

文章编号: 1000-0550(2019)01-0104-11

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2018.122

# 14 ka 以来苦海沉积物地球化学记录及其古环境意义

胡砚泊<sup>1</sup>, Bernd Wünnemann<sup>1,2,3</sup>, 张永战<sup>1,4</sup>, 晏达达<sup>2,3</sup>

1. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210023
2. 华东师范大学河口海岸科学研究院, 上海 200062
3. Department of Earth Sciences, Free University Berlin, Berlin 12249
4. 南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室, 南京 210023

**摘要** 对青藏高原东北部封闭咸水湖泊苦海水深最深处 KH17 钻孔进行沉积物粒度、烧失量和 X 射线荧光光谱(XRF)测试及 XRF 测试结果的主成分分析(PCA),以揭示 14 ka 以来苦海沉积物特征及其所反映的搬运与沉积过程变化,反演湖泊流域古环境。研究表明:第一主成分(PC1)主要包括 Ti、Fe、K 等元素,指示径流输入强弱;第二主成分(PC2)中载荷值较大的 Ca 和 Sr 与碳酸盐含量相关,指示湖泊蒸发强弱;Zr(第三主成分中载荷值最大)与砂组分、Rb 与黏土组分含量相关,分别指示风力输入粗颗粒物质和径流输入细颗粒物质情况,其比值可反映化学风化强弱;Fe/Mn、Sr/Ca 也能较好地指示沉积物氧化还原环境、湖水盐度和水位情况。基于上述记录所建立的古环境演变重建结果显示:13.6~13.0 ka B.P.苦海水位较低,径流输入相对强;13.0~11.5 ka B.P.受新仙女木事件影响,环境干旱且温度极低,风力作用强,输入物质多;早全新世升温显著,蒸发作用强,内生碳酸盐沉积增多,湖泊水位增加缓慢,中全新世期间达到最高水位;5.3 ka B.P.以后,湖泊经历干旱时期,盐度与碳酸盐沉积增加;2.7 ka B.P.以来水分供给波动,湖泊水位显著振荡。

**关键词** X 射线荧光光谱(XRF);主成分分析(PCA);元素比值;青藏高原;湖泊水位

**第一作者简介** 胡砚泊,男,1993 年出生,硕士研究生,地球化学与古环境,E-mail: yanbohu\_nju@163.com

**通信作者** Bernd Wünnemann,男,教授,E-mail: wuenne@zedat.fu-berlin.de

**中图分类号** P532 **文献标志码** A

## 0 引言

青藏高原东北部地处东亚季风和盛行西风的交汇地带,冬季还受到西伯利亚高压控制的地表风况影响,是气候变化的敏感地区,适合气候子系统交互作用的研究<sup>[1]</sup>。这一地区湖泊广布,更尕海<sup>[1]</sup>、青海湖<sup>[2-7]</sup>、苦海<sup>[8-11]</sup>、冬给错那<sup>[12-14]</sup>、哈拉湖<sup>[15-16]</sup>、尕海<sup>[17-18]</sup>(图 1)等湖泊的沉积记录被用于重建末次冰期以来的气候环境,但高分辨率研究较少,且基于不同替代性指标进行气候阶段划分和古环境重建结果存在差异。

湖泊沉积物的分析对象与方法多样,包括粒度<sup>[19-20]</sup>、矿物<sup>[14,17]</sup>、元素<sup>[6,16,21]</sup>、同位素<sup>[15-22]</sup>、生物标志化合物<sup>[13,23]</sup>和孢粉<sup>[3,8]</sup>等。XRF 岩芯扫描具有快速、分辨率高、无破坏性和对样品制备要求简单等特点,被广泛应用于沉积物的元素分析,其中特征元素的含量及元素之间的比值变化是流域基岩风化强

度<sup>[24]</sup>、陆源碎屑输入<sup>[16]</sup>和水—沉积物界面氧化还原环境<sup>[25]</sup>等因素的有效替代性指标。

本文选取位于东亚季风和盛行西风交汇地带的封闭咸水湖泊苦海作为研究对象,对湖心 684 cm 沉积柱样 KH17 进行高分辨率的 X 射线荧光光谱(XRF)、烧失量和粒度等测试分析,并利用主成分分析(PCA)等统计学方法建立特征地球化学指标体系,重建 14 ka 以来苦海沉积过程演变,反演湖泊流域蒸发、风化强度和水位等古环境信息,为青藏高原东北部古环境演变及其气候驱动模式的深入研究提供依据。

## 1 研究区概况

苦海(Kuhai),又名“豆错”(35.3°N, 99.2°E),位于青藏高原东北部,为海南藏族自治州兴海县和青海省果洛藏族自治州玛多县的分界线。湖水面积 49.0 km<sup>2</sup>,流域面积 711.8 km<sup>2</sup>,湖面海拔高度 4 132 m。受 NW—SE 向昆仑断裂的影响<sup>[26]</sup>,苦海湖盆近似呈

**收稿日期:** 2018-02-13; **收修改稿日期:** 2018-03-29

**基金项目:** “外专千人计划”项目(组厅字[2014]5号);德国基金会项目(WU270-10.3);国家自然科学基金项目(40971003);华东师范大学人才队伍建设项目(20172010);中国博士后科学基金(2018M630415) [ **Foundation:** Recruitment Program of Foreign Experts, No.5[2014]; German Research Foundation, No. WU270-10.3; National Natural Science Foundation of China, No. 40971003; Talent's Program of East China Normal University, No. 20172010; China Postdoc Science Foundation, No.2018M630415 ]

NW—SE 向与 NE—SW 向延伸的矩形,NE—SW 向的两岸较长,西北边的湖岸曲折,岬湾相间,其余三边的湖岸相对平直(图 1)。

苦海湖泊流域主体 NE—SW 向条带状出露志留纪龙通片岩(云母—石英片岩, Sch)、石炭纪生物碎屑灰岩(Cpg)、二叠纪片麻杂岩(角闪斜长片麻岩、片麻状石英闪长岩, Gnc)和雪穷糜棱片岩(糜棱片岩和千枚岩, Ms);三叠纪浊积岩(砂岩、板岩、砾岩, TL)和二叠纪蛇绿混杂岩(砂岩—板岩、超基性岩、辉长岩、生物碎屑灰岩, Gmo)分布在流域西南与东南部;二叠纪中基性火山岩(玄武岩、安山岩、火山碎屑岩加砂岩、粉砂岩及灰岩岩块, Mbv)在流域西南斑状出露;第四纪洪积物、冲积物和风积物(Q)环湖分布,尤以湖东、北和流域西北部发育较多(图 2)。

苦海流域由海拔 4 400~4 850 m 高的山体包围,西南部为阿尼玛卿山北麓,流域未发现现代冰川发育与古冰川地貌遗迹。湖盆东、北与西北发育多组冲、洪积扇系,东北部广泛分布小型风成沙丘,平均高度

4 m。湖盆呈碗型,西坡较陡,2016 年 7 月测得湖泊最大水深 22.3 m,位于湖泊中心偏西处。苦海现为封闭湖泊,在非结冰期有 3 条主要河流向湖内输送物质,其中径流量最大的河流发源于东部山脊,流经湖东部大型洪积扇系,具有较强的冲刷、剥蚀和搬运能力。由于受到该河流下切作用影响,湖盆东部发育 3 m 高的河流阶地,并于近岸处形成 1.2 m 次生阶地。该阶地主要由砾石构成,上覆有砂质洪积物,夹有大量细颗粒物。另一条主要河流位于西南部,该区域湿地密布。此外,湖盆内还有 8 条河流只在夏季汇入,总体水量较小,雨季能形成小型冲积扇。苦海西北、西南和南部有三座岛,南部最大岛面积 0.73 km<sup>2</sup>,距湖面高度 85 m。

