

# 哈拉湖岩芯 XRF 扫描元素统计分析及其环境意义

马雪洋, 陈 豆, 阳亚平, 张玉枝, 张家武

(兰州大学西部环境教育部重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

**摘要:**青藏高原东北缘高山湖泊哈拉湖是位于季风与西风影响的交汇带的封闭深水湖泊, 是区域环境和气候变化的良好记录载体。目前对该湖的研究还较少, 缺乏对沉积物中元素环境意义的系统认识。通过高分辨率 XRF 岩芯扫描, 用相关、聚类和因子分析的方法对哈拉湖沉积岩芯地球化学元素进行分析。结果显示 Ti、K、Si、Al、Fe、Mn 等元素变化一致, 相关性高, 归为同一类, 即径流输入的陆源碎屑组分, 反映了流域水文状况如径流量的变化。Sr、Zr 元素相关性高, 为赋存在粗颗粒沉积物中的元素, 根据哈拉湖实际, 应为冬季湖泊冰面风力搬运, 反映了湖区冬季风力强度的变化。Ca 元素既与径流输入元素总体变化一致, 也与 Sr、Zr 元素显著相关, 且在第一和第二主成分(径流和风力)上的载荷相当, 表明哈拉湖沉积物中的碳酸盐既有粗颗粒的外源碎屑, 也有湖泊自生的组分, 这在利用碳酸盐进行地球化学研究时应重视, 注意去除外源碎屑碳酸盐的影响。可溶元素 S 和 Cl 可能反映了入湖水量与蒸发对比情况, 与湖泊盐度有关。

**关键词:**哈拉湖; XRF 岩芯扫描分析; 元素地球化学; 环境意义

中图分类号: P595

文献标识码: A

文章编号: 1008-858X(2014)04-0001-10

## 引 言

封闭或半封闭湖泊流域内地表岩石或沉积物中化学元素经物理、化学风化作用及生物地球化学作用不断淋溶、运移, 最终在湖泊沉积物中累积<sup>[1]</sup>。湖泊沉积物的元素化学特征可以反映沉积时期水热条件及元素迁移变化过程, 进而用于反演和恢复流域的气候环境状况, 元素分析已经成为利用湖泊沉积物进行古环境变化研究的重要手段之一<sup>[2-6]</sup>。随着高分辨率多元素 X 射线荧光光谱(XRF)岩芯扫描技术的发展, 湖泊沉积物元素地球化学特征已成为反映湖区古气候环境波动的有效指标<sup>[7-9]</sup>。

仅通过个别元素的变化趋势, 有时很难准确地分析复杂的沉积过程和重建环境变化序

列。例如, 我国湖光岩玛珥湖沉积物 Ti 元素强度曾被认为指示了亚洲冬季风强弱<sup>[10]</sup>, 但后来的研究对此提出质疑<sup>[11]</sup>, 并指出 Ti 元素强度可能与湖泊流域内的水文条件有关。进一步的研究表明湖光岩玛珥湖表层沉积物与当地玄武岩相近<sup>[12]</sup>, 暗示了湖泊沉积物为流域输入的, 而非风成的。最近, 沈吉等<sup>[13]</sup>利用现代过程的研究证明了该湖 Ti 元素不是远源的, 而是来自湖泊流域内围岩的侵蚀物, 该湖沉积物中 Ti 元素含量的变化受控于植被变化的流域侵蚀。因此, 不同地区的湖泊沉积物元素地球化学过程可能不尽相同, 需要结合流域的实际情况进行综合考察, 以准确理解各元素的环境意义。在缺乏详细的现代过程研究时, 可以利用多元统计分析方法, 对多元素间的变化关系进行考察, 避免单个元素分析的局限性, 因此在沉积物多

收稿日期: 2014-04-25; 修回日期: 2014-07-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(NSFC41271220; 41102112)和中央高校基本科研业务费(lzujbky-2013-k18)资助

作者简介: 马雪洋(1988-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为自然地理学。Email: xyma2012@lzu.edu.cn。

通信作者: 张家武。Email: jwzhang@lzu.edu.cn。

元素分析中得到应用<sup>[9]</sup>。目前普遍采用的办法是通过对元素含量或比值的组合,提取元素对气候环境变化的响应信息,并排除各种扰动因素的影响<sup>[14]</sup>。这一方法在干旱区湖泊沉积物中得到初步的运用<sup>[15]</sup>。

青藏高原东北缘高山湖泊哈拉湖位于季风区与西风影响的交汇处,对气候变化敏感<sup>[16]</sup>。早期的考察中对哈拉湖流域内的冰川作用和水资源<sup>[17]</sup>、湖滨沉积物的粒度<sup>[18]</sup>作了初步研究,曹洁等<sup>[19]</sup>尝试利用该湖浅水区短钻岩芯恢复过去 800 年的气候环境变化,Wünnemann 等<sup>[20]</sup>利用该湖不同位置的岩芯讨论了沉积物在湖内变化类型及其对恢复古环境的意义,指出深水区(水深 $\geq 15\text{m}$ )保存了未受扰动的连续湖泊沉积物,可以用来恢复区域气候环境变化。但该湖沉积物中的多元素统计工作尚未开展,多元素组合其环境指示意义尚不明确。本文利用该湖深水区( $38^{\circ}18'17.3''\text{N}, 97^{\circ}34'14.1''\text{E}$ ,水深 61.16 m)HL13D 孔岩芯沉积物 XRF 扫描元素结果,通过对 11 种元素的多元统计和元素强度变化曲线分析,了解

