

文章编号 1001-7410(2007)01-100-08

# 青藏高原北缘哈拉湖近 800 年来 湖泊沉积及其环境意义<sup>\*</sup>

曹 洁<sup>①②</sup> 张家武<sup>②</sup> 张成君<sup>②</sup> 陈发虎<sup>②</sup>

(<sup>①</sup>山东省气候中心, 济南 250031; <sup>②</sup>兰州大学西部环境教育部重点实验室中德干旱环境联合研究中心, 兰州 730000)

**摘要** 文章以青藏高原北缘高山祁连山湖泊——哈拉湖作为研究对象, 利用放射性核素<sup>210</sup>Pb 和<sup>137</sup>Cs 测年资料, 通过对此高海拔湖泊沉积碳酸盐氧碳同位素、碳酸盐含量、总有机碳含量、磁化率等环境代用指标的分析, 揭示了这一地区近 800 年来的气候环境变化过程。分析表明哈拉湖记录的气候环境变化经历了 3 个阶段: 1206 ~ 1700 A. D. 环境较为寒冷、湿润, 并有持续变湿的趋势; 1700 ~ 1920 A. D. 环境由冷湿的状况趋向温暖干旱; 1771 年之后, 环境保持相对稳定; 1920 ~ 2002 A. D. 是自 1206 年以来最为温暖干旱的阶段。

**主题词** 哈拉湖 湖泊沉积 碳酸盐氧碳同位素 环境变化

**中图分类号** P597 **文献标识码** A

## 1 前言

过去 2000 年是全球气候变化研究的一个关键时期, 是衔接自然记录和文献记载的重要时期<sup>[1]</sup>。因此众多的学者利用冰芯<sup>[1~3]</sup>、树轮<sup>[4~6]</sup>、湖泊<sup>[7~11]</sup>等各种记录载体进行了过去 2000 年来的气候、环境变化研究。哈拉湖(38°11' ~ 38°25' N, 97°24' ~ 97°47' E)位于青藏高原北缘, 青海省境内祁连山西段疏勒南山南部, 距格尔木东北 300 km。南北岸有高山, 东西面为低矮丘陵(图 1)。哈拉湖近似圆形, 面积为 603.28 km<sup>2</sup>, 长 34.2 km, 最大宽 23 km, 湖面海拔 4078 m, 平均水深为 27.16 m, 最大水深为 65 m, 储水量为 161 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup><sup>[12~14]</sup>。哈拉湖区属青东山地草原半干旱气候, 年均气温 -4℃, 年降水量 200 ~ 300 mm<sup>[13]</sup>。湖泊四周为高山所包围, 自古无人类定居, 属典型的内陆封闭湖泊, 并且其位于中国季风过渡带, 对区域气候变化的响应十分敏感。前人曾对哈拉湖地区的冰川作用特征<sup>[15]</sup>、湖滨沉积物的粒度分布特征<sup>[12]</sup>进行了研究。高原地区比低海拔地区对全球变化反映更敏感<sup>[16]</sup>, 而且高原湖泊记录在反映古气候方面可能与山地冰川具有一致性<sup>[17~11]</sup>。本文以哈拉湖短钻岩芯记录为基础, 探讨

近 1000 年以来该地区的环境变化过程。

## 2 样品采集与实验方法

本文探讨的湖芯 HALA-3B-02 是 2002 年 7 月利用重力采样器在哈拉湖的西北部采集的。其位置(见图 1)为 38°20'44.8"N, 97°26'34.3"E, 长 75 cm, 水深 19.3 m, 表层约 10 cm 为灰黄色碳酸盐泥, 下部为深黑色湖泥, 中部有 3 ~ 4 层水草发育。于采集当天在野外按 1 cm 间隔进行了分样, 装入样品袋中并编号。送回实验室后立即冷冻待分析。

分析前, 在烘箱中 60℃ 恒温干燥, 并称量计算干重。哈拉湖岩芯 HALA-3B-02 样品的放射性核素<sup>210</sup>Pb 和<sup>137</sup>Cs 分析由中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境重点实验室进行。测试前先将样品研磨并过 100 目筛, 去有机质, 装入专用的测试样盒密封。样品<sup>210</sup>Pb 及其母体<sup>226</sup>Ra 和<sup>137</sup>Cs 的放射性比活度是用美国 EG & G Ortec 公司生产的由高纯锗井型探测器(Ortec HPGe GWL)与 Ortec 919 型谱控制器和 IBM 微机构成的 16k 道多道分析器所组成的  $\gamma$  谱分析系统直接测量的。碳酸盐  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  分析采用磷酸法: 将样品在 90℃ 水浴锅中与磷酸充分反应 30 分钟, 在真空系统中提取 CO<sub>2</sub>。碳

第一作者简介: 曹洁, 女, 27 岁, 助理工程师, 全球环境变化专业, E-mail: jcao02@st.lzu.edu.cn

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(批准号: 40301050)和国家自然科学基金人才项目创新研究群体科学基金项目(批准号: 40421101)资助

2006-02-10 收稿, 2006-07-25 收修改稿

通讯作者: 张家武, E-mail: jwzhang@lzu.edu.cn

1) 强明瑞. 青藏高原北缘苏干湖湖芯记录的全新世气候变化研究. 兰州: 兰州大学博士学位论文, 2002

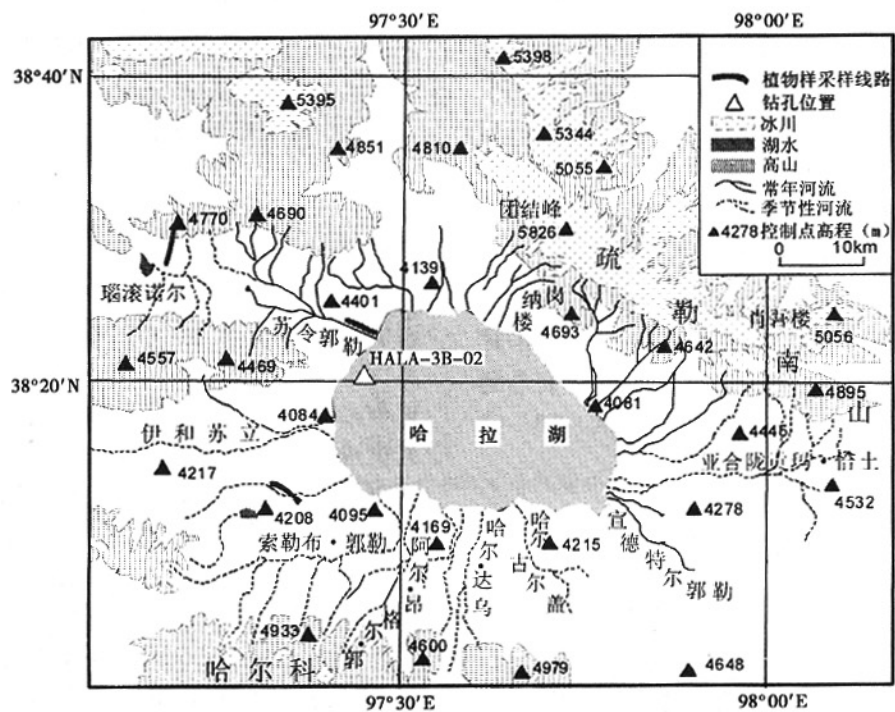


图1 哈拉湖地理位置及湖芯位置

Fig. 1 Core site in Hala Lake drainage

酸盐  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  在 delta plus 稳定同位素质谱仪上测定,采用 PDB 标准,分析精度为  $\delta^{13}\text{C}$  为  $\pm 0.2\text{‰}$ ;  $\delta^{18}\text{O}$  为  $\pm 0.5\text{‰}$ 。为考察碳酸盐来源选取 5 个样品,在兰州大学物理学院进行了 X 衍射实验分析。样品总有机碳含量采用重铬酸钾法在兰州大学环境学实验室进行分析。样品碳酸盐含量使用国产碳酸盐仪测定。磁化率样品在烘箱中  $40^\circ\text{C}$  温度下烘干、磨碎(以不损伤自然颗粒为度),装入特制的 8mm 见方的方形样品测量盒,压紧、称重后测量。磁化率的测量使用英国 Bartington 公司生产的 MS2 型磁化率测量仪和 MS2B 双频探头(高、低频分别为 4.7kHz

和 0.47kHz)。碳酸盐稳定同位素、碳酸盐含量和磁化率实验分析及前处理过程均在兰州大学西部环境教育部重点实验室完成。

3 结果分析与讨论

3.1 年代序列

哈拉湖岩芯的  $^{210}\text{Pb}$  和  $^{137}\text{Cs}$  比活度和沉积通量随深度变化结果如图 2。

一些湖泊沉积岩芯  $^{137}\text{Cs}$  随时间衰变 1954 年时标已经难以辨认<sup>[18,19]</sup> 以及其扩散迁移特性使得时

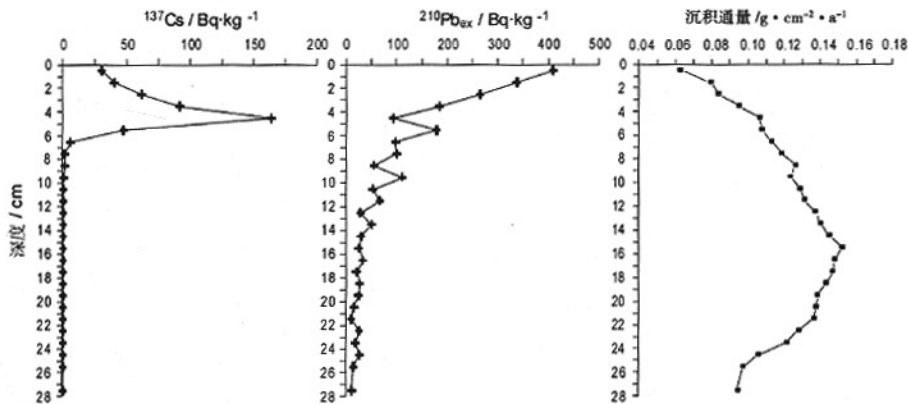


图2  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  比活度和沉积通量随深度变化情况

Fig. 2  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$  dating and sedimentary flux change with depth

标意义不够明确<sup>[20-22]</sup>,哈拉湖也存在类似的情况。哈拉湖年代序列的建立基于<sup>210</sup>Pb 的 CRS 模型年龄以及对其底部沉积速率的线性外推。剖面沉积速率在 21.5cm(对应于 1900 年)以下平均 0.187cm/a,21.5cm(对应于 1900 年)以上突然增大,平均为 0.199cm/a,这可能与进入 20 世纪以来全球人类活动加剧有关。21.5cm 以下剖面岩性较为均一,推定 21.5cm 以下沉积速率均为 0.187cm/a。据此外推,得到岩芯的年代序列,岩芯最底层 75cm 达到(采样时间为 2002 年)796a.B.P.,即 1206A.D.。整个岩芯的平均时间分辨率为 11a。哈拉湖岩芯 HALA-3B-02 的年代序列如图 3。

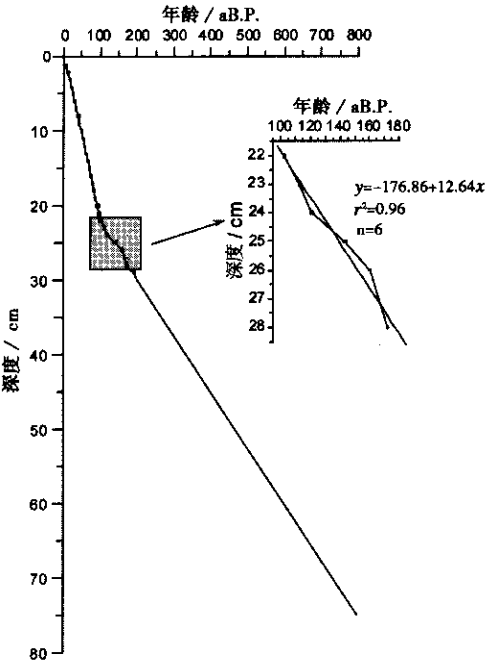


图 3 哈拉湖岩芯 HALA-3B-02 的年代序列  
Fig. 3 Age series of Core HALA-3B-02

3.2 环境代用指标

哈拉湖环境代用指标分析结果如图 4。碳酸盐  $\delta^{18}\text{O}$  值在  $-3.8\text{‰} \sim +1.9\text{‰}$  之间变化,平均值为  $-0.7\text{‰}$ ,同时  $\delta^{13}\text{C}$  值变化在  $1.5\text{‰} \sim 4.9\text{‰}$  范围内,平均值为  $3.3\text{‰}$ 。整个岩芯剖面,氧碳同位素组成曲线在整体上具有相似的形态,变化趋势相对一致。总有机碳含量(TOC)在  $2.3\% \sim 4.9\%$  之间变化,平均值为  $3.1\%$ ,整体看来较为稳定,虽存在波动但整体趋势变化不大。碳酸盐含量在  $17.0\% \sim 42.8\%$  之间变化,整个剖面平均值为  $23.9\%$ 。磁化率( $\chi_{\text{H}}$ )的值在  $9 \times 10^{-8} \sim 19.1 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$  之间变化,均值为  $12.1 \times 10^{-8} \text{m}^3/\text{kg}$ ,整体看来磁化率一直围绕均值波

动变化,直到接近顶部突然大幅度地升高,频率磁化率( $\chi_{\text{fd}}$ )的值在  $-9.4\% \sim +12.2\%$  之间变化,平均值为  $+3.4\%$ ,其值相对稳定没有大的波动变化。

X 衍射实验分析结果表明,岩芯 HALA-3B-02 中选取的 5 个样品中所含的碳酸盐矿物以自生来源的文石和方解石为主,而外生来源为主的白云石几乎检测不出。至少可以定性地说哈拉湖沉积的碳酸盐主要是自生来源的。湖泊沉积物中自生碳酸盐的碳氧同位素组成特征记录了湖区气候变化的信息<sup>[23]</sup>。湖泊自生碳酸盐的碳氧同位素值的协变性可判断湖泊的封闭性<sup>[24]</sup>。哈拉湖碳酸盐氧碳同位素组成  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  存在显著的正相关关系(相关系数  $R=0.902$ ,  $n=74$ ),通过显著性检验( $p>0.01$ ),可见  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  之间存在良好的协变性,哈拉湖泊完全处于封闭状态。对封闭湖泊,湖泊自生碳酸盐  $\delta^{18}\text{O}$  是湖泊汇水区气温、空气相对湿度和入流水同位素组成三者的函数<sup>[25]</sup>,指示湖水蒸发与降水的比值,是表征流域有效湿度的指标。 $\delta^{13}\text{C}$  主要和大气  $\text{CO}_2$  与湖泊水体中碳的交换、湖水的硬度、湖泊生产力等因素有关,取决于发生沉淀的湖水中溶解无机碳(DIC)的  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ <sup>[23]</sup>。对哈拉湖而言, $\delta^{13}\text{C}$  表征了湖区温度(常年低温导致的冰封状态)对大气  $\text{CO}_2$  与湖泊水体中碳的交换的影响。湖泊沉积物中的 TOC 代表湖泊及其流域初始生产力,虽然受到保存条件的影响,但仍然能够反应当时湖泊及流域的生物和植被状况。湖泊沉积物中的碳酸盐含量高低分别指示湖水的咸化与淡化,间接反应气候的干湿变化<sup>[26]</sup>。频率磁化率的变化主要受湖泊沉积动力的影响,间接地反映气候的干湿变化。哈拉湖以冰川融水为主要补给,气温短时间内骤然升高可能导致大量冰川融化汇成较大的地表径流,地表侵蚀加强,被带入湖的铁磁性物质中大颗粒增加,细颗粒铁磁性物质所占比重相对减少,使得频率磁化率反而降低;反之亦然。总之,频率磁化率可能更反映了湖泊短时期的环境变化情况或湖泊气候环境的波动。磁化率升高也可能是由于温度大幅升高时,湖泊水体增加,湖面增高,湖泊中大量的微生物活动,高湖面使湖泊还原面积扩大,有利于自生的铁细菌产生具有较强磁性的莓球状黄铁矿。总的看来,对于哈拉湖地区,气温长期变化的主要作用可能是对蒸发能力的控制,而气温短期变化可能导致某些代用指标的突变。

3.3 哈拉湖近 800 年来的环境变化

综合考察近 800 年来湖泊沉积反映的环境变

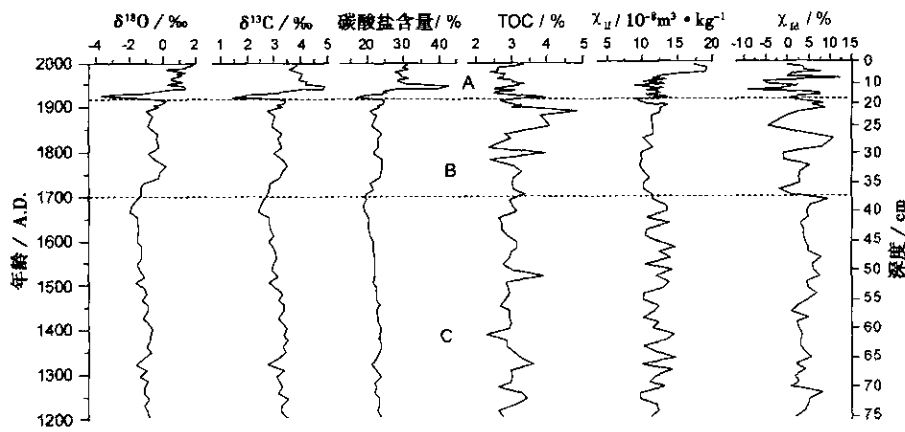


图 4 哈拉湖近 800 年来环境变化

Fig. 4 Environmental changes of the past ca. 800 years in Hala Lake

化,可将哈拉湖近 800 年环境变化划分为 3 个阶段来进行讨论(图 4)。

阶段 C :1206 ~ 1700A. D. 湖区环境较为寒冷、湿润并有持续变湿的趋势,湖水硬度较小且趋于淡化。本阶段  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  与碳酸盐含量具有相同的持续降低的变化趋势,整体上处于低值段,可能表明了湖区蒸发处于较弱,气温较低,同时湖水硬度相对较低,湿度较大。这 3 项代用指标在 1666 年达到前所未有的低值,可能指示环境呈现 1206 年以来最为冷湿的状态。频率磁化率略有升高波动不大,可能指示此时湖区气候波动较小。

阶段 B :1700 ~ 1920A. D. 湖区环境初期由冷湿的状态趋向温暖干旱化,之后又有所回转,整体上看,处于相对温暖干旱的阶段。本阶段湖泊沉积的  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  与碳酸盐含量变化趋势一致,初期  $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  与碳酸盐含量各值均升高较快,于 1771 年达到极值,说明环境朝着干旱化的方向发展,蒸发强度快速增大,湖水咸化,1771 年达到相当高温干旱的状态;1780 ~ 1900 年湖区蒸发又有所减弱,湖水盐度减小,这个时期可能是湖区环境暖干化过程中的一个相对冷湿的阶段;1900 年以后又继续暖干化。TOC 的值较前一阶段有所升高表明流域或湖泊生产力有所增加,其中几个极端高值可能与岩芯某些层位嵌入少量水草有关。磁化率的值初期有所降低,同时波动变化的频度、幅度大大减少,表明强蒸发环境使得湖泊面积萎缩,还原性环境的缺失使自生铁细菌产生的磁性物质大大减少;1780 ~ 1900 年磁化率出现缓慢升高的趋势,也表明湖区蒸发减弱,湖泊面积又有所回升;1900 年以后磁化率又迅速降低,指示蒸发又重新加强。在剔除岩芯某些层位嵌

入少量水草的影响后,频率磁化率可能与磁化率的变化趋势类似,前一阶段为低值后一阶段为高值。

阶段 A :1920 ~ 2002A. D. 是自 1206 年以来最为温暖干旱的阶段。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  与碳酸盐含量的值都进一步升高,说明湖区环境正在处于快速暖干化过程。TOC 在这个时期波动减小,可能是由于湖水盐度增高,水生生物减少。磁化率在这个阶段可能主要受外源输入磁性物质的影响,在 1970 年之前一直呈现快速波动变化,但值相对稳定,表明输入湖泊物质较为稳定,而在 1970 年之后其值迅速升高,增加幅度约 54%,这表明输入湖泊的流域物质大量增加,可能与 20 世纪后期当地采金活动急剧增加<sup>[27]</sup>,对自然的影响程度迅速增大,影响范围迅速扩大有关。频率磁化率波动频繁,幅度增大,整个剖面的最大值和最小值均在本阶段出现,指示了气候环境的波动。

从重建的哈拉湖近 800 年来环境变化(见图 4)来看,在 1590 ~ 1735 年之间的时期内, $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$  与碳酸盐含量出现一个显著低值段,表明气候处于寒冷湿润状态,特别是在曲线上所反映的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  共同的谷值阶段 1653 ~ 1718 年期间湖区气温达到最低,流域的有效湿度达到历史以来最高,而环境状况最冷湿的年份是 1666 年。这与冯松等 17 世纪 50 年代是青藏高原近 600 年来最冷时期的结论<sup>[28]</sup>相符。1645 ~ 1715 年,正是小冰期降温最明显的 Maunder Minimum 时期,我国年代处在明末清初,国内气候奇冷,8 级以上大地震频频发生,飓风、海啸次数增多,火山活动加强<sup>[29]</sup>。祁连山敦德冰芯记录(38°06'N,96°24'E)表明,1580 ~ 1680 年  $\delta^{18}\text{O}$  是低值段,即低温时期,最低谷在 1660 年附近<sup>[30]</sup>。西昆



仑山古里雅冰芯(35.2°N 81.5°E)1650~1710 年为一明显的冷期,但积累量较高,表明降雪量较大<sup>[31]</sup>。青海湖湖心区沉积物分析表明,17 世纪为一明显的冷期,湖水却明显淡化,可分为前后 2 个亚冷期,后期更甚,其最低点位于 1688 年左右<sup>[32,33]</sup>,最近沈吉和张恩楼等<sup>[8,34]</sup>进一步加大沉积分辨率分析,确定 1620~1680 年为最冷期,最低点约为 1660 年。冯松等<sup>[35]</sup>计算 1650~1700 年青海湖的水位高出现今 14m,达 3208m。哈拉湖记录反映出 17 世纪下半叶至 18 世纪初是青藏高原北部近 800 年来最为冷湿的时期,这与其他自然记录一致,可能对应于“小冰期”盛期。而 1780~1900 年又呈现为哈拉湖暖干化过程中的一次回冷,它伴随低蒸发的湿润状态出现,这个时期可能与其他记录<sup>[36]</sup>所描述的“小冰期”第 3 个冷期(1790~1890 年)相对应。至于小冰期第 1 个冷期(1450~1510 年)<sup>[36]</sup>在哈拉湖未呈现出明显的阶段,但哈拉湖 TOC 记录在 1510~1540 年期间呈现一个高值,可能对应小冰期 1510~1560 年相对暖期<sup>[36]</sup>,而这个相对暖期在哈拉湖可能表现为暖湿状态,蒸发仍然较弱,因此,此时的  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  并未呈现明显高值。从而在整体看来,哈拉湖区环境在演化阶段 C 一直持续冷湿化过程,小冰期第 1 个冷期与冰盛期之间没有明显界限。

从哈拉湖沉积记录的  $\delta^{13}\text{C}$  曲线及其所代表的的环境意义显示,20 世纪是近 800 年来最暖的 100 年。IPCC 及 Mann 等<sup>[37]</sup>的研究成果显示:“北半球 20 世纪是过去 1000 年最暖的世纪”。杨梅学等<sup>[38]</sup>利用古里雅冰芯近 2000 年来的温度代用资料,用奇异谱分析方法对气候变化的趋势及人类活动造成的影响进行了分析,指出近 2000 年来气候一直在变暖,这是气候的自然变暖过程,20 世纪成为过去 2000 年来最温暖的 100 年。

哈拉湖的记录在 1925 年前后,  $\delta^{18}\text{O}$  和  $\delta^{13}\text{C}$  与碳酸盐含量同时出现一次显著的异常偏负,可能指示了 1925 年前后气温突然升高,导致大量冰川消融,大量富含轻同位素的淡水注入,湖水体积突然增大,使得水中  $^{18}\text{O}$ ,  $^{13}\text{C}$  和  $\text{CO}_3^{2-}$  及  $\text{HCO}_3^-$  浓度突然减小。而 20 世纪 20 年代正是中国和全球突变增暖的时期<sup>[39~41]</sup>。

## 4 结论

通过哈拉湖沉积记录重建了青藏高原北部近 800 年的由持续冷寒湿润变为最为温暖干旱的环境变化过程。17 世纪下半叶至 18 世纪初是青藏高原

北部近 800 年来最为冷湿的时期。青藏高原北部的环境在 20 世纪变得最为暖干,20 世纪是近 800 年来最暖的 100 年。哈拉湖碳酸盐氧碳同位素与碳酸盐含量在 1925 年前后显著的异常偏负反映了 20 世纪 20 年代中国和全球突变增暖。

致谢 衷心感谢兰州大学周爱峰、杨美临,中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所尚华明,甘肃省气象局史志娟,在野外采样、室内实验、论文撰写及修改过程中给予的支持与帮助!

## 参考文献(References)

- 姚檀栋,徐柏青. 青藏高原过去 2000 年来气候环境变化研究. 科技导报, 2005 (1): 14~17  
Yao Tandong, Xu Baiqing. Study on the climatic and environmental change over the last 2000 years in the Qinghai-Tibet Plateau. *Science & Review Technology*, 2005, (1): 14~17
- 徐柏青,姚檀栋,Chappellaz J. 过去 2000 年大气甲烷含量与气候变化的冰芯记录. 第四纪研究, 2006, 26(2): 173~184  
Xu Baiqing, Yao Tandong, Chappellaz J. Atmospheric methane concentration and climate change recorded in ice cores over the past 2000 years. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2): 173~184
- 康世昌,秦大河,任贤文等. 青藏高原南部冰芯记录与大气环流的关系. 第四纪研究, 2006, 26(2): 153~164  
Kang Shichang, Qin Dahe, Ren Jiawen *et al.* Relationships between an ice core records from Southern Tibetan Plateau and atmospheric circulation over Asia. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(2): 153~164
- 刘晓宏,秦大河,邵雪梅等. 祁连山中部过去近千年温度变化的树轮记录. 中国科学(D 辑), 2004, 34(1): 89~95  
Liu Xiaohong, Qin Dahe, Shao Xuemei *et al.* A ~1000 temperature variability on the middle of Qilian Mountain recorded by tree ring. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(1): 89~95
- 刘洪滨,邵雪梅,黄磊等. 青海省海西州德令哈地区近千年来年降水量变化特征分析. 第四纪研究, 2005, 25(2): 176~183  
Liu Hongbin, Shao Xuemei, Huang Lei *et al.* Statistical characteristics of annual precipitation variation during the past 1000 years in Delingha, Qinghai Province, China. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 176~183
- 靳立亚,秦宁生,勾晓华等. 青海南部高原近 450 年来春季最高气温序列及其时变特征. 第四纪研究, 2005, 25(2): 193~201  
Jin Liya, Qin Ningsheng, Gou Xiaohua *et al.* Series of spring maximum temperature in Southern Qinghai Plateau and analysis of its variations during the last 450 years. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(2): 193~201
- Andrea L, Aldo M, Rossana L B *et al.* The last ca. 2000 years palaeolimnology of Lake Candia (N. Italy): Inorganic geochemistry, fossil pigments and temperature time-series analyses. *Journal of Limnology*, 2000, 59(1): 31~46
- 沈吉,张恩楼,夏威岚. 青海湖近千年来气候环境变化的湖泊沉积记录. 第四纪研究, 2001, 21(6): 508~513  
Shen Ji, Zhang Enlou, Xia Weilan. Records from lakes sediments of

the Qinghai Lake to Mirror climatic and environmental changes of the past about 1000 years. *Quaternary Sciences* 2001 **21**( 6 ):508 ~ 513

9 李世杰,王小天,夏威夷等. 青藏高原古鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化. 第四纪研究 2004 **24**( 5 ):578 ~ 584

Li Shijie ,Wang Xiaotian ,Xia Weilan *et al.* The Little Ice Age climate fluctuations derived from lake sediments of Goulucuo ,Qinghai-Xizang Plateau. *Quaternary Sciences* ,2004 ,**24**( 5 ):578 ~ 584

10 吴敬禄,刘建军,王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征. 第四纪研究 2004 **24**( 5 ):585 ~ 590

Wu Jinglu ,Liu Jianjun ,Wang Sumin. Climatic change record from stable isotopes in Lake Aibi ,Xinjiang during the past 1500 years. *Quaternary Sciences* ,2004 ,**24**( 5 ):585 ~ 590

11 许清海,肖举乐,中村俊夫等. 湖泊孢粉记录的岱海盆地 1500 年以来气候变化. 第四纪研究 2004 **24**( 3 ):341 ~ 347

Xu Qinghai ,Xiao Jule ,Toshio Nakamura *et al.* Climate changes of Daihai basin during the past 1500 from a pollen record. *Quaternary Sciences* ,2004 **24**( 3 ):341 ~ 347

12 武安斌. 哈拉湖湖滨沉积物的粒度分布特征及其环境意义. 沉积学报 ,1985 **3**( 2 ):141 ~ 149

Wu Anbin. The characteristic and environmental significance of grain-size distribution of Hala Hu lake-shore sediments. *Acta Sedimentologica Sinica* ,1985 **3**( 2 ):141 ~ 149

13 王苏民,窦鸿身主编. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社 ,1998. 478

Wang Sumin ,Dou Hongshen eds. Chinese Limnology Record. Beijing :Science Press ,1998. 478

14 申元村,向理平编著. 青海省自然地理. 北京: 海洋出版社 ,1991. 43

Shen Yuancun ,Xiang Liping eds. Physical Geography of Qinghai Province. Beijing :China Ocean Press ,1991. 43

15 伍光和,刘潮海. 哈拉湖流域的冰川作用特征及水资源利用问题. 冰川冻土 ,1980 ( 2 ):27 ~ 32

Wu Guanghe ,Liu Chaohai. Glacier effect characteristic and water resource utility problem in the drainage area of Hala Lake. *Journal of Glaciology and Geocryology* ,1980 ,( 2 ):27 ~ 32

16 姚檀栋,刘晓东,王宁练. 青藏高原地区的气候变化幅度问题. 科学通报 2000 **45**( 1 ):98 ~ 106

Yao Tandong ,Liu Xiaodong ,Wang Ninglian. Climate fluctuating amplitude in Qinghai-Tibet Plateau. *Chinese Science Bulletin* ,2000 ,**45**( 1 ):98 ~ 106

17 强明瑞,陈发虎,周爱锋等. 苏干湖沉积物粒度组成记录尘暴事件的初步研究. 第四纪研究 2006 **26**( 6 ):915 ~ 922

Qiang Mingrui ,Chen Fahu ,Zhou Aifeng *et al.* Preliminary study on dust storm events documented by grain size component of Sugan Lake sediments ,North Gaidam basin. *Quaternary Sciences* ,2006 ,**26**( 6 ):915 ~ 922

18 万国江,白占国,黄荣贵等. 湖泊现代沉积作用核素示踪研究新进展. 地质地球化学 ,1996 ( 2 ):9 ~ 13

Wan Guojiang ,Bai Zhanguo ,Huang Ronggui *et al.* Last progress in radionuclide tracing study of lake modern sediment function. *Geology Geochemistry* ,1996 ,( 2 ):9 ~ 13

19 王晓燕,田均良. 环境演变研究时间序列的建立方法评述. 海洋地质动态 2002 **18**( 12 ):22 ~ 27

Wang Xiaoyan ,Tian Junliang. Establishment of time sequence of environmental evolution. *Marine Geology Letters* 2002 **18**( 12 ):22 ~ 27

20 项亮,夏威夷,王苏民. 黄河源区希门错湖泊沉积孔柱放射性核素分布及时标信息辨析. 见: 青藏项目专家委员会编. 青藏高原形成演化、环境变迁与生态系统研究. 学术论文年刊( 1994 ). 北京: 科学出版社 ,1995. 168 ~ 174

Xiang Liang ,Xia Weilan ,Wang Sumin. Radionuclide distribution and dating sign distinguishing of sediment profile in Ximencuo Lake ,the headstream area of the Yellow River. In :Committee of Experts for Qinghai-Xizang ( Tibet ) Project ed. Academic Annual of Formation ,Evolution ,Environment Change and Ecosystem of Qinghai-Xizang( Tibet ) Plateau ,1994. Beijing :Science Press ,1995. 168 ~ 174

21 项亮. <sup>137</sup>Cs 湖泊沉积年代学方法应用的局限——以 Crawford 湖为例. 湖泊科学 ,1995 **7**( 4 ):307 ~ 313

Xiang Liang. Limitations of the application of <sup>137</sup>Cs limnochronology : A case study of <sup>137</sup>Cs profile in Crawford Lake sediment. *Journal of Lake Sciences* ,1995 **7**( 4 ):307 ~ 313

22 孙广立,谢周清,赵俊琳等. 南极阿德雷岛湖泊沉积 <sup>210</sup>Pb、<sup>137</sup>Cs 定年及其环境意义. 湖泊科学 2001 **13**( 1 ):93 ~ 96

Sun Guangli ,Xie Zhouqing ,Zhao Junlin *et al.* <sup>210</sup>Pb ,<sup>137</sup>Cs dating of lake sediments from Ardley Island ( Maritime Antarctic ) and their environmental implications. *Journal of Lake Sciences* ,2001 ,**13**( 1 ):93 ~ 96

23 万国江,唐德贵,吴丰昌等. 湖泊水 - 沉积物碳系统研究新进展. 地质地球化学 ,1996 ( 2 ):1 ~ 4

Wan Guojiang ,Tang Degui ,Wu Fengchang *et al.* Last progress in limnological water-carbon-in-sediment system study. *Geology Geochemistry* ,1996 ,( 2 ):1 ~ 4

24 李红春,朱照宇. 美国西部 Owens 湖地球化学记录及其古气候意义. 第四纪研究 2002 **22**( 6 ):578 ~ 588

Li Hongchun ,Zhu Zhaoyu. Geochemical records and their paleo-climate significance in Owens Lake ,Western USA. *Quaternary Sciences* ,2002 ,**22**( 6 ):578 ~ 588

25 卫克勤,林瑞芬. 内陆封闭湖泊自生碳酸盐氧同位素剖面的古气候意义. 地球化学 ,1995 **24**( 3 ):215 ~ 224

Wei Keqin ,Lin Ruifen. Palaeoclimatic implications of oxygen isotope profiles of authigenic carbonates from inland closed lakes. *Geochimica* ,1995 ,**24**( 3 ):215 ~ 224

26 张振克,吴瑞金,王苏民等. 近 2600 年来内蒙古居延湖湖泊沉积记录的环境变迁. 湖泊科学 ,1998 **10**( 2 ):44 ~ 51

Zhang Zhenke ,Wu Ruijin ,Wang Sumin *et al.* Environmental changes recorded by lake sediments from east Juyanhai Lake in Inner Mongolia during the past 2600 years. *Journal of Lake Sciences* ,1998 ,**10**( 2 ):44 ~ 51

27 武安家. 青海打响禁采砂金战. 青海国土经略 2002 ( 1 ):47

Wu Anjia. Forbidding collecting gold dust in the Qinghai Province. *Qinghai Country Survey* ,2002 ,( 1 ):47

28 冯松,姚檀栋,江灏等. 青藏高原近 600 年的温度变化. 高原气象 2001 **20**( 1 ):105 ~ 108

Feng Song ,Yao Tandong ,Jiang Hao *et al.* Temperature varations over Qinghai-Xizang Plateau in the past 600 years. *Plateau Meteorology* ,2001 ,**20**( 1 ):105 ~ 108

29 宋燕,季劲钧,王月宾等. 小冰期气候研究回顾和机理探寻. 气象 2003 **29**( 7 ):3 ~ 7

Song Yan , Ji Jinjun , Wang Yuebin *et al.* Reviews on Little Ice Age climate and approach to its mechanism. *Meteorological Monthly* , 2003 , **29**( 7 ) : 3 ~ 7

30 姚檀栋 , 谢自楚 , 武筱玲. 敦德冰帽中的小冰期气候记录. 中国科学( B 辑 ) , 1990 ( 11 ) : 1196 ~ 1201

Yao Tandong , Xie Zichu , Wu Xiaoling. Little Ice Age climatic record in the Dundee Ice Cap. *Science in China ( Series B )* , 1990 , ( 11 ) : 1196 ~ 1201

31 姚檀栋. 古里雅冰芯近 2000 年来气候环境变化记录. 第四纪研究 , 1997 ( 1 ) 52 ~ 61

Yao Tandong. Climatic and environmental record in the past about 2000 years from the Guliya ice core. *Quaternary Sciences* , 1997 , ( 1 ) : 52 ~ 61

32 王苏民 , 李建仁. 湖泊沉积——研究历史气候的有效手段 : 以青海湖、岱海为例. 科学通报 , 1991 **36**( 1 ) 54 ~ 56

Wang Sumin , Li Jianren. Lake sediment——An effective measure to study paleoclimatic : Two cases of Qinghai Lake and Daihai Lake. *Chinese Science Bulletin* , 1991 , **36**( 1 ) : 54 ~ 56

33 王苏民 , 刘 健 , 周 静. 我国小冰期盛期的气候环境. 湖泊科学 2003 **15**( 4 ) 369 ~ 376

Wang Sumin , Liu Jian , Zhou Jing. The climate of Little Ice Age Maximum in China. *Journal of Lake Science* , 2003 , **15**( 4 ) : 369 ~ 376

34 张恩楼 , 沈 吉 , 王苏民等. 青海湖近 900 年来气候环境演化与湖泊沉积记录. 湖泊科学 2002 **14**( 1 ) 32 ~ 38

Zhang Enlou , Shen Ji , Wang Sumin *et al.* Climate and environment change during the past 900 years in Qinghai Lake. *Journal of Lake Sciences* , 2002 , **14**( 1 ) : 32 ~ 38

35 冯 松 , 汤懋苍 , 周陆生. 青海湖近 600 年的水位变化. 湖泊科学 2000 **12**( 3 ) 205 ~ 210

Feng Song , Tang Maocang , Zhou Lusheng. Level fluctuation in Qinghai Lake during the last 600 years. *Journal of Lake Sciences* , 2000 , **12**( 3 ) : 205 ~ 210

36 李明启 , 靳鹤龄 , 张 洪. 小冰期气候的研究进展. 中国沙漠 , 2005 **25**( 5 ) 731 ~ 737

Li Mingqi , Jin Heling , Zhang Hong. Advances of climate research in the Little Ice Age. *Journal of Desert Research* , 2005 , **25**( 5 ) : 731 ~ 737

37 Mann M E , Bradley R S , Hughes M K. Northern hemisphere temperatures during the past millennium : Inferences , uncertainties and limitations. *Geophysical Research Letters* , 1999 , **26** : 759 ~ 762

38 杨梅学 , 姚檀栋. 近 2000 来古里雅冰芯记录及 19 ~ 20 世纪的气候变暖. 冰川冻土 2004 **26**( 3 ) 289 ~ 293

Yang Meixue , Yao Tandong. Ice core records in the past 2000 years and climate warming during the 18th ~ 20th centuries. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2004 , **26**( 3 ) : 289 ~ 293

39 丁一汇 , 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. 气象 , 1994 , **20**( 12 ) 19 ~ 26

Ding Yihui , Dai Xiaosu. Temperature variation in China during the last 100 years. *Meteorology* , 1994 , **20**( 12 ) : 19 ~ 26

40 曾昭美 , 严中伟 , 叶笃正. 20 世纪两次全球增暖事件的比较. 气候与环境变化 2003 **8**( 3 ) 319 ~ 330

Zeng Shaomei , Yan Zhongwei , Ye Duzheng. Two global warming events in the 20th century. *Climatic and Environmental Research* , 2003 , **8**( 3 ) 319 ~ 330

41 卢爱刚 , 何元庆 , 张忠林等. 中国大陆对全球变暖响应的区域敏感性分析. 冰川冻土 2005 **27**( 6 ) 827 ~ 832

Lu Aigang , He Yuanqing , Zhang Zhonglin *et al.* Regional sensitivities of the response to the global warming across China in the 20th century. *Journal of Glaciology and Geocryology* , 2005 , **27**( 6 ) : 827 ~ 832

# ENVIRONMENTAL CHANGES DURING THE PAST 800 YEARS RECORDED IN LAKE SEDIMENTS FROM HALA LAKE ON THE NORTHERN TIBETAN PLATEAU

Cao Jie<sup>①②</sup>      Zhang Jiawu<sup>②</sup>      Zhang Chengjun<sup>②</sup>      Chen Fahu<sup>②</sup>

( ①Shandong Climate Centre , Jinan 250031 ; ②Center for Arid Environment & Paleoclimate Research , Key Laboratory of Western China's Environment Systems ( Ministry of Education ) , College of Earth and Environment Sciences , Lanzhou University , Lanzhou 730000 )

## Abstract

Being surrounded with high mountains , the Hala Lake , is a large salty lake with an altitude of 4078m in the north of the Tibetan Plateau. Due to little human impacts on the lake drainage , the Hala Lake , as a typical inland closed lake located on the Chinese monsoon transition line , can provide sensitive information on the past climatic and natural environmental changes. Plateau area has been reported to be more sensitive in response to global change than the area at lower altitudes. Here we present the result of a short core retrieved from the Hala Lake in the north of Tibetan Plateau. The short core HALA - 3B - 02 , 75cm long , was taken with a weight sampler at water depth of 19.3m in the north-west of Hala Lake ( 38°20'44.8"N , 97°26'34.3"E ) in July , 2002.

Sediment samples from the sediment core drilled at the high-altitude Hala Lake were analyzed for a range of palaeoenvironmental indicators , which include stable isotope of oxygen and carbon of carbonates (  $\delta^{13}\text{C}$  &  $\delta^{18}\text{O}$  ) , total organic carbon content , carbonate content as well as magnetic susceptibility. Chronology of the sediment core

was determined using  $^{210}\text{Pb}$  and  $^{137}\text{Cs}$ . However, the  $^{137}\text{Cs}$  dating result shows that the cumulating peak of the year of 1954 is hardly distinguishable due to disintegration with time. In addition, because of its diffusion and transference features,  $^{137}\text{Cs}$  cumulating peak is considered improper for dating. Hala Lake chronology was thus established on dating series from  $^{210}\text{Pb}$  CRS model and linear extrapolating based on bottom deposit rates. Average deposit rate of the profile under 21.5 cm (corresponding to the year of 1900) is 0.187 cm/a, while that above 21.5 cm suddenly rises to 0.199 cm/a, which is possibly relevant to more and more intense human activities since the 20<sup>th</sup> century. The lithology of the profile from bottom to 21.5 cm appears to be comparatively conformed, hereby corresponding deