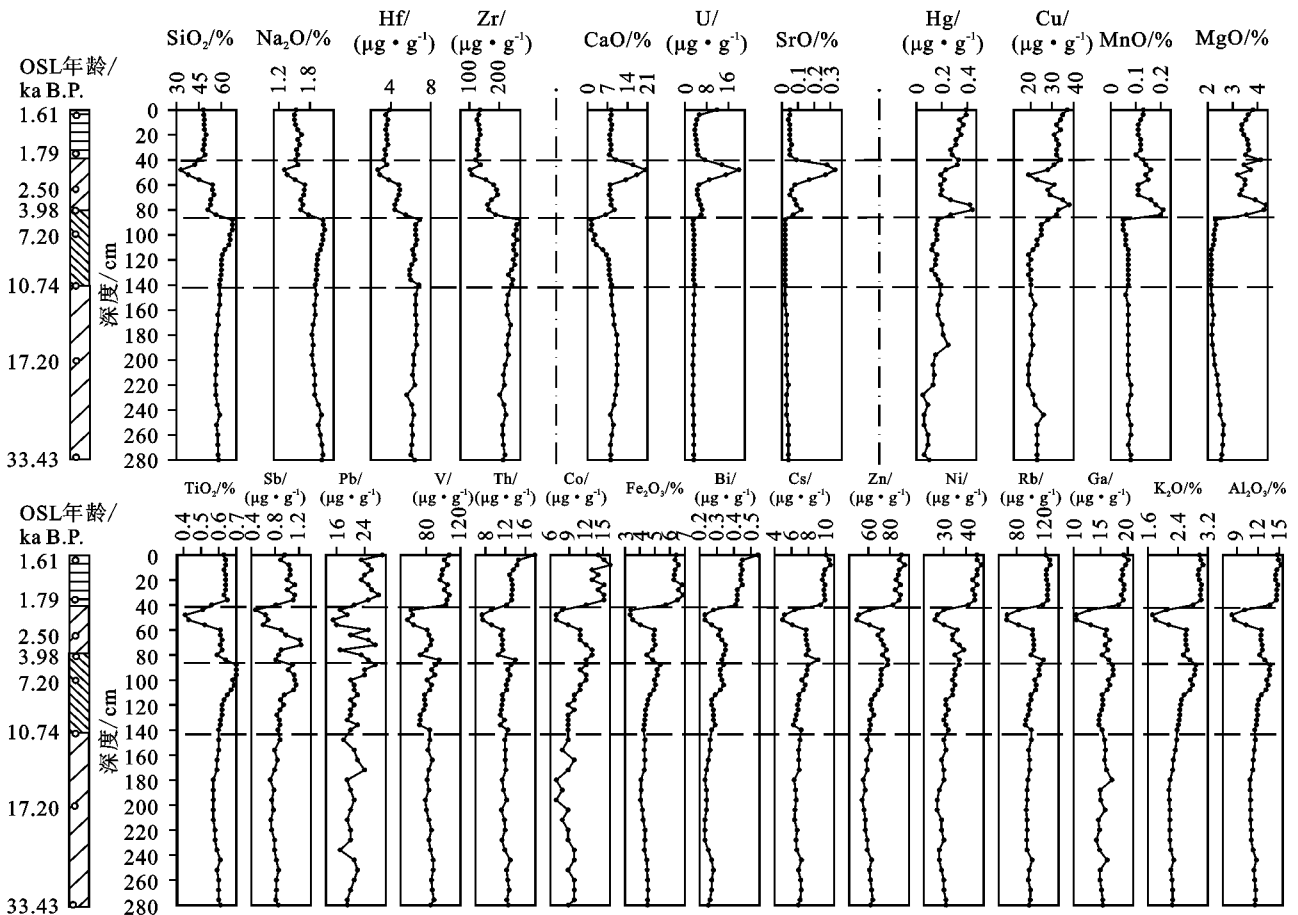


图 3 3 万年来天骄湖剖面元素变化曲线

第二类:Ca、U、Sr,这 3 种元素的变化曲线与第一类元素相反,其中 U、Sr 变化趋势一致。而 Ca 在冰盛期前后稍微有所增加,进入冰消期后含量开始减

少,全新世大暖期(7.2~4.6 ka B.P.)加速减少,达到剖面最低值,4.6 ka B.P.后,含量又突然上升,并在 2.0 ka B.P. 达到高值,之后又迅速下降并保持稳