研究区受东亚季风与西风控制,夏季温暖潮湿,冬季受西伯利亚高压影响,气候寒冷干燥<sup>[22,27]</sup>。据玛多气象站(距湖西南 100 km,见图 1)1981—2010 年观测数据显示,1 月与 7 月的平均气温分别为 -15.7 °C 和 8.0 °C,全年平均气温为 -3.3 °C。年平均

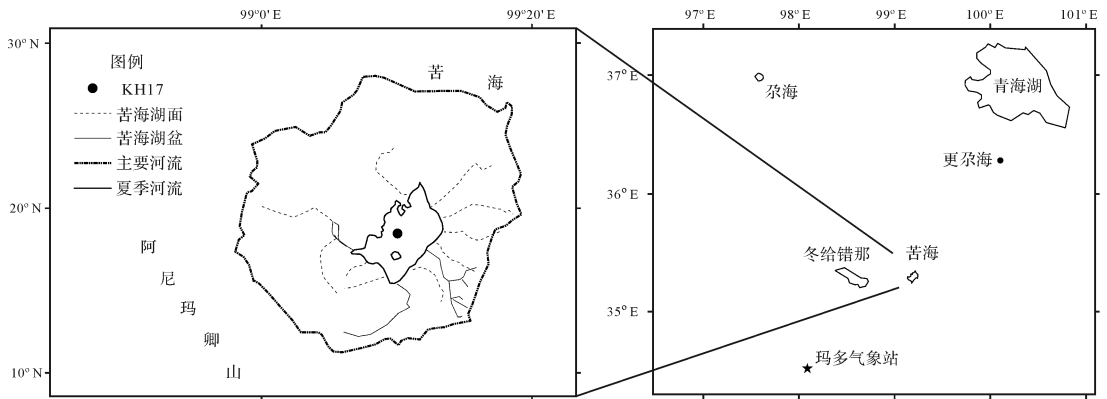


图 1 研究区概况图

Fig.1 Overview map of study site

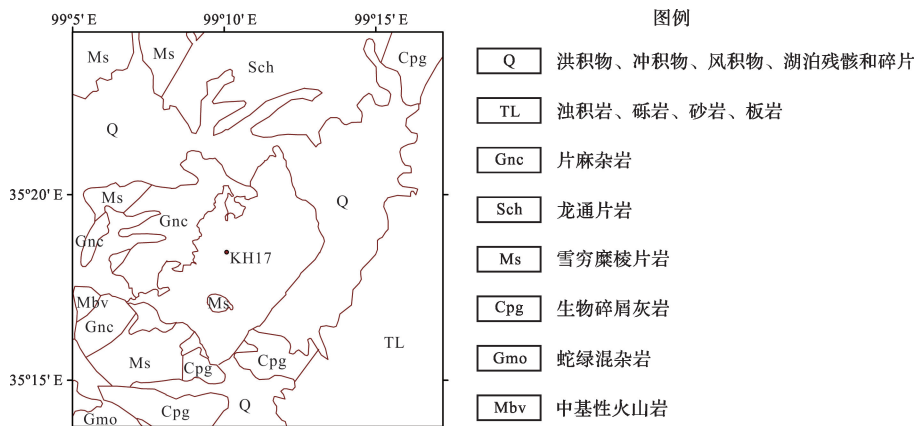


图 2 苦海盆地地质图(改自文献[10])

Fig.2 Geology of Kuhai Lake Basin (modified from reference[10])

降水量 332.4 mm,主要集中在夏季。年平均蒸发量为 1 000 mm。全年近地面主要为北风,最高风速 3.7 m/s (出现在 5 月)。2016 年 7 月测得表层湖水水温 12.9 °C (中午),溶解氧含量 6.4 mg/L, pH 值 8.7,总溶解性颗粒物浓度 21.8 g/L,盐度 13.6‰,电导率 23.2 mS/cm<sup>2</sup>。11 月到次年 3 月湖水结冰,厚度达 30~50 cm。

流域内地表土壤层薄、植被分布稀疏,主要由高山嵩草 (*Kobresia pygmaea*) 和紫花针茅 (*Stipa purpurea*) 类群组成,流域东南斑块状分布有高山灌木,如 *Salix orithrepha*, *Saussurea* spp. 和 *Dasiphora* (*Potentilla*) *fruticosa*<sup>[8]</sup>。

## 2 研究材料与方法

2015 年 7 月利用 UWITEC 重力采样器在苦海湖中心水深 22 m 处获取了无扰动沉积柱 KH17,采用平行取样方式,根据沉积物岩性特征相连接,确保取芯连续完整,实际取芯率达 95%。获得样品总长 684 cm,顶部 8 cm 样品受扰动,将埋深 8~684 cm 的样品用于测试分析。沉积柱岩芯对半切开,观察描述后,一半进行 XRF 扫描后留存,另一半以 1 cm 间隔分样,进行相关测试。

XRF 扫描在云南师范大学利用 Avaatech XRF 岩芯扫描仪完成,扫描电压为 10 和 30 keV,单次扫描时间为 10 s,分辨率为 5 mm。测试前,平整样品表面并覆盖 Ultralene 薄膜,降低表面的粗糙度。考虑到 Ultralene 薄膜对 Al 和 Si 等轻元素的测量准确性有一定的干扰<sup>[24,28]</sup>,选取较为稳定的 K、Ca、Ti、Mn、Fe、Rb、Sr 和 Zr 元素进行分析。元素比值结果采用自然对数法处理以提高准确性<sup>[29]</sup>。

使用 IBM SPSS 软件进行相关性和主成分分析,据 Pearson 法计算相关性,并进行双侧显著性检验<sup>[30]</sup>。XRF 岩芯扫描仪仅提供各元素强度数据(单位为 count),为统一数据量纲,先对其进行标准化(即每一变量值与其平均值之差除以该变量的标准差)后,建立相关性矩阵进行主成分分析<sup>[28]</sup>,抽取特征值大于 1 的主成分,并选取最大方差法对结果进行旋转<sup>[31]</sup>。

粒度和烧失量测试在南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室完成。沉积柱岩芯不含砾质颗粒,其粒度测试利用马尔文 2000 激光粒度仪进行。取每个样品适量放入离心管中,加入 10% HCl 溶液 10 mL,以去除碳酸盐,静置 24 小时后离心,清洗样品至

上层清液呈中性。之后再加入 10% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 溶液 10 mL,以去除有机质,步骤同上。最后加入六偏磷酸钠溶液,超声波震荡后全样上机测定<sup>[32]</sup>。统计计算各粒级组分百分含量,并利用 GRADISTAT 程序包<sup>[33]</sup>计算获得平均粒径和分选系数。

烧失量利用马弗炉燃烧法测定。先将样品干燥后放入粉碎机研磨(300 转/分钟,4 分钟),之后每个样品取 1 g 左右,在 550 °C 和 880 °C 下分别灼烧 2 小时,称量计算烧失量,由此估算有机质和碳酸盐含量<sup>[34]</sup>。

## 3 分析结果

### 3.1 沉积柱描述与年代标尺

根据沉积物颜色、结构与构造,沉积柱可分为如下 6 段:

(1) 8~205 cm,浅棕灰色黏土质粉砂,1~2 mm 纹层,平行层理,中间 115~117 cm 处夹有各 1 cm 厚黑色有机质层与浅灰色粉砂层。

(2) 205~329 cm,上部 26 cm 厚为深灰色黏土质粉砂,1~2 mm 纹层,平行层理,中间 223~226 cm 夹有一浅灰色层;下部为 98 cm 厚棕绿色粉砂,在 260 cm、279 cm 和 286 cm 处夹有三层各 2 cm 厚浅灰色团块状碳酸盐层,在 304~306 cm 有一浅灰色层。

(3) 329~414 cm,黏土质粉砂,上部 31 cm 厚为浅棕色,未见层理;下部为 54 cm 厚灰绿色,平行层理,370~371 cm 与 396~398 cm 处有两层深色有机质层。

(4) 414~563 cm,上部为 64 cm 厚浅棕色黏土质粉砂层,423~429 cm 与 448~453 cm 有两段有机质层,两层间夹有一深灰色粉砂层;中部 46 cm 为棕色团块状碳酸盐与有机质互层,后夹有 7 cm 厚深灰色砂层;下部 30 cm 为棕灰色黏土质粉砂,具平行层理。

(5) 563~652 cm,上部为 30 cm 灰色粉砂质砂,中部有 34 cm 浅灰色粉砂层,下部为 25 cm 厚灰棕色砂。

(6) 652~685 cm,浅棕色粉砂,未见层理(图 3)。

<sup>14</sup>C 测年在美国迈阿密 BETA 实验室完成。测年材料包括 7 个沉积物全样和 3 个总有机碳样品,年代的测试误差为 60~100 a(表 1)。Yan<sup>[11]</sup>在 R 语言环境中使用 Bacon 建立年代模型,以 1950 年为计时零年,碳库效应为 2 495 年。年代模型表明,KH17 记录了苦海 13.6 ka(8~685 cm)以来的沉积信息(图 3),全柱平均沉积速率为 0.58 mm/a。

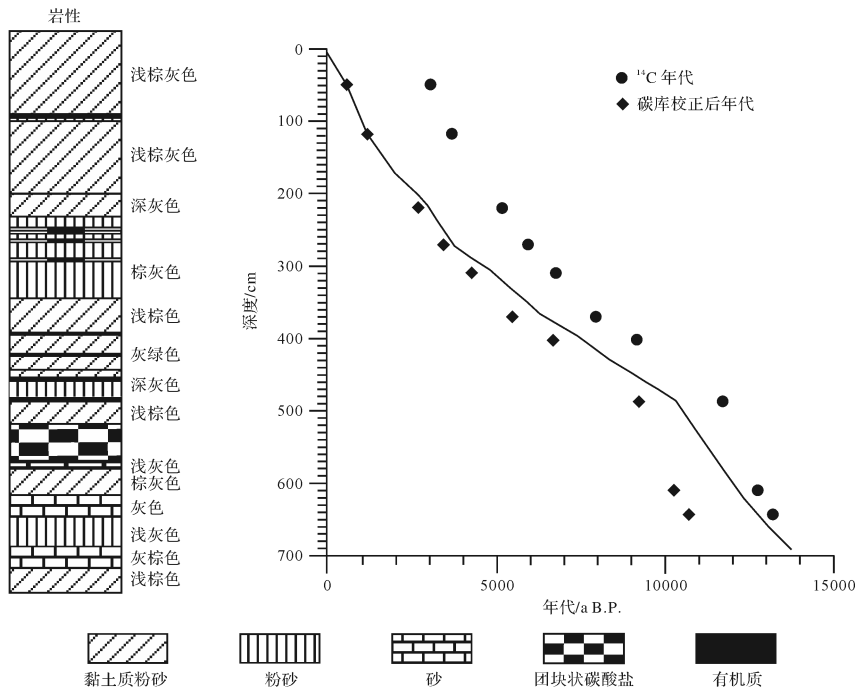


图 3 KH17 沉积柱岩性和年代模型

Fig.3 Lithology and age model of Core KH17

表 1 苦海 KH17 沉积柱测年结果

Table 1 Radiocarbon-AMS dating results of Core KH17 from Kuhai Lake

样品深度/cm	测年材料	<sup>14</sup> C 年龄/a B.P.	剔除碳库效应后年龄 /a B.P.	Bacon 模型校正年代/cal. a B.P.	实验室编号
50	沉积物全样	3 030±30	535	544	beta 417705
118	沉积物全样	3 650±30	1 155	1 139	beta 417707
220	沉积物全样	5 160±30	2 665	2 983	beta 437799
271	沉积物全样	5 920±30	3 425	3 733	beta 417212
310	沉积物全样	6 740±30	4 245	4 902	beta 437800
370	总有机碳	7 950±40	5 455	6 419	beta 441471
402	沉积物全样	9 160±30	6 665	7 556	beta 437802
487	总有机碳	11 710±50	9 215	10 322	beta 438793
610	沉积物全样	12 750±50	10 256	12 186	beta 437807
643	总有机碳	13 190±40	10 695	12 777	beta 441473

### 3.2 粒度与烧失量

全柱平均粒径的均值为 20 μm,以粉砂为主(平均值为 80.1%),砂和黏土组分平均含量为 13.4%和 6.5%。粉砂与黏土含量成正相关,与砂含量成负相关(相关系数分别为 0.61 与-0.99)。平均分选系数为 3.2。527 cm 以上,各组分含量稳定。砂含量在 563~593 cm 和 627~652 cm 达到峰值(最大值91.1%),对应粉砂与黏土含量、分选系数为谷值(图 4)。

有机质含量的平均值为 12%,最大值为 23%(429 cm 处),575 cm 以下处于较低水平(平均值为 5%)。碳酸盐平均含量为 10%,220 cm 与 557~685 cm 间处于较高水平,顶部与底部含量低且仅有小幅

波动(图 5)。

### 3.3 XRF 扫描结果与统计分析

KH17 岩性变化明显,沉积柱中多处水平纹层发育,各元素高分辨率扫描结果波动性大,相对标准偏差较高(8 个元素的相对标准偏差值为 19%~67%)。总体来看,Mn 与 Zr 的整体变化相对较小(图 4)。对 8 个主要元素进行主成分分析,获得三个特征值大于 1 的主成分因子,旋转后方差分别占 48.24%、23.96%和 13.34%(共 85.54%)(表 2)。

相关性分析的样品共有 600 个,当相关系数超过 0.13 时,两变量在 0.001 水平(双侧)上显著相关,其中 Ca、Sr 的 XRF 测试结果与烧失量法测得的碳酸盐



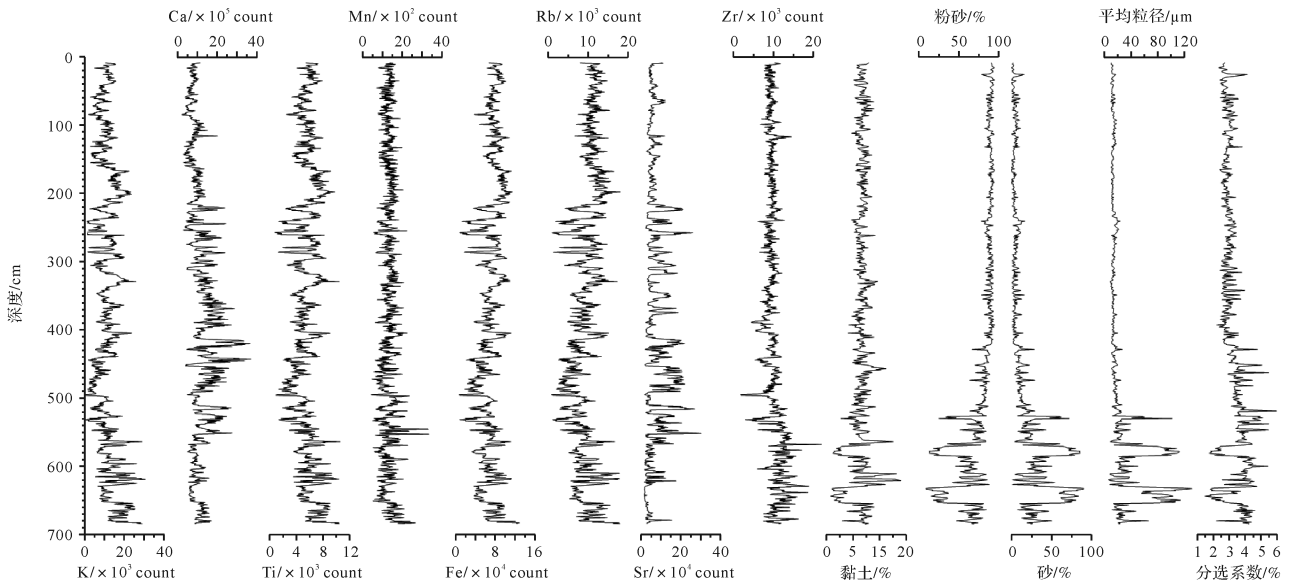


图4 苦海 KH17 沉积柱主要元素和粒度组分对比

Fig.4 Comparison of results for selected elements and grain size compositions in Core KH17 from Kuhai

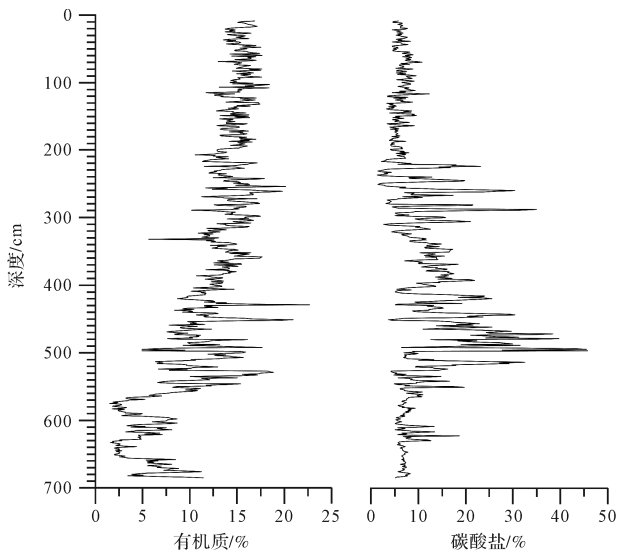


图5 苦海 KH17 沉积柱烧失量结果

Fig.5 LOI results for Core KH17 from Kuhai

表2 KH17 主要元素 PCA 旋转成分载荷矩阵

Table 2 Rotational component matrix of selected elements in Core KH17

	PC1	PC2	PC3
K	<b>0.93</b>	-0.05	0.10
Ca	0.02	<b>0.93</b>	-0.15
Ti	<b>0.92</b>	-0.27	0.16
Mn	0.75	0.11	-0.05
Fe	<b>0.90</b>	-0.29	0.02
Rb	<b>0.80</b>	-0.49	0.02
Sr	-0.33	<b>0.80</b>	0.18
Zr	0.09	0.00	<b>0.99</b>

注:大于0.8标记为粗体。

含量相关系数达 0.55 和 0.54;元素与粒径间也存在显著相关性,Rb、Fe 和黏土含量的相关系数分别为 0.31和 0.33,Zr 与砂含量的相关系数为 0.43(表 3)。

## 4 讨论

### 4.1 替代性指标及其环境指示意义

PC1 中载荷值较大(绝对值 $\geq 0.75$ )的有 K、Ti、Fe、Rb 和 Mn(表 2、图 6),它们都是典型的陆源碎屑物质组成元素<sup>[16,21,28,35]</sup>,与苦海周边变质岩和火成岩中富含的铝硅酸盐矿物的组成元素相符,经机械搬运后沉积于湖泊中。苦海为封闭湖泊,有多条河流携带碎屑物汇入,因此推断 PC1 主要反映流域径流的侵蚀搬运能力,可用来指示入湖河流的径流大小。

PC2 中 Ca 和 Sr 的载荷值较大(绝对值 $\geq 0.80$ )(表 2、图 6),两者和碳酸盐含量相关性高,且 PC2 高值与沉积物中团块状碳酸盐层或浅灰色物质(碳酸盐含量高所致)所在深度对应,表明 PC2 与碳酸盐沉积过程有关<sup>[18,21,36-37]</sup>。苦海周边碳酸岩分布较少,因此陆源碎屑碳酸盐的贡献很小,而内生碳酸盐沉积受水化学、蒸发、水温与 CO<sub>2</sub> 含量等影响,在干旱地区的湖泊中,内生碳酸盐沉积主要受蒸发所控<sup>[21,38]</sup>,因此 PC2 可用来指示苦海湖盆流域的蒸发强弱。

Zr 是 PC3 中载荷值最大的元素(表 2、图 6),与砂组分含量显著相关,多以粗颗粒锆石(火成岩和变质岩中的主要矿物之一)的形式分布于盆地周边的岩石中<sup>[39]</sup>,可能由风力搬运并在湖内沉积,或是沉

表 3 KH17 粒度组分、元素和烧失量相关系数表

Table 3 Correlation coefficients of grain size, elements and LOI in Core KH17

	黏土/%	粉砂/%	砂/%	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Rb	Sr	Zr	有机质/%	碳酸盐/%
黏土/%	<b>1.00</b>												
粉砂/%	<b>0.61</b>	<b>1.00</b>											
砂/%	-0.66	-1.00	<b>1.00</b>										
K	0.23	0.00	-0.02	<b>1.00</b>									
Ca	0.09	0.10	-0.10	0.00	<b>1.00</b>								
Ti	0.21	0.05	-0.06	<b>0.94</b>	-0.24	<b>1.00</b>							
Mn	0.18	0.20	-0.20	<b>0.59</b>	-0.01	<b>0.59</b>	<b>1.00</b>						
Fe	<b>0.33</b>	<b>0.34</b>	-0.35	<b>0.80</b>	-0.29	<b>0.90</b>	<b>0.63</b>	<b>1.00</b>					
Rb	<b>0.31</b>	0.27	-0.29	<b>0.73</b>	-0.47	<b>0.86</b>	<b>0.52</b>	<b>0.94</b>	<b>1.00</b>				
Sr	0.13	0.16	-0.17	-0.39	<b>0.61</b>	-0.51	-0.19	-0.43	-0.55	<b>1.00</b>			
Zr	-0.14	-0.44	<b>0.43</b>	0.18	-0.12	0.23	0.05	0.06	0.06	0.10	<b>1.00</b>		
有机质/%	0.27	<b>0.72</b>	-0.70	-0.17	-0.03	-0.09	0.13	0.22	0.19	0.09	-0.53	<b>1.00</b>	
碳酸盐/%	0.08	0.11	-0.11	-0.40	<b>0.55</b>	-0.54	-0.28	-0.54	-0.61	<b>0.54</b>	-0.17	-0.16	<b>1.00</b>

注:相关系数大于 0.3 标记为粗体。

积于湖滨。PC3 高值对应的平均粒径为 50 ~ 130 μm,与湖盆东北部风积物粒径相符<sup>[11]</sup>,且该段分选系数极低表明动力单一,表明沉积环境稳定;另外青海湖周边沉积物元素分析表明,风积物中 Zr 含量较高<sup>[6]</sup>。综上,PC3 峰值主要反映风力搬运的沉积物较多,指示风力作用强,也不能排除受到湖滨沉积物的影响。

Fe 和 Mn 在 PC1 中的载荷值较大,都以陆源碎屑的形式输入,但它们对氧化还原条件的敏感性不同。在缺氧的深水条件下,湖泊沉积物—水界面处于还原环境,Mn 易溶解,难以沉积下来<sup>[25,42-43]</sup>。因此,Fe/Mn 比值较高可用来指示沉积物处于水位较高的还原环境。

苦海沉积物中有约 10% 的碳酸盐,对于这类内生碳酸盐的湖泊系统而言,Sr 与 Ca 的沉积过程有所差异。在湖水蒸发时,Ca 比 Sr 较早形成碳酸盐沉积,因此 Sr /Ca 比值可以反应湖泊盐度变化<sup>[16,36,44]</sup>。

苦海湖盆周边的人类活动影响极小,有机质含量主要是湖盆初级生产力的综合反映,指示了湖泊生物量与水热配置条件,在此作为湖泊水分供应和温度的辅助指标<sup>[16,42,45-46]</sup>。

#### 4.2 古环境演变

综合考虑以上替代性指标的时序变化及其相互组合关系,KH17 沉积柱记录了 14 ka 以来 6 个主要沉积环境演化阶段(图 7),揭示了苦海流域古环境的变化。

(1) U1:685~652 cm(13.6~13 ka B.P.)

沉积物为浅棕色粉砂。该阶段 PC1 与平均粒径较高,Zr/Rb 与 Sr/Ca 较低,表明苦海处在化学风化较强环境,水热条件相对较好,水体盐度较低,盆地积水但水位不高,径流影响显著。青海湖湖泊沉积物孢粉和有机碳同位素证据表明,13.7~12.9 ka B.P.期间青海湖为暖湿气候,可能处于阿勒罗得(Allerød)暖期,水热条件转好,与苦海地球化学记录揭示的环境相符<sup>[3]</sup>。

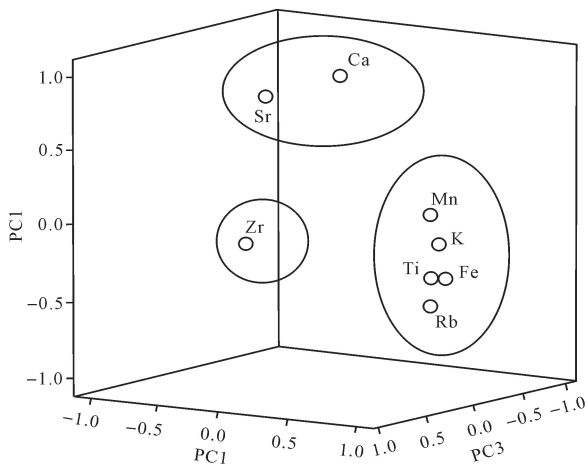


图 6 KH17 主要元素旋转成分图

Fig.6 3-D figure of rotated three PCs of the selected elements in Core KH17

Rb 与细颗粒物含量显著相关,这是因为 Rb 的原子半径小,易吸附于黏土等细颗粒物。由于 Zr 在化学风化中非常稳定,当高原地区的水热条件较好、化学风化较强时,湖泊沉积物中细颗粒含量较多,Rb 含量相对较高,Zr/ Rb 值较低<sup>[37,40-41]</sup>,所以将 Zr/Rb 作为化学风化强弱的参考指标。

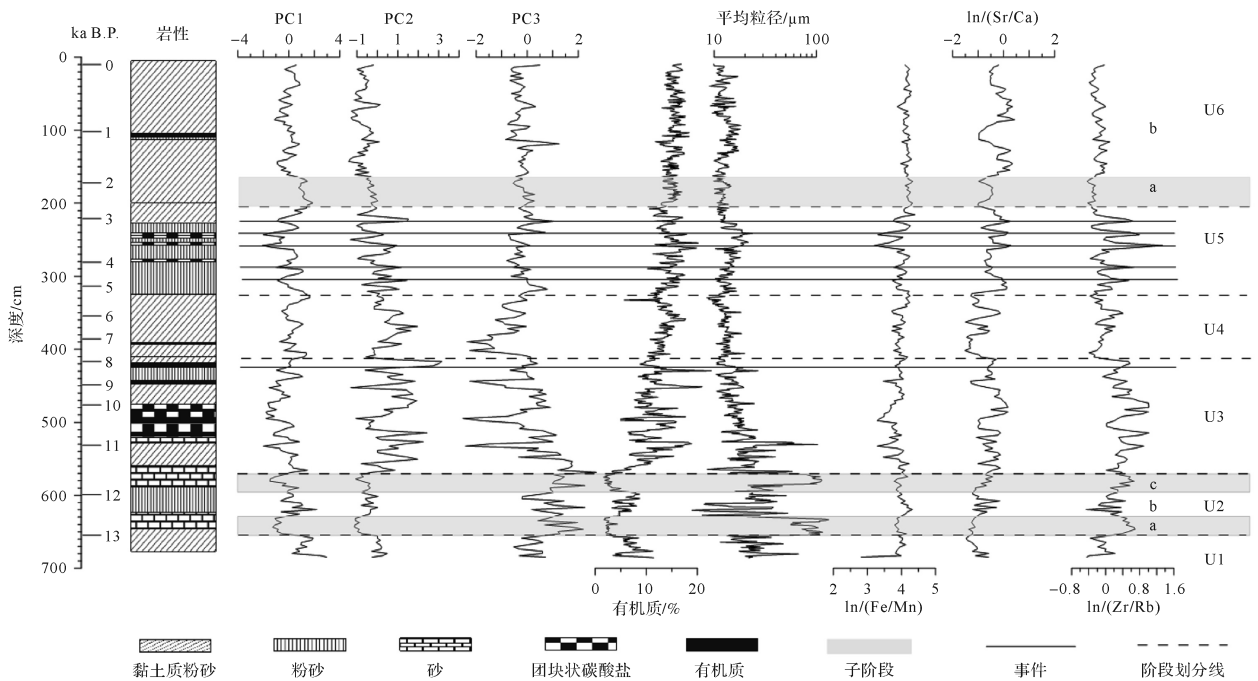


图7 苦海 KH17 多指标时间序列和阶段划分(XRF 和 PC 指标已进行“3 cm”平滑处理)

Fig.7 Comparison of proxies records (smoothed in 3 cm) from Lake Kuhai, divided into units

## (2) U2:652~563 cm(13.0~11.5 ka B.P.)

该段沉积物较上段明显增粗,PC1、PC3、有机质等指标也有明显变化。此阶段可分为三个子阶段:

子阶段 a:652~627 cm(13.0~12.5 ka B.P.),灰棕色砂;子阶段 c:593~563 cm(12.0~11.5 ka B.P.),灰色粉砂质砂。这两个子阶段的沉积物粒径极粗,PC3、Zr/Rb 高,PC1 和有机质含量低,PC2、Sr/Ca 与 Fe/Mn 和上一阶段基本维持在同一水平,表明苦海盆地温度降低,化学风化减弱,风力作用增强,径流输入减少。尽管水分供给不佳,但在低温环境下,流域蒸发量没有发生显著增加,水体盐度与水位较先前没有明显改变。

子阶段 b:627~593 cm(12.5~12.0 ka B.P.),浅灰色粉砂层,沉积物粒径较前后子阶段有所降低,PC1 与有机质含量明显回升,Zr/Rb 降低,表明水热条件转好,径流输入增加,化学风化作用增强。

该阶段苦海表现为明显的冷干环境,与新仙女木事件(Younger Dryas)有关,在 12.5~12 ka B.P. 还存在一个较为暖湿的中间期。冬给错那黏土矿物沉积记录表明,13.75~11.5 ka B.P. 为新仙女木事件,沉积物砂含量增加,径流输入减少,湖泊盐度较高,有机质含量低,与苦海沉积记录特征相似,但冬给错那记录中并未发现新仙女木时期伴有环境暖湿的阶段<sup>[14]</sup>。青海湖和更尔海记录的新仙女木事件分别发生于

12.9~12.1 ka B.P.<sup>[3]</sup> 和 12.5~11.4 ka B.P.<sup>[1]</sup>,事件的始末时间与苦海记录有所差别,可能与湖泊所处的流域环境以及测年误差有关。

## (3) U3:563~414 cm(11.5~7.9 ka B.P.)

沉积物类型多样,包括团块状碳酸盐层、有机质层、砂层、粉砂层与黏土质粉砂层。PC3 与平均粒径较 U2 降低,Zr/Rb、PC2、Sr/Ca 与有机质含量增加,表明新仙女木事件过后,流域气温明显回升,蒸发作用强,水体盐度大,水位低,风力作用减弱。青海湖沉积物有机地球化学记录也表明,12~8 ka B.P. 期间,该湖处在高温、高蒸发量的环境中,湖泊水位较低<sup>[7]</sup>。此外,青藏高原东北部多处记录都记载发现的“8.2 千年冷事件”<sup>[1-2]</sup>,苦海地球化学记录中也表明,8.2 ka B.P. 径流输入较低,风力输入的物质增加,低温导致蒸发量较低,碳酸盐含量处于低值。

## (4) U4:414~329 cm(7.9~5.3 ka B.P.)

沉积物为浅棕至灰绿色黏土质粉砂。PC1、Fe/Mn 与有机质含量增加,平均粒径、PC2、Sr/Ca 与 Zr/Rb 减少,表明水分供应充足,径流输入增加,蒸发量减少,导致湖泊水位上升,盐度下降。该阶段为全新世气候适宜期,对比其他阶段苦海水位可知,苦海在该阶段达最高水位。青海湖沉积记录也表明,8~5 ka B.P. 期间,青海湖地区降水充沛,水分供应充足,可能与东亚季风的增强有关<sup>[7]</sup>。

## (5) U5:329~205 cm(5.3~2.7 ka B.P.)

沉积物由黏土质粉砂与粉砂构成,夹有三层团块状碳酸盐和两层浅灰色,分别对应多个指标的峰谷值。该阶段平均粒径、Sr/Ca 与 Zr/Rb 较上阶段整体增加,PC1 与 Fe/Mn 有所降低,表明流域蒸发量较高,水分供给少,湖泊水位明显下降,水体盐度增加。其中在 3.8~2.8 ka B.P. 期间,各指标特征显著,且有机质含量有降低趋势,指示强烈的冷干事件<sup>[47-48]</sup>。青海湖和冬给错那记录表明,自 4.2ka B.P. 起湖泊进入气候冷干期<sup>[2,14]</sup>。青藏高原冰芯和部分其他湖泊也记录了该时期多次发生降温引起的冰川前进事件<sup>[1]</sup>。

## (6) U6:205~8 cm(2.7~0 ka B.P.)

2.7 ka B.P. 以来,沉积物以浅棕灰色黏土质粉砂为主。该阶段也可细分成 2 个子阶段:

子阶段 a:205~168 cm(2.7~1.9 ka B.P.) PC1 和 Fe/Mn 升高,平均粒径、PC2、Zr/Rb 和 Sr/Ca 降低,反映径流输入增加,化学风化作用强,沉积物处于偏还原环境,湖泊水位升高,水体盐度降低。2 ka B.P. 左右,西北地区的多处记录发现有气候湿润阶段,更尕海流域也发现有径流增加的现象,持续时间约为 200 年左右<sup>[1]</sup>。苦海地球化学记录所反映的环境与之类似,但发生时间较早,持续时间较长,与青海湖沉积物红度指示的罗马暖期(Roman Warm Period)湿润阶段(2.5~2.1 ka B.P.) 更为匹配<sup>[2]</sup>。

子阶段 b:168~8 cm(1.9~0 ka B.P.) PC1 降低,Zr/Rb 增加,反映该子阶段化学风化减弱,径流减小,反映总体降低温度,水分供给减少,但是子阶段内 PC1、PC2 与 Sr/Ca 变化显著,表明流域径流与蒸发量出现波动,进而影响湖泊盐度。青海湖<sup>[2]</sup>、更尕海<sup>[1]</sup>、尕海<sup>[18]</sup> 与哈拉湖<sup>[15]</sup> 等记录都表明,2 ka B.P. 以来,湖泊的水位及周边环境处于不稳定的阶段。可能受到中世纪暖期(Medieval Warm Period)和小冰期(Little Ice Age)等气候事件影响。

苦海地处东亚季风、西风和蒙古高压交汇处,还受到局地小气候影响,古气候模式复杂,可能存在驱动力交替变化的过程。具体气候驱动机制与边界的探讨还需综合微体古生物、稳定同位素等其他指标以及湖泊水位变化后对气候存在不同反应等信息进行深入研究。

## 5 结论

(1) 基于 XRF 数据的主成分分析结果表明,三

个主成分因子对应指示苦海湖心沉积物的三种主要形成过程,即湖盆碎屑物质的径流输入、蒸发盐沉积和风成作用。此外,Zr/Rb 可反映流域化学风化强弱,Fe/Mn、Sr/Ca 也能较好地指示沉积物氧化还原环境、湖水盐度和水位情况。

(2) 苦海 14 ka 以来经历了不同的水位与环境变化:13.6~13.0 ka B.P., 湖泊水位较低,流域化学风化作用与径流输入较强;13.0~11.5 ka B.P. 受新仙女木事件影响,环境干旱且温度极低,风力作用强,携带的输入物质多,期间还发现有 0.5 ka 环境相对温暖湿润的阶段;11.5~7.9 ka B.P. 流域升温显著,蒸发作用强,湖泊水位增加缓慢;7.9~5.3 ka B.P. 流域水分供应充足,径流输入多,苦海达到最高水位;5.3~2.7 ka B.P. 苦海处于干旱环境,水位明显下降,水体盐度增加;晚全新世以来水分供给波动,湖泊水位振荡,2.7~1.9 ka B.P. 径流输入增加,化学风化作用强,湖泊水位升高,盐度降低;1.9~0 ka BP 流域总体化学风化减弱,流域径流与蒸发量出现波动,湖泊的水位及周边环境处于不稳定的阶段,可能与中世纪暖期和小冰期有关。

苦海地处东亚季风、西风和蒙古高压交汇处,古气候模式复杂,具体气候驱动机制与边界的探讨还需综合稳定同位素等其他指标进行深入研究。

致谢 德国柏林自由大学高级讲师 Kai Hartmann 博士对数理统计部分给予极大指导,云南师范大学张虎才教授、段力曾老师等对 X 射线荧光光谱实验提供了很大帮助,德国柏林自由大学 Eric Runge、Marielle Neyen、Mona Storms 和南京大学刘璇同学参与了实验和野外工作,青海师范大学曹广超、陈克龙、侯光良三位教授积极帮助协调,确保野外工作得以顺利完成,在此一并感谢。

## 参考文献 (References)

- [1] Qiang M R, Song L, Jin Y X, et al. A 16-ka oxygen-isotope record from Genggahai Lake on the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau: hydroclimatic evolution and changes in atmospheric circulation[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 162: 72-87.
- [2] Ji J F, Shen J, Balsam W, et al. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai - Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233(1/2): 61-70.
- [3] 沈吉,刘兴起,Matsumoto R,等. 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化[J]. *中国科学(D 辑): 地球科学*, 2004,34(6):582-589. [Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto R, et al. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred



- from multi-proxy of sediments in Qinghai Lake[J]. *Science China (Seri. D): Earth Sciences*, 2004, 34(6): 582-589.]
- [4] Chen F H, Wu D, Chen J H, et al. Holocene moisture and East Asian summer monsoon evolution in the northeastern Tibetan Plateau recorded by Lake Qinghai and its environs: a review of conflicting proxies[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 154: 111-129.
- [5] 张彭熹,张保珍,杨文博. 青海湖冰后期水体环境的演化[J]. *沉积学报*, 1988, 6(2): 1-14. [Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Yang Wenbo. The evolution of the water body environment in Qinghai Lake since the postglacial age [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 1988, 6(2): 1-14.]
- [6] Jin Z D, An Z S, Yu J M, et al. Lake Qinghai sediment geochemistry linked to hydroclimate variability since the last glacial[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2015, 122: 63-73.
- [7] Liu W G, Liu H, Wang Z, et al. Hydrogen isotopic compositions of long-chain leaf wax *n*-alkanes in Lake Qinghai sediments record palaeohydrological variations during the past 12 ka[J]. *Quaternary International*, 2017, 449: 67-74.
- [8] Wischnewski J, Mischke S, Wang Y B, et al. Reconstructing climate variability on the northeastern Tibetan Plateau since the last Lateglacial-a multi-proxy, dual-site approach comparing terrestrial and aquatic signals[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2011, 30(1/2): 82-97.
- [9] Mischke S, Zhang C J, Börner A, et al. Lateglacial and Holocene variation in aeolian sediment flux over the northeastern Tibetan Plateau recorded by laminated sediments of a saline meromictic lake[J]. *Journal of Quaternary Science*, 2010, 25(2): 162-177.
- [10] Sun Q F, Colin C, Liu Z F, et al. Climate changes of the northeastern Tibetan Plateau since the late glaciation inferred from clay mineralogy of sediments in Kuhai Lake[J]. *Quaternary International*, 2016, 440: 24-34.
- [11] Yan D D. Interplay between lake and catchment processes in Kuhai Lake Basin, NE Tibetan Plateau, China, during late holocene [D]. Berlin: Freie Universität Berlin, 2017.
- [12] Dietze E, Wünnemann B, Hartmann K, et al. Early to mid-Holocene lake high-stand sediments at Lake Donggi Cona, northeastern Tibetan Plateau, China[J]. *Quaternary Research*, 2013, 79(3): 325-336.
- [13] Saini J, Günther F, Aichner B, et al. Climate variability in the past ~19,000 yr in NE Tibetan Plateau inferred from biomarker and stable isotope records of Lake Donggi Cona[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2017, 157: 129-140.
- [14] Opitz S, Wünnemann B, Aichner B, et al. Late Glacial and Holocene development of Lake Donggi Cona, north-eastern Tibetan Plateau, inferred from sedimentological analysis[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2012, 337/338: 159-176.
- [15] Yan D D, Wünnemann B. Late Quaternary water depth changes in Hala Lake, northeastern Tibetan Plateau, derived from ostracod assemblages and sediment properties in multiple sediment records [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2014, 95: 95-114.
- [16] Wünnemann B, Wagner J, Zhang Y Z, 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.
- [17] 张西营,马海州,韩风清,等. 德令哈盆地尕斯库勒湖 DG03 孔岩芯矿物组合与古环境变化[J]. *沉积学报*, 2007, 25(5): 767-773. [Zhang Xiying, Ma Haizhou, Han Fengqing, et al. Mineral assemblages and palaeoenvironmental changes of core DG03 of Gahai Lake in Delingha Basin[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2007, 25(5): 767-773.]
- [18] 曹广超,马海州,张璞,等. 11.5kaBP 以来尕斯库勒湖沉积物氧化物地球化学特征及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2009, 27(2): 360-366. [Cao Guangchao, Ma Haizhou, Zhang Pu, et al. Geochemical composition of sediment in Gahai Lake since 11.5 ka BP and its environmental implication[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(2): 360-366.]
- [19] 李华勇,张虎才,陈光杰,等. 云南高原湖泊表层沉积物粒度特征及环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2017, 35(3): 499-507. [Li Huayong, Zhang Hucui, Chen Guangjie, et al. The grain size distribution characteristics of surface sediments from plateau lakes in Yunnan province and their environmental significances[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(3): 499-507.]
- [20] 马龙,吴敬禄,温军会,等. 乌梁素海湖泊沉积物粒度特征及其环境指示意义[J]. *沉积学报*, 2013, 31(4): 646-652. [Ma Long, Wu Jinglu, Wen Junhui, et al. Grain size characteristics and its environmental significance of lacustrine sediment recorded in Wuliangsu Lake, Inner Mongolia[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(4): 646-652.]
- [21] Ling Y, Dai X Q, Zheng M P, et al. High-resolution geochemical record for the last 1100 yr from Lake Toson, northeastern Tibetan Plateau, and its climatic implications[J]. *Quaternary International*, 2017, doi: 10.1016/j.quaint.2017.03.067.
- [22] Xu H, Ai L, Tan L C, et al. Stable isotopes in bulk carbonates and organic matter in recent sediments of Lake Qinghai and their climatic implications[J]. *Chemical Geology*, 2006, 235(3/4): 262-275.
- [23] 郑艳红,周卫健,谢树成. 青藏高原东北部全新世泥炭正构烷烃的生物记录[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 142-146. [Zheng Yanhong, Zhou Weijian, Xie Shucheng. Organism records of Holocene peat *n*-alkanes in the northeastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 142-146.]
- [24] 成艾颖,余俊清,张丽莎,等. XRF 岩芯扫描分析方法及其在湖泊沉积研究中的应用[J]. *盐湖研究*, 2010, 18(2): 7-13. [Cheng Aiyang, Yu Junqing, Zhang Lisha, et al. XRF core scanning and applications on lake sediments[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 2010, 18(2): 7-13.]
- [25] 陈宇亮,郑洪波. XRF 岩心扫描在第四纪沉积物研究中的应用[J]. *海洋地质前沿*, 2014, 30(4): 51-59. [Chen Yuliang, Zheng Hongbo. The application of XRF core scanning to Quaternary sediments[J]. *Marine Geology Frontiers*, 2014, 30(4): 51-59.]
- [26] van der Woerd J, Tapponnier P, Ryerson F J, et al. Uniform post-

- glacial slip-rate along the central 600 km of the Kunlun Fault (Tibet), from  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{10}\text{Be}$ , and  $^{14}\text{C}$  dating of riser offsets, and climatic origin of the regional morphology[J]. *Geophysical Journal International*, 2002, 148(3): 356-388.
- [27] Vandenberghe J, Renssen H, Van Huissteden K, et al. Penetration of Atlantic westerly winds into central and East Asia[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2006, 25(17/18): 2380-2389.
- [28] Bahr A, Jiménez-Espejo F J, Kolasinac N, et al. Deciphering bottom current velocity and paleoclimate signals from contourite deposits in the Gulf of Cádiz during the last 140 kyr: an inorganic geochemical approach[J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2014, 15(8): 3145-3160.
- [29] 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.
- [30] Hays W L. *Statistics*[M]. 3rd ed. New York: Holt, Rinehart, and Winston, 1981: 1-150.
- [31] Davis J C. *Statistics and data analysis in geology*[M]. New York: Wiley, 1973: 527-537.
- [32] 王君波,朱立平. 不同前处理对湖泊沉积物粒度测量结果的影响[J]. *湖泊科学*, 2005, 17(1): 17-23. [Wang Junbo, Zhu Liping. Influence of different pre-treatments on grain-size measurement of lake sediments[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2005, 17(1): 17-23.]
- [33] Blott S J, Pye K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(11): 1237-1248.
- [34] Heiri O, Lotter A F, Lemcke G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments: reproducibility and comparability of results[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25(1): 101-110.
- [35] Hartmann K, Wünnemann B. Hydrological changes and Holocene climate variations in NW China, inferred from lake sediments of Juyanze palaeolake by factor analyses[J]. *Quaternary International*, 2009, 194(1/2): 28-44.
- [36] 徐佳佳,贾玉连,赖忠平,等. 黄旗海湖泊沉积记录的早中全新世大湖期环境的差异性[J]. *沉积学报*, 2012, 30(4): 731-738. [Xu Jiajia, Jia Yulian, Lai Zhongping, et al. Climate variations during Early to Mid-Holocene in Huangqihai Lake in northern China based on the lake deposit analysis[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(4): 731-738.]
- [37] 张静然,贾玉连,申洪源,等. 湖泊沉积物不同粒级组分的元素含量特征及其环境指示意义:以内蒙古黄旗海为例[J]. *沉积学报*, 2011, 29(2): 381-387. [Zhang Jingran, Jia Yulian, Shen Hongyuan, et al. Element features in different grain size fractions of lacustrine sediment and their environmental implication: A case study of Huangqihai Lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(2): 381-387.]
- [38] 申慧彦,李世杰,于守兵,等. 青藏高原兹格塘错沉积物粒度组成及其环境记录的研究[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(4): 613-619. [Shen Huiyan, Li Shijie, Yu Shoubing, et al. Grain-size characteristics of sediments from the Zigetang Co Lake, Tibetan Plateau and their environmental implication[J]. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 27(4): 613-619.]
- [39] Dypvik H, Harris N B. Geochemical facies analysis of fine-grained siliciclastics using Th/U, Zr/Rb and (Zr + Rb)/Sr ratios[J]. *Chemical Geology*, 2001, 181(1/2/3/4): 131-146.
- [40] 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. [Chen Shiyue, Wang Sumin, Jin Zhangdong, et al. Variation of Zr/Rb ratios in lacustrine sediments of the Central Tibetan Plateau and its environment implications[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 35-38.]
- [41] 谭玲玲,钟巍,薛积彬,等. 新疆巴里坤湖全新世湖泊沉积物中 Zr/Rb 比值特征及其环境意义[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(11): 109-114. [Tan Lingling, Zhong Wei, Xue Jibin, et al. Variation of Zr/Rb ratios from the Holocene lacustrine sediments in Balikun Lake in Xinjiang and its environmental implications[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(11): 109-114.]
- [42] 吴旭东,沈吉,汪勇. 全新世低纬地区古环境演化与北大西洋之间的联系:以湖光岩玛珉湖元素和元素比值记录为例[J]. *沉积学报*, 2011, 29(5): 926-934. [Wu Xudong, Shen Ji, Wang Yong. The Holocene climate linkage between low latitude area and North Atlantic: Case study on element and element ratios of Huangyuan Maar lake[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(5): 926-934.]
- [43] 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: 1-476. [Shen Ji, Xue Bin, Wu Jinglu, et al. *Lake sediments and environmental evolution* [M]. Beijing: Science Press, 2010: 1-476.]
- [44] Rowell H C, Bopp R F, Peng F, et al. Annually laminated sediments from Onondaga Lake, New York (USA) provide a basis for high-resolution studies of lake degradation and recovery[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2015, 53(1): 107-121.
- [45] 李清,康世昌,张强弓,等. 青藏高原纳木错湖近 150 年来气候变化的湖泊沉积记录[J]. *沉积学报*, 2014, 32(4): 669-676. [Li Qing, Kang Shichang, Zhang Qiangong, et al. A 150 year climate change history reconstructed by lake sediment of Nam Co, Tibetan Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2014, 32(4): 669-676.]
- [46] 田庆春,杨太保,张述鑫,等. 青藏高原腹地湖泊沉积物磁化率及其环境意义[J]. *沉积学报*, 2011, 29(1): 143-150. [Tian Qingchun, Yang Taobao, Zhang Shuxin, et al. Magnetic susceptibility and its environmental significance of lake sediments in Tibet Plateau[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2011, 29(1): 143-150.]
- [47] Wünnemann B, Yan D D, Andersen N, et al. A 14 ka high-resolution d18O lake record reveals a paradigm shift for the process-based reconstruction of hydroclimate on the northern Tibetan Plateau[J]. *Quaternary Science Reviews* 2018, 200: 65-84.

[48] Yan D D, Wünnemann B, Zhang Y Z, et al. Response of lake-catchment processes to Holocene climate variability: Evidences

from the NE Tibetan Plateau [J]. *Quaternary Science Reviews* 2018, 201: 261-279.

## Geochemistry Record and Their Environmental Implications during the Past 14 ka in Kuhai Lake, NE Tibetan Plateau

HU YanBo<sup>1</sup>, Bernd Wünnemann<sup>1,2,3</sup>, ZHANG YongZhan<sup>1,4</sup>, YAN DaDa<sup>2,3</sup>

1. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210023, China

2. Institute of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

3. Department of Earth Sciences, Free University Berlin, Berlin 12249, Germany

4. Key Laboratory of Coast & Island Development (Nanjing University), Ministry of Education, Nanjing 210023, China

**Abstract:** Lake basins on the northeastern Tibetan Plateau are regarded as important archives for the reconstruction of environmental and climate changes during the Upper Quaternary. Lake deposits serve as ideal indicators of various transport and depositional processes in changing hydro-climatic settings. Understanding such dynamic processes is of crucial interest when deciphering the process-response behavior of lakes from their sedimentary characteristics over time. The closed saline Kuhai Lake is an ideal location for unraveling sediment dynamics and related lake level changes during the last 14 ka B.P., as revealed by sediment core KH17 (around 7 m long) retrieved from the deepest part of the lake basin. Sediment grain size, loss on ignition (LOI) and X-ray fluorescence (XRF) were used to determine such depositional and transportation processes. Principal component analysis (PCA) shows that PC1, characterized by high positive loadings of K, Ti, Mn, Fe and Rb, is related to the detrital material transported by inflowing rivers. Ca and Sr in PC2 have high correlation coefficients indicating the varying intensity of local evaporation. Zr (high loadings on PC3) and Rb are related to coarse and fine sediment components respectively, which are mainly transported by wind and suspended load of inflows. The Zr/Rb ratio was used to judge the intensity of geochemical weathering. Fe/Mn and Sr/Ca indicate redox conditions and salinity, which are related to lake level changes. Based on the proxies, the environmental history over the past 14 ka was reconstructed as follows. During 13.6~13 ka B.P., the Kuhai Lake Basin was covered by a shallow water body, and strongly influenced by inflow variations. The Younger Dryas interval between 13 and 11.5 ka B.P. experienced cold, dry conditions and increased aeolian transport, which influenced the depositional environment. A 500-year warm and wet intermediate phase may have existed, according to the chronology. Temperatures increased to a large extent since the Early Holocene, which led to increased evaporation and the formation of carbonates following a slight lake level rise. The water depth peaked during the Middle Holocene, reaching the highest level experienced by the lake. After 5.3 ka BP, Kuhai Lake experienced a drier period, with high salinity and varying carbonate precipitation. Water supply has fluctuated greatly since the Late Holocene (2.7 ka B.P.).

**Key words:** X-Ray Fluorescence (XRF); principal component analysis (PCA); element ratios; Tibetan Plateau; lake level