湖泊沉积物元素组成特征及其所代表的环境意义,为进一步重建过去环境变化奠定基础。

## 1 哈拉湖区域概况

哈拉湖( $38^{\circ}11' \sim 38^{\circ}25' \text{N}, 97^{\circ}24' \sim 97^{\circ}47' \text{E}$ )位于青藏高原东北缘青海省德令哈市境内祁连山西段的疏勒南山南部(图 1)。东西两面为低矮丘陵,南部的哈尔科山平均海拔不到 5 000 m,最高峰 5 319 m<sup>[17]</sup>。疏勒南山位于盆地的北部和西北部边缘,常年有冰川、积雪覆盖(图 1)。哈拉湖区属于青海东部山地草原半干旱气候,年平均气温为  $-4^{\circ}\text{C}$ ,年降水量为 200~300 mm,湖泊四周为高山所包围,无人类定居,属典型的内陆封闭湖泊,主要受地表径流和冰川融水补给,入湖河流达 20 余条。哈拉湖面积为 603.28 km<sup>2</sup>,长 34.2 km,最大宽度为 23 km,湖面海拔 4 078 m,平均水深为 27.16 m,最大水深为 65 m。哈拉湖目前湖水的 pH 值为 8.8,水体中阳离子含量由高至低依次为  $\text{Na}^+ >$

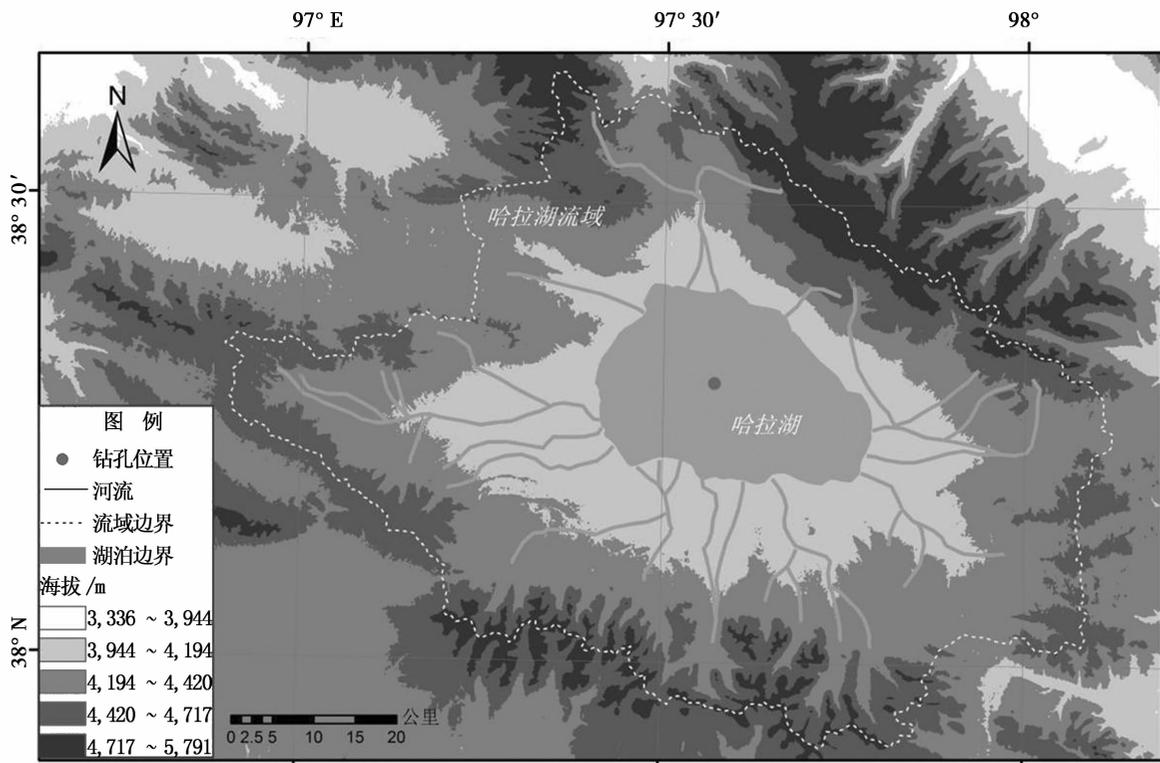


图 1 哈拉湖流域及钻孔位置

Fig. 1 Hala Lake drainage and the core site

Mg<sup>2+</sup> > K<sup>+</sup> > Ca<sup>2+</sup>, 阴离子含量由高至低依次为 Cl<sup>-</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>、HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 和 CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>。根据离子含量总和计算的水体盐度平均为 15.4 g/L, 属微咸水湖。

## 2 样品采集和实验方法

在哈拉湖岩芯采样点, 于 2013 年 2 月利用 UWITEC 平台在冰面上(冰层厚度 70 cm) 共钻取 4 根平行钻孔, 本文分析其中的 HL13D 孔, 该岩芯长 275 cm, 为单次进深获得的连续完整的岩芯。岩芯运回实验室后, 用岩芯切割机将岩芯切成两半, 一半的柱状剖面存放在冷库中保存, 另一半柱状剖面在 XRF 岩芯扫描实验室进行扫描分析。在分析前对样品剖面进行整平处理, 之后在整平的剖面上覆盖一层 Ultralene

薄膜(4 μm)。使用荷兰产的 Avaatech XRF 岩芯扫描仪, 先对岩芯进行拍照, 然后进行扫描。该岩芯扫描仪连续扫描最长距离为 150 cm, 因此将 HL13D 岩芯在距顶部 143 cm 处切断为两节, 分别扫描后合并数据。扫描面积 6 mm(宽度) × 2 mm(长度), 并以 2 mm 分辨率进行 10 kV(每个点的测试时间为 20 s) 和 30 kV(每个点测试时间为 40 s) 扫描分析。扫描分析得到 Ti、K、Si、Al、Fe、Mn、Sr、Zr、Ca、S、Cl 等元素强度(counts), 因为岩芯含水量、粒度、裂隙以及岩芯表面平整度等对扫描结果有影响, 所以测量结果为各元素含量的半定量结果<sup>[21]</sup>。HL13D 孔扫描后共获得 1 369 组数据。对获得的元素强度值, 利用 SPSS19 软件进行相关性分析、聚类分析和因子分析。

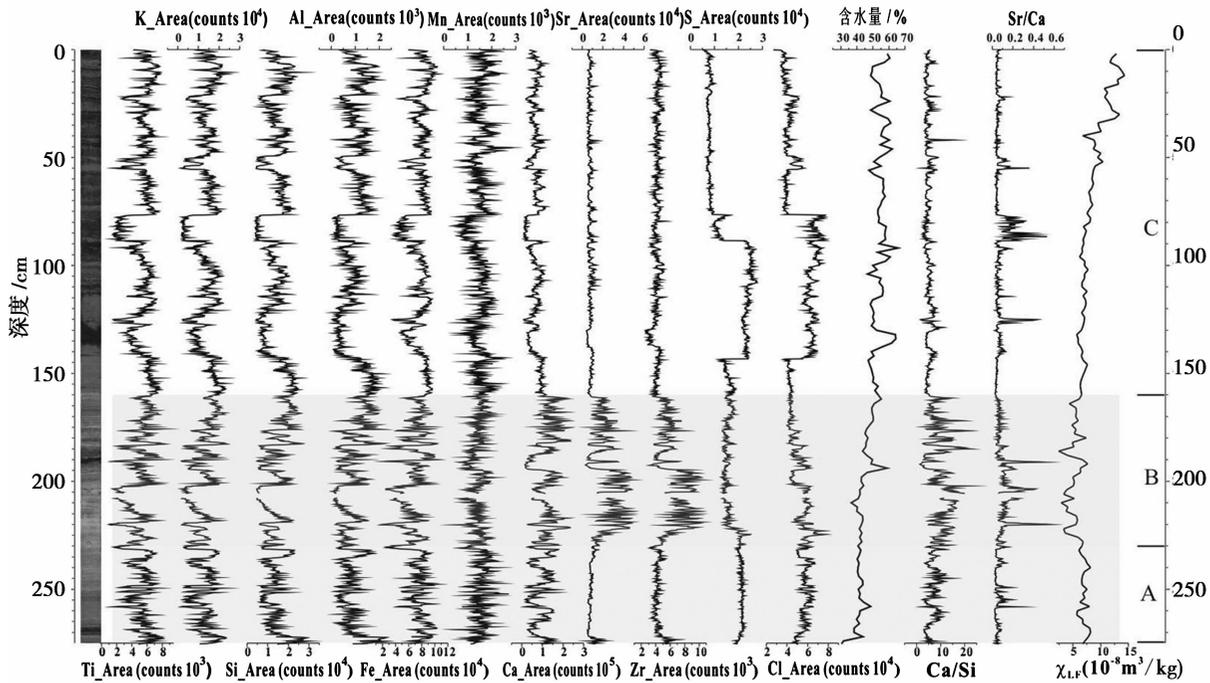


图2 HL13-D 孔岩芯照片及元素、磁化率、含水量曲线图(205.8~207.6 cm 数据缺失; A 段 275~230 cm; B 段 230~160 cm; C 段 160~0 cm)

Fig. 2 Photo and the variation of magnetic susceptibility, elements and water content in core HL13D (no data for 205.8~207.6 cm; stage A, 275~230 cm; stage B, 230~160 cm; stage C, 160~0 cm)

元素扫描后取磁性测量样品, 在岩芯剖面表面依次插进 2 cm × 2 cm × 2 cm 的磁性测量专用塑料盒, 沿 HL13D 孔岩芯剖面获得了 138 个样品。磁化率测定使用英国 Bartington 公司

生产的 MS2 磁化率仪, 测量了高低频磁化率(高频为 4.7 kHz, 低频为 0.47 kHz)。样品测量完成后, 干燥样品, 称重, 计算质量磁化率(低频)和含水量。实验和分析测试在兰州大

学西部环境教育部重点实验室完成。

### 3 结果与讨论

HL13D 孔岩芯如图 2 所示,0 ~ 140 cm 为黄色粘土与黑色有机质互层,有机质含量高;140 ~ 160 cm 为黄色粘土;160 ~ 190 cm 为浅黄色粘土与深褐色粉砂互层,分层明显;160 ~ 230 cm 夹杂碳酸盐碎屑(如图 2 中 B 段),其间 190 ~ 192 cm 附近存在黑色有机质层;192 ~ 268 cm 为灰白色粘土与浅褐色粘土互层;268 ~ 270 cm 为黑色有机质层;270 ~ 275 cm 为暗红色粉砂与浅褐色粉砂互层。根据 Wünnemann 等<sup>[20]</sup>的研究,位于湖中心 65 m 水深处的 H7 孔岩芯沉积速率为 0.15 ~ 0.7 mm/a,其 270 cm 处年代为 10 000 a,HL13D 孔的采样位置水深为 61.16 m,并且地理位置与 H7 孔接近,所以 D 孔 275 cm 岩芯大约涵盖了全新世早期以来的沉积物。

元素扫描结果(图 2)显示,Ti、K、Al、Si、Fe、Mn 元素的相对强度曲线波动极为相似。

Ca 元素强度在岩芯 160 cm 以下与上述元素变化相似,但 160 cm 以上波动幅度减小。Sr 和 Zr 元素曲线波动整体一致,在岩芯 B 段出现高值,其余段变化不大。S、Cl 元素在整体上波动相似。岩芯沉积物含水量自底部向上逐渐增加,与岩芯沉积物压实程度(孔隙度)有关。岩芯剖面 Ca/Si 曲线在下部(A 段和 B 段)波动幅度较大,160 cm 以上基本稳定;Sr/Ca 值仅在部分层位出现高值,多数层位均较稳定;磁化率值总体较低,波动小,表层 50 cm 以上有升高的趋势,表明封闭湖泊沉积后环境的相对稳定,湖泊沉积物次生变化不大。

#### 3.1 相关分析

相关性受控于元素在表生环境中的地球化学行为,不同元素间相关性越高越有助于揭示元素的稳定输入来源,从而判别物质来源。因此,相关性高说明元素之间具有极为一致的赋存条件以及相似的来源。

表 1 元素的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of elements

	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Sr	Zr
Al											
Si	.966 **										
S	-.226 **	-.091 **									
Cl	-.714 **	-.654 **	.724 **								
K	.849 **	.913 **	.005	-.577 **							
Ca	.402 **	.520 **	.082 **	-.307 **	.459 **						
Ti	.782 **	.832 **	-.039	-.575 **	.953 **	.346 **					
Mn	.378 **	.455 **	.085 **	-.271 **	.613 **	.330 **	.610 **				
Fe	.661 **	.681 **	-.053 *	-.490 **	.839 **	.108 **	.926 **	.564 **			
Sr	-.098 **	-.028	.009	.027	-.141 **	.603 **	-.223 **	-.045	-.412 **		
Zr	-.041	.017	-.069 *	-.038	-.080 **	.564 **	-.129 **	.015	-.293 **	.957 **	

\*\* 在 0.01 水平(双侧)上显著相关

\* 在 0.05 水平(双侧)上显著相关

哈拉湖 HL13D 孔沉积物中元素的相关性分析结果(表 1)显示,存在 4 组相关性较高的元素组合。第 1 组为 Al、Si、K、Ti、Fe、Mn,相关性较高,其中 Al、Si、K、Ti、Fe 相关系数均超过 0.6(表 1,  $n = 1369$ ),其中 Al、Si、K 都是造岩元素,一般均被认为是外源碎屑元素<sup>[15,22]</sup>。哈拉湖流域内有大量的硅质碎屑和各种比例的碳酸盐,Wünnemann<sup>[20]</sup>在研究中用 Si 元素来反映湖泊流域内河流动力和水量平衡;Ti 作为惰性较强的元素,其含量变化主要受物理风化作用以及区域降水量变化的影响<sup>[23-24]</sup>,且 Ti 元素通常为指示沉积物中碎屑矿物的指标<sup>[24]</sup>。因此,第 1 组元素组合代表陆源碎屑,且来自同一相对稳定外源输入。

第 2 组为 S、Cl 元素,相关系数为 0.724(表 1,  $n = 1369$ )。S、Cl 元素同属可溶性元素,也是该湖水中最主要的阴离子成分。对于微咸水湖,它们主要随孔隙水吸附到沉积物中,因此其浓度与湖水盐度<sup>[25]</sup>、沉积物含水量<sup>[26]</sup>有关,可以根据含水量进行校正,但与扫描同等分辨率的含水量测试十分困难,因此本文未涉及该元素的校正工作。

第 3 组为 Zr、Sr、Ca 元素,相关系数均超过 0.5(表 1,  $n = 1369$ )。其中 Zr 是极稳定的化学元素,多以锆石形式存在于较粗颗粒的陆源碎屑中,基本不流失和迁移,仍保持源区原岩的特征<sup>[27]</sup>,代表粒径较大的陆源碎屑。在化学风化过程中 Ca、Sr 元素极易淋失,互相置换形成类质同相矿物,因而二者具有很好的相关性<sup>[28]</sup>。Wünnemann 等<sup>[20]</sup>研究表明,在哈拉湖 XRF - Ca 元素强度与沉积物中总碳酸盐含量具有对应关系,即 Ca 元素强度高值与碳酸盐含量高值对应。因此 Ca 代表湖泊沉积物中的以碳酸钙为主的碳酸盐(包括了陆源碎屑输入和湖泊自生两部分),Zr、Sr 和 Ca 均显著相关,其中 Zr 与 Sr、Sr 与 Ca 以及 Zr 与 Ca 的相关系数分别为 0.957、0.603 和 0.564,表明沉积物中碳酸盐有一定比例的陆源碎屑输入(Zr 与 Ca 相关系数小),而自生碳酸盐也有相当的比重(Sr 与 Ca 相关系数稍大)。在获得自生碳酸盐含量组分后,可以进一步考察 Sr、Ca 元素与其相互的关联。

### 3.2 聚类分析

聚类分析是根据地理变量的属性或特征的相似性、亲疏程度,用数学的方法把它们逐步地分型划类,最后得到的一个能反映亲疏关系的分类系统<sup>[29]</sup>。不同的元素组合反映了不同的沉积地球化学特征以及影响它们形成的地质构造、气候、水文条件。因此,物理化学及地质地理条件相似的环境,沉积物的共生组合也相近<sup>[7]</sup>。在 SPSS 中,系统聚类法和 K 均值聚类法是目前最常用的两种聚类方法,系统聚类法也称层次聚类法。对元素之间的地球化学性质的相似性进行分类,本文系统聚类分析采用相似系数作为统计量。在该湖中最长距离法、平均连接法、组平均连接法、质心联接法、中位数联接法的聚类结果相似,均分成 3 类,但是在最短距离法聚类中把 Mn 元素单独作为一类,考虑到最短距离法具有收缩性,本文采用最长距离法,结果如图 3 所示。

在哈拉湖沉积物中的元素聚类谱系图中(图 3),横坐标代表了不同变量间的相似系数,相似系数越近,则变量间的相似性越高。变量 Ti、K、Si、Al、Fe、Mn、Sr、Zr、Ca、S、Cl 元素按距离 10 分为 3 类,与相关性分析的结果一致,表明其属于同一物质来源,并且具有相似的地球化学性质。

第 1 类为 Al、Si、K、Ti、Fe、Mn 元素,如上述的相关性分析所示,此类元素主要为径流输入的外源碎屑。王君波等<sup>[30]</sup>对藏南沉错钻孔沉积物金属元素与粒度做的相关性分析表明,K、Na、Al、Ba、Cu、Fe、Cr、V 等元素多赋存在粘土矿物中,随细粒沉积物进入湖泊。Cuven<sup>[23]</sup>等指出 Si、Zr 元素与粗粉砂和砂相联系,Ti 元素富存在粉砂层。因此,第 1 类 Al、Si、K、Ti、Fe、Mn 元素代表湖泊沉积物中的粒径较小的外源碎屑,与湖泊面积大、钻孔远离河口的事实一致。第 2 类为 S、Cl,代表湖泊中可溶盐。第 3 类为 Sr、Zr、Ca。研究表明 Sr 元素更容易随着粗颗粒沉积物进入湖泊<sup>[30]</sup>,Zr 亦多富集于粗颗粒物质中<sup>[31]</sup>,Sr、Zr 相关性为 0.975,因此可以认为 Sr、Zr 代表以粗粒沉积物形式进入湖泊的元素。

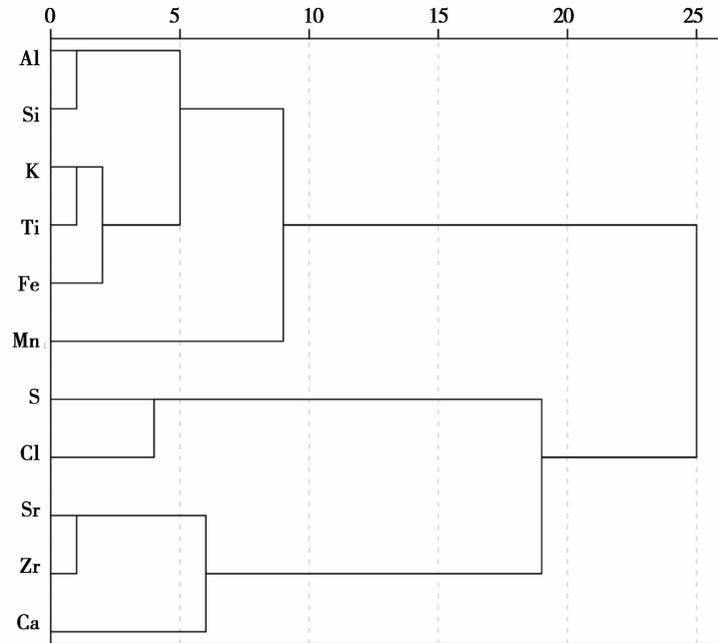


图 3 聚类谱系图

Fig. 3 The Pedigree chart of cluster analysis

### 3.3 因子分析

地球化学研究中因子分析方法被广泛用于判别沉积物中不同组分和来源的贡献<sup>[15]</sup>。在 SPSS19 软件中选取 Varimax 法作为因子分析主成分分析法的旋转法,得到各元素的极大方差旋转载荷、方差贡献率和累计方差贡献率,累计方差贡献率说明主成分所包含全部指标信息的百分比。3 个主成分是由 11 个原始变量通过因子分析得到的新变量,前 3 个主成分分别占总方差的 47.0%、23.2% 和 16.6%,累积方差占总方差的 86.7% (表 2),基本能解释原始数据的信息。在主成分载荷图中(图 4),成分轴上载荷的大小和离轴的远近反映了元素响应力的大小,距离越长、越靠近主轴,表明该元素影响力越大,且越互相靠近的元素,其相关关系越显著。

从图 4a 中可以看出, Al、Si、K、Ti、Fe、Mn 元素距离长、靠近主轴、互相靠近,表明该组元素影响力大,方差贡献占总方差的 47.0%,远高于其它成分,因而该成分对哈拉湖沉积物化

学组成具有决定性的影响。它主要包括赋存在陆源碎屑矿物中的化学元素和氧化物,进一步说明第一主成分代表了来自径流的外源碎屑输入,反映了受控于区域气候的流域水文条件(降水量、融水量)的综合因子。第二主成分对 Sr、Zr、Ca 影响大(图 4a),其中 Ca 元素在第一和第二主成分上载荷相当,根据前述内容, Sr 和 Zr 均来自粗颗粒的碎屑物质,而哈拉湖面积巨大、深水区远离河口入湖位置,这部分粗颗粒随径流入湖的可能性小。根据干旱区湖泊冬季结冰、冰面存在大量风成粗颗粒砂粒和粉尘的事实<sup>[32-33]</sup>,推断这些入湖的粗颗粒不是随径流输入,而是在风力作用下跃移搬运至冰面、湖冰解冻后沉积在湖底的组分,因此第二主成分可以归纳为反映湖区冬季风力强度的因子。第三主成分对 S、Cl 影响大,为正相关(图 4b),而与径流输入元素呈负相关,考虑到这两个可溶元素是哈拉湖水体的主要阴离子成分,第三主成分可能反映了与湖泊盐度有关的人湖水量与蒸发的对比关系,如在径流量减少时,入湖水量与蒸发比减小,盐度增加。

表2 因子分析极大方差旋转因子载荷(表中粗体为该因子成分组成)

Table 2 Varimax rotation factor load(black bold parts are components of factor)

元 素	成 分		
	1	2	3
Al	<b>0.839</b>	0.055	-0.372
Si	<b>0.903</b>	0.141	-0.232
S	0.071	0.019	<b>0.958</b>
Cl	-0.533	-0.075	<b>0.809</b>
K	<b>0.979</b>	0.022	-0.076
Ca	0.460	<b>0.771</b>	0.028
Ti	<b>0.958</b>	-0.081	-0.095
Mn	<b>0.693</b>	0.075	0.187
Fe	<b>0.867</b>	-0.306	-0.077
Sr	-0.172	<b>0.967</b>	0.003
Zr	-0.106	<b>0.942</b>	-0.058
方差贡献/%	46.973	23.181	16.595
累积方差贡献/%	46.973	70.154	86.749

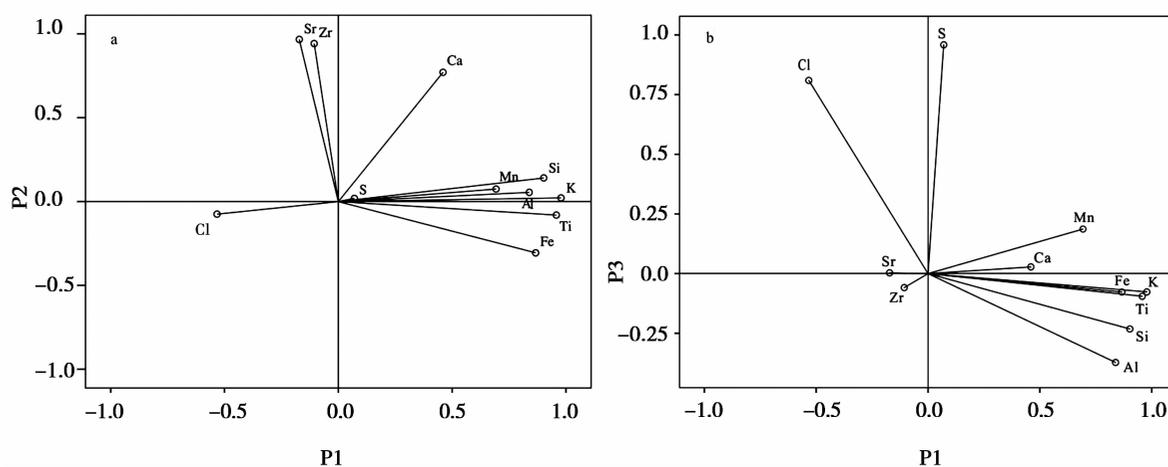


图4 成分载荷图

a 第一主成分与第二主成分 b 第一主成分与第三主成分

Fig.4 Factor loading plot

(a)The first principal component and the second principal component

(b)The first principal component and the third principal component

### 3.4 指示的环境意义

通过哈拉湖 HL13D 孔岩芯沉积物 XRF 扫描元素的相关分析、聚类分析和因子分析,基本可以将沉积物元素分为3类,以 Si、Al、K、Ti、

Fe、Mn 等元素为径流输入的细颗粒碎屑物质组分,以 Sr、Zr、Ca 元素为一类的粗颗粒陆源碎屑组分和以 S、Cl 元素为主的可溶盐组分。通过进一步的因子分析,结合哈拉湖流域的实际情况(高寒半干旱草地,植被稀疏),认为随径流

输入的细颗粒碎屑组分是哈拉湖沉积物的主要组成部分,它们的强度(含量)变化,受到径流量(水动力)的控制,因此其波动能反映流域的气候长期变化状况,尤其是降水量或与温度变化有关的冰雪融水量的变化。第二主成分揭示的粗颗粒碎屑与径流输入的碎屑组分相关性弱,结合湖泊周边冲洪积物质大量裸露、河流入口远离深水区、冬季湖区风力强劲、冰面存在大量粗颗粒粉尘的事实,认为这部分是随风力输入到冰面的粗颗粒。因此这部分含量的变化可以反映湖区冬季风力强度的变化,这在干旱区湖泊中已经得到研究<sup>[34-35]</sup>。同时也表明,在哈拉湖沉积物中的碳酸盐组分中,尤其是粗颗粒组分,为陆源碎屑输入,这在利用该湖碳酸盐作地球化学研究(如同位素研究)时,需要剔除粗颗粒组分的影响。以 S、Cl 为主的可溶元素含量的变化,反映了湖泊水体中可溶盐的多少,与湖泊盐度有关,受到入湖水量与水体蒸发之间的对比关系的控制,间接地反映区域的气候状况,但作为微咸水湖内保存到沉积物中的可溶盐离子,其含量可能还受到沉积物含水量的影响<sup>[21,23,26,36-38]</sup>,因此实际解释时需要谨慎。

需要指出的是,在 HL13D 孔元素强度变化曲线中(图 2),岩芯中下部 B 段(160 ~ 230 cm),Sr、Zr 两个元素的强度出现较其它时段异常的高值,尤其是 B 段下部 230 ~ 205 cm,存在灰白色粘土与浅褐色粘土互层,中间夹杂坚硬的、片状和颗粒状的青灰色碳酸盐屑(加 HCl 完全反应,有大量气泡),薄片状碳酸盐块长度可达 2 cm,这与 Wünnemann 等<sup>[20]</sup>H7 孔中 245 ~ 225 cm 阶段对应,他们推断这一段沉积可能为由于地震引起物质流,根据 H7 孔的年代,大约在距今 8 500 a 前后。如果这一推断正确,那么这一段沉积物中 Sr、Zr 高值则可能是由于沉积物流动中发生了分选,不能用风力搬运来解释,这需要进一步的研究证实。因此,HL13D 孔沉积物元素除了 B 段外,各元素强度的变化可以指示流域气候环境状况。

哈拉湖 HL13D 孔沉积物元素强度变化(图 2)中,随径流输入的碎屑物质有阶段性的波动,但未出现明显的趋势;风力输入的粗颗粒物质(除 B 段以外,Sr 和 Zr)也十分稳定,暗示

哈拉湖流域全新世期间,水文条件有一定幅度的波动,但未出现长期偏干或偏湿的趋势。冬季风力强度也相对稳定。这与初步恢复的全新世期间该湖湖面较为稳定的结果<sup>[20]</sup>一致。Ca/Si 和 Sr/Ca 比值总体稳定,仅在少数径流输入减少的层位出现高值,可能为相对干旱的时期,盐度和自生碳酸盐含量增加。

## 4 结 论

通过哈拉湖 XRF 岩芯扫面的沉积元素进行多元统计分析,得到以下结论。1) Ti、K、Si、Al、Fe、Mn 元素来自径流输入的陆源碎屑,对湖泊中的细粒组分贡献大。这组元素强度(含量)的变化反映了流域水文状况如径流量(冰川融水量和降水量)的多少,因此,Ti、K、Si、Al、Fe、Mn 元素波动曲线指示了哈拉湖流域水文状况的波动,进而反映区域的气候变化。2) Sr、Zr 及部分 Ca 元素来自粒径较大的外源碎屑,推断为冬季湖泊冰面风力搬运入湖。其中 Ca 元素与 Ti、K、Si、Al、Fe、Mn 元素的整体趋势一致,又与 Sr、Zr 元素显著相关,在第一、第二主成分上的载荷相当,表明哈拉湖的碳酸盐既具有粗颗粒输入的外源碎屑成分,也具有相当比例的自生碳酸盐。3) S、Cl 元素强度的变化可能间接反映了入湖水量与蒸发的对比情况,由于湿岩芯扫描,这两个元素是可溶元素,可能受岩芯沉积物含水量的影响,因此解释时需要谨慎。

虽然可以利用沉积物元素扫描结果恢复流域过去的气候环境状况,但目前还缺乏流域现代沉积过程的详细观测,因此本文的元素扫描结果的解释仍需要进一步的深入研究,如流域表土、沉积物捕获和其它代用指标来证实。

**致谢:**兰州大学饶志国、吴铎、王海鹏、李晖等参加了湖泊岩芯的钻探,张晓楠在论文分析部分给予了指导,潘燕辉女士给予 XRF 岩芯扫描分析指导,一并致谢。

## 参考文献:

- [1] 张小龙,徐柏青,李久乐,等. 青藏高原西南部塔若错湖

- 泊沉积物记录的近 300 年来气候环境变化[J]. 地球科学与环境学报,2012,34(1):79-90.
- [2] Rothwell I W C, Rindby A, Guy R. ITRAX: description and evaluation of a new multi-function X-ray core scanner[J]. Special publications-Geological Society of London, 2006, 267:51-63.
- [3] 金章东. 湖泊沉积物的矿物组成、成因、环境指示及研究进展[J]. 地球科学与环境学报,2011,33(1):34-44.
- [4] 孙千里,肖举乐,刘韬. 岱海沉积物元素地球化学特征反映的末次冰期以来季风/干旱过渡区的水热条件变迁[J]. 第四纪研究,2010,30(6):1121-1130.
- [5] 顾兆炎,赵惠敏,王振海,等. 末次间冰期以来新疆巴里坤湖蒸发盐的沉积环境记录[J]. 第四纪研究,1998,4:328-334.
- [6] 王苏民,张振克. 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展[J]. 科学通报,1999,44(6):579-587.
- [7] 王国平,刘景双. 向海湿地元素地球化学特征与高分辨沉积记录[J]. 地理科学,2003,23(2):208-212.
- [8] 陈敬安,万国江,陈振楼,等. 洱海沉积物化学元素与古气候演化[J]. 地球化学,1999,28(6):562-570.
- [9] 杨守业,李从先. 元素地球化学特征的多元统计方法研究—长江与黄河沉积物元素地球化学研究[J]. 矿物岩石,1999,19(1):65-69.
- [10] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, *et al.* Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon[J]. Nature,2007,445(7123):74-77.
- [11] Zhou H, Guan H, Chi B. Record of winter monsoon strength[J]. Nature,2007,450(7168):74-77.
- [12] Zhou H, Wang B, Guan H, *et al.* Constraints from strontium and neodymium isotopic ratios and trace elements on the sources of the sediments in Lake Huguang Maar[J]. Quaternary Research,2009,72(2):289-300.
- [13] Shen J, Wu X, Zhang Z, *et al.* Ti content in Huguangyan maar lake sediment as a proxy for monsoon-induced vegetation density in the Holocene[J]. Geophysical Research Letters,2013,40(21):5757-5763.
- [14] 罗超,彭子成,杨东,等. 多元地球化学指标指示的 32~9 ka B. P. 罗布泊地区环境及其对全球变化的响应[J]. 地球化学,2008,37(2):139-148.
- [15] 成艾颖,余俊清,张丽莎,等. 托素湖岩芯 XRF 元素扫描分析及多元统计方法的应用[J]. 盐湖研究,2011,19(1):20-25.
- [16] Mischke S, Herzsuh U, Zhang C, *et al.* A Late Quaternary lake record from the Qilian Mountains (NW China): lake level and salinity changes inferred from sediment properties and ostracod assemblages [J]. Global and Planetary Change,2005,46(1-4):337-359.
- [17] 伍光 and 刘潮海. 哈拉湖流域的冰川作用特征及水资源利用问题[J]. 冰川冻土,1979,2:27-32.
- [18] 武安斌. 哈拉湖湖滨沉积物的粒度分布特征及其环境意义[J]. 沉积学报,1985,3(2):141-149.
- [19] 曹洁,张家武,张成君,等. 青藏高原北缘哈拉湖近 800 年来湖泊沉积及其环境意义[J]. 第四纪研究,2007,27(1):100-107.
- [20] Wünnemann B, Wagner J, Zhang Y, *et al.* Implications of diverse sedimentation patterns in Hala Lake, Qinghai Province, China for reconstructing Late Quaternary climate[J]. Journal of Paleolimnology,2012,48(4):725-749.
- [21] Weltje G J, Tjallingii R. Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2008,274(3-4):423-438.
- [22] 吴旭东,沈吉,汪勇. 湖光岩玛珉湖沉积物反映的全新世以来古环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质,2011,31(4):155-162.
- [23] Cuven S, Francus P, Lamoureux S F. Estimation of grain size variability with micro X-ray fluorescence in laminated lacustrine sediments, Cape Bounty, Canadian High Arctic[J]. Journal of Paleolimnology,2010,44(3):803-817.
- [24] Morellón M, Valero-Garcés B, Vegas-Vilarrúbia T, *et al.* Late-glacial and Holocene palaeohydrology in the western Mediterranean region: The Lake Estanya record (NE Spain) [J]. Quaternary Science Reviews,2009,28(25-26):2582-2599.
- [25] 奚晓霞,穆德芬,方小敏,等. 早更新世东山古湖氯离子含量变化与季风演化[J]. 冰川冻土,1996,18(2):125-130.
- [26] Tjallingii R, Röhl U, Kölling 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(2): Q02004, doi: 10.1029/2006GC001393.
- [27] White W M. Geochemistry [M]. WILEY - BLACKWELL, 2013.
- [28] 牟保磊. 元素地球化学 [M]. 北京: 北京大学出版社, 1999.
- [29] 张超,杨秉庚. 计量地理学基础 [M]. 北京: 高等教育出版社,2008.
- [30] 王君波,朱立平. 藏南沉钴钻孔沉积物金属元素分布特征及其与粒度的关系[J]. 湖泊科学,2008,20(6):715-722.
- [31] 陈诗越,王苏民,金章东,等. 青藏高原中部湖泊沉积物中 Zr/Rb 值及其环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003,23(4):35-38.
- [32] Qiang M, Chen F, Zhang J, *et al.* Grain size in sediments from Lake Sugan: a possible linkage to dust storm events at the northern margin of the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Environmental Geology,2007,51(7):1229-1238.
- [33] Chen F, Qiang M, Zhou A, *et al.* A 2000-year dust storm record from Lake Sugan in the dust source area of arid China

- [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2013, 118(5):2149–2160.
- [34] Qiang M, Chen F, Wang Z, *et al.* Aeolian deposits at the southeastern margin of the Tengger Desert (China): Implications for surface wind strength in the Asian dust source area over the past 20,000 years [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2010, 286(1–2):66–80.
- [35] An Z, Colman S M, Zhou W, *et al.* Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka [J]. *Scientific Reports*, 2012, 2.
- [36] 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.
- [37] 周锐, 李珍, 宋兵, 等. 长江三角洲平原湖沼沉积物 XRF 岩芯扫描结果的可靠性分析 [J]. *第四纪研究*, 2013, 33(4):697–704.
- [38] 雷国良, 张虎才, 常凤琴, 等. 湖泊沉积物 XRF 元素连续扫描与常规 ICP-OES 分析结果的对比及校正—以兹格塘错为例 [J]. *湖泊科学*, 2011, 23(2):287–294.

## Statistical Analysis of XRF Scanned Elements and Their Environmental Significance in Hala Lake, Qinghai, China

MA Xue-yang, CHEN Dou, YANG Ya-ping, ZHANG Yu-zhi, ZHANG Jia-wu  
(*MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China*)

**Abstract:** Hala Lake is a deep enclosed alpine lake in NE Tibetan Plateau which is in the transitional zone of the Asian Summer Monsoon and the westerlies. Continuous sediments preserved in this lake provide excellent materials for reconstructing regional environmental and climatic changes. However, a systematic knowledge on the sedimentary elements in this lake is still lacking due to few studies have been done. Here we present a multivariate statistical analysis on geochemical elements of Core HL13D from Hala Lake by high-resolution XRF scanning. Correlation analysis, cluster analysis and discriminant factor analysis were applied to the elements to reveal the geochemical significance of Ti, K, Si, Al, Fe, Mn, Ca, Sr, Zr and Cl elements preserved in the core. Results suggest that Ti, K, Si, Al, Fe and Mn elements have the same variations with a high correlation, representing the terrigenous clasts input and reflecting the watershed hydrology, such as the volume of runoff controlled by regional precipitation or snow melt from the high altitudes around the lake. Elements Sr, Zr and Ca have significant correlations, and Ca has nearly the same loading in the first and the second principle component (runoff and wind), indicating that coarse terrigenous clasts and authigenetic components both exist in the carbonates of the sediments, to which attention should be paid when geochemistry analysis is done on carbonates in the sediments. Dissolved elements S and Cl might reflect the ratio of input water to evaporation related to salinity. However, these two elements should be treated with caution due to the fact that they are affected by water content in the sediments.

**Key words:** Hala Lake; XRF core scanning; Element geochemistry; Environmental significance