定。U、Sr 含量高值主要集中于干早期(4.6 ka B. P. 至 2.0 ka B. P.),尤其是在 2.0 ka B. P. 时,达到剖面最高点,而在 4.6 ka B. P. 前,并没有明显变化。

第三类:Hg、Cu、Mg、Mn,这 4 种元素含量在整个剖面呈现逐渐增加的趋势,但也有所差别。4 种元素在进入干早期初期(4.6 ka B. P. 后)有明显增加,但 Mg、Mn 的增加相对 Hg、Cu 表现更突出。Hg 在突然增加后,有相对回落,之后便开始缓慢上升。Cu 在 2.0 ka B. P. 后回落至低点,然后也开始缓慢上升。而 Mg、Mn 在 4.6 ka B. P. 达到剖面最大值后,稍微有所下降,但在 2.0 ka B. P. 后,又有增加,之后保持相对稳定。

第四类:Ti、Sb、Pb、V、Th、Co、Fe、Bi、Cs、Zn、Ni、Rb、Ga、K、Al,这 15 种元素整体呈现增加趋势。33.4 ka B. P. 至 10.7 ka B. P.,变化趋势不大。全新世后,含量快速增加,特别是在 7.2 ka B. P. 至 4.6 ka B. P. 期间,增加较快。4.6 ka B. P. 后,含量下降,并于 2.0 ka B. P. 达到低点,之后快速增加,并保持相对稳定。总体来说,这 15 种元素在近地表 40 cm (2.0 ka B. P.) 上的元素含量要明显大于之前的任何阶段。

4 讨论

湖泊沉积物元素变化特征受控于气候变化、湖泊演化阶段以及人为活动等多种环境条件。因此,沉积物元素在不同环境条件下会表现不同的响应特征。以下从气候变化,湖泊演化,人类活动 3 个方面,结合卤阳湖区域自然条件深入讨论湖泊沉积物地球化学特征及其所反映的气候环境、湖泊演化和人类活动信息。

4.1 元素变化与气候变化关系

从图 3 可见,多数元素经历冰盛期时,元素含量都有细微减少,进入冰消期后,元素含量开始缓慢增加,进入全新世后,元素累积步伐加快,且波动范围也开始增加。这种现象说明,暖期气候条件下的沉积物元素波动要比冷期气候条件下的变化幅度更大,与流域内不同气候期内的风化程度有密切关系。

进入全新世湿润期后(7.5~4.6 ka B. P.),Si、Al、Fe、K、Na、Ti 含量有升高迹象,而 Ca 减少明显,其他多数微量元素上升,暗示暖期气候下流域风化程度的增加。当气候在 4.6 ka B. P. 转干时,Si、Al、Fe、K、Na、Ti 下降明显,而 Ca、Mg、Mn、U、Sr、Hg 则有明显上升。到了干早期(2.0 ka B. P.),Si、Al、Fe、K、Na、Ti 都有明显下降,而 Ca、U、Sr 上升明显,其他大部分微量元素含量也都在下降。当气候后来转入相对湿润阶段,Si、Al、Fe、K、Na、Ti 又有明显上升,而 Ca、U、Sr 则下降明显。

由以上分析可知,沉积物元素并不总对气候变化的波动表现出明显的响应特征。这一方面与气候冷暖

干湿的变化程度有关,另一方面也与气候变化时的湖泊的沉积环境有密切联系。Si、Al、Fe、K、Na、Ti 这些元素主要来自外源碎屑物质沉积,当气候转暖,源区风化程度增加时,湖泊沉积中的元素累积也会相应增加,研究中这六种元素对全新世大暖期的响应比较明显。相对来说,Ca、Sr 的迁移性要比其他元素高,当气候转干地表径流减少时,这些元素仍可通过土壤潜流到达湖泊,从而在强蒸发条件下出现聚集^[14]。降水减少在湖泊沉积物中,最明显的表现就是碳酸盐含量的增加^[3]。Ca、Sr 为强迁移元素,与碳酸盐沉积有关,因此二者在 4.6 ka B. P. 后的含量上升,能够指示全新世后期气候整体转干的趋势。另外,Mg、Mn 对全新世 4.6 ka B. P. 转干也有较大响应,但对 2.0 ka B. P. 的干旱响应并不明显,说明这 2 种元素的沉积还受当时的湖水环境制约。多数微量元素在全新世暖期的累积有增加,干早期到来后,逐渐减少,进入相对湿润期后又有明显增加,且响应幅度远超全新世暖期。由此可见,这些元素对气候变化的响应程度并不与气候变化程度成比例,可能同时受源区风化程度,植被盖度,人为活动等其他因素的影响。

因此,得出卤阳湖湖泊沉积物中 Si、Al、Fe、K、Na、Ti,这 6 种元素的增加能够指示湿润期的存在,而 Ca、Mg、Mn、Sr、U 的增加,则指示干旱气候的存在,今后可利用该结论研究卤阳湖区长时间尺度上的气候变化过程。

4.2 元素变化与湖泊演化关系

卤阳湖区流域物质主要来自北部黄土经地表径流或风力搬运至此,因此其沉积物化学元素背景应与黄土沉积区相同。刘东生先生对洛川黄土地球化学元素的研究表明,黄土主要化学元素为 SiO₂ (50% 以上),Al₂O₃ (10% 以上),CaO 为 (7.5%~10.5%)。而卤阳湖区 Si、Al、Ca 三者波动范围分别为 33%~67%,8.3%~15.3%,1.1%~20.6%。因此,从化学元素组成看,该区沉积物主要来自黄土高原南部台塬丘陵区的侵蚀汇聚。

黄土中的硅主要存在于粗颗粒石英砂(SiO₂)中,因此,沉积物中的硅累积能够说明粗颗粒的沉积,这也与前期粒度变化的研究结果一致。Zr 主要存在于锆石等稳定重矿物中,在湖泊中的沉积也主要依靠河流机械搬运,因此其变化趋势与 Si 相似,而 Hf 常以类质同象形式存在于锆石中,所以二者常伴随存在^[15]。因此,Si、Hf、Zr 3 种稳定型元素在 4.6 ka B. P. 后的突然减少,可能是全新世中期气候转干造成河湖分离导致的,在这种条件下,进入湖泊的粗颗粒物质和稳定性矿物都会明显减少。据此推断,卤阳湖有可能在 4.6 ka B. P. 前后,开始从外流形态向内流封闭状态

转变。通常来说,Na 在干旱封闭的湖泊沉积物中都会有显著增加^[7,14],但我们观察到 Na 在 4.6 ka B. P. 后反而有明显下降,是否与 Na 特殊的地球化学行为有关,还是与长期以来当地的捞硝晒盐有关,需要进一步的研究。高 Mg 含量是湖泊咸化的标志,4.6 ka B. P. 后,沉积物中 Mg 含量增加明显,说明此时湖水咸度已明显上升,与气候转干后的湖水蒸发有密切关系^[16]。由以上分析可知,卤阳湖沉积环境在 4.6 ka B. P. 前后有剧烈变化,受气候变干影响,有可能出现河湖分离,由外流状态转向封闭,湖水咸度在此时也开始上升,并最终演化为盐碱滩。

4.3 元素变化与人类活动关系

据文献考证,卤阳湖区腹地西周时期(公元前 1046—771 年)已有村落形成,说明至少 3 000 年前,卤阳湖已不是大湖^[17]。这与我们推测的 4.6 ka B. P. 后气候转干,湖泊萎缩的背景一致。自周秦汉唐宋辽金元明清,湖区村落不断增加,金(公元 1115—1234 年)已设有屯田寨,可见至少 1 000 年前已开始对卤阳湖进行围垦活动,清代人口快速增加,富平、蒲城两县县志都有关于滩地开垦的记载^[18],建国后也有针对卤阳湖盐碱地的大规模整治活动^[19]。湖区制盐制硝的历史可追溯至西汉,唐明清均有发展,解放初仍有大小作坊无数^[17]。而沉积速率结果表明,2.5 ka B. P. 后湖区沉积速率有明显上升(未发表),说明湖区周边人类活动强度在近 2 000 年内增加较快。

图 3 中大多数与人为活动相关的元素 Cu、Fe、Pb、Co、Ni、Hg、Zn 在 40 cm 以上都有富集,除与湖水咸化,元素浓度增大有关外,人为活动影响是不容忽视的因素。湖泊中微量金属元素的分布有随离岸距离减小而增加的特点^[20],4.6 ka B. P. 气候转干后,随着人为活动的增加,湖泊已开始不断萎缩,推测这些元素在 40 cm 层的富集与湖泊萎缩,与湖心区距污染源距离的减少也有关系。另外,湖泊萎缩后,采样位置黏粒与有机质的增加,都可以对近地表的重金属起到固定吸附作用,从而加剧他们的表层累积。

5 结论

(1) 卤阳湖区湖泊沉积物中 Si、Al、Fe、K、Na、Ti 的增加可以指示湿润期的存在,而 Ca、Mg、Mn、Sr、U 的增加则可指示干旱气候发生。元素对气候变化的响应程度并不与气候变化程度成比例,与湖泊演化所处阶段、人为活动因素也有一定关系。因此,在利用湖泊沉积物化学元素提取古气候古环境变化信息时,一定要结合其他指标,对元素所处气候变化背景,湖水物化性质等因素进行综合分析,才能得出切实可行的结论。

(2) 卤阳湖区 Si、Zr、Hf 指示 4.6 ka B. P. 后,湖泊有可能由外流湖状态开始向内流状态转变。气候

转干有可能造成卤阳湖河湖分离,并导致湖水咸度不断增加,湖面萎缩,并最终造成卤阳湖在围湖造田等人为活动影响下快速演化为盐碱滩。

参考文献:

- [1] 沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望[J]. 湖泊科学, 2009, 21(3): 307-313.
- [2] 王苏民, 薛滨, 沈吉, 等. 我国湖泊环境演变及其成因机制研究现状[J]. 高校地质学报, 2009, (2): 141-148.
- [3] 吴艳宏, 李世杰, 夏威夷. 可可西里苟仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义[J]. 地球科学与环境学报, 2004, 26(3): 64-68.
- [4] 张晓楠, 张灿, 吴铎, 等. 基于 XRF 岩心扫描的中国西部湖泊沉积物元素地球化学特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 163-174.
- [5] Strakhovenko V D, Solotchina E P, Vosel Y S, et al. Geochemical factors for endogenic mineral formation in the bottom sediments of the Tazheran lakes(Baikal area) [J]. Russian Geology and Geophysics, 2015, 56(10): 1437-1450.
- [6] Das B K, Al-Mikhlaifi A S, Kaur P. Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2006, 26(6): 649-668.
- [7] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 等. 湖泊沉积与环境演化[M]. 北京: 科学出版社, 2010: 191-208.
- [8] Morellón M, Valero-Garcés B, Vegas-Vilarrúbia T, et al. Lateglacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain) [J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(25): 2582-2599.
- [9] Kylander M E, Ampel L, Wohlfarth B, et al. High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: new insights from chemical proxies [J]. Journal of Quaternary Science, 2011, 26(1): 109-117.
- [10] Chen L, Shen H, Jia Y, et al. Environmental change inferred from Rb and Sr of lacustrine sediments in Huangqihai Lake, Inner Mongolia [J]. Journal of Geographical Sciences, 2008, 18(3): 373-384.
- [11] 郗敏, 孔范龙, 李悦, 等. 陕西渭南卤阳湖湿地保护与恢复工程措施探析[J]. 湿地科学, 2013, 11(2): 254-258.
- [12] Long H, Shen J, Wang Y, et al. High-resolution OSL dating of a late Quaternary sequence from Xingkai Lake (NE Asia): Chronological challenge of the "MIS3 a Mega-paleolake" hypothesis in China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2015, 428: 281-292.
- [13] Clark P U, Dyke A S, Shakun J D, et al. The Last Glacial Maximum [J]. Science, 2009, 325(5941): 710-714.

(下转第 219 页)

物因素(土壤物理结构和化学性质)等,进而影响SOC、DOC与DON的空间分布特征。阳坡土壤更有利于SOC的累积,阴坡则有利于提高土壤DON储量,混交林胸高断面面积的大小则对土壤DOC空间分布有较大的影响。土层深度显著影响SOC、DOC和DON储量($p < 0.01$),均随土壤层加深而降低,呈表层富集现象。土壤物理性质(土壤湿度、紧实度及土壤中颗粒组成)对SOC、DOC及DON的空间分布有重要的影响。土壤中SOC、DOC及DON含量与土壤全氮、有效氮、速效磷和速效钾等含量存在着显著的相关性,说明其空间分布与土壤养分含量高低也有一定的关系。土壤DOC与DON是土壤养分的重要来源,采取科学措施增强土壤有机质或腐殖质向溶解性有机质的转化,将有利于改善土壤质量,提高土壤肥力。

参考文献:

- [1] 万晓华,黄志群,何宗明,等.杉木采伐迹地造林树种转变对土壤可溶性有机质的影响[J].应用生态学报,2014,25(1):12-18.
- [2] Müller M, Alewell C, Hagedorn F. Effective retention of litter-derived dissolved organic carbon in organic layers [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(6): 1066-1074.
- [3] Rovira P, Vallejo V R. Labile, recalcitrant, and inert organic matter in Mediterranean forest soils [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 39(1): 202-215.
- [4] 白爱芹,傅伯杰,曲来叶,等.重度火烧迹地微地形对土壤微生物特性的影响:以坡度和坡向为例[J].生态学报,2013,33(17):5201-5209.
- [5] 蒲玉琳,刘世全,张世熔,等.横断山区北段山地土壤基本属性的坡向分异[J].水土保持学报,2008,22(6):112-117.
- [6] Mulla D J. Mapping and managing spatial patterns in soil fertility and crop yield[M]//Robert P C, Rust R H, Larson W E. Proceedings of soil specific crop management, Madison, WI:ASA,CSSA,SSSA,1993:15-26.
- [7] 刘钦.黄山松人工林形高与断面积和疏密度的关系[J].林业科技开发,2003,17(S1):19-20.
- [8] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000:30-107.
- [9] 祖元刚,李冉,王文杰,等.我国东北土壤有机碳、无机碳含量与土壤理化性质的相关性[J].生态学报,2011,31(18):5207-5216.
- [10] Mi N, Wang S, Liu J, et al. Soil inorganic carbon storage pattern in China[J]. Global Change Biology, 2008,14(10):2380-2387.
- [11] 陈印平,夏江宝,曹建波,等.黄河三角洲盐碱地不同混交林土壤可溶性有机碳氮的研究[J].水土保持通报,2013,33(5):87-91,104.
- [12] 王清奎,汪思龙,冯宗炜.杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J].生态学报,2005,25(6):1299-1305.
- [13] 俞元春,李淑芬.江苏下蜀林区土壤溶解有机碳与土壤因子的关系[J].土壤,2003,35(5):424-428.
- [14] 范叶青,周国模,施拥军,等.坡向坡位对毛竹林生物量与碳储量的影响[J].浙江农林大学学报,2012,29(3):321-327.
- [15] 赵彤,蒋跃利,闫浩,等.黄土丘陵区不同坡向对土壤微生物生物量和可溶性有机碳的影响[J].环境科学,2013,34(8):3223-3230.
- [16] 汪文霞,周建斌,严德翼,等.黄土区不同类型土壤微生物量碳、氮和可溶性有机碳、氮的含量及其关系[J].水土保持学报,2006,20(6):103-106,132.
- [17] 汪景宽,李丛,于树,等.不同肥力棕壤溶解性有机碳、氮生物降解特性[J].生态学报,2008,28(12):6165-6171.
- [18] 张彪,高人,杨玉胜,等.万木林自然保护区不同林分土壤可溶性有机氮含量[J].应用生态学报,2010,21(7):1635-1640.
- [19] 陈高起,傅瓦利,沈艳,等.岩溶区不同土地利用方式对土壤有机碳及其组分的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):123-129.
- [20] 张勇,秦嘉海,赵芸晨,等.黑河上游冰沟流域不同林地土壤理化性质及有机碳和养分的剖面变化规律[J].水土保持学报,2013,27(2):126-130.
- [21] 杨丹,项文化,方晰,等.石栎—青冈常绿阔叶林土壤有机碳和全氮空间变异特征[J].生态学报,2014,34(12):3452-3462.
- [14] 曾艳,陈敬安,朱正杰,等.湖泊沉积物Rb/Sr比值在古气候/古环境研究中的应用与展望[J].地球科学进展,2011,26(8):805-810.
- [15] 移根旺. 锆石成因矿物学研究[J].中国水运,2008,8(6):259-260.
- [16] 曹雯,夏正楷.河南孟津寺河南中全新世湖泊沉积物的易溶盐测定及其古水文意义[J].北京大学学报(自然科学版),2008,44(6):933-937.
- [17] 同文娟,同绿云. 卤阳湖史话[N].渭南日报,2011-06-17.
- [18] 周杰,李小强.关中—天水经济区环境与可持续发展[M].北京:科学出版社,2012:49.
- [19] 徐蕊,王阳. 卤阳湖:凤凰涅槃般的华丽重生[N].渭南日报,2014-11-19.
- [20] 喻劲松,周国华,马生明,等.武汉主要湖泊重金属污染的特点研究[J].物探化探计算技术,2007,29(Z1):243-248.

(上接第212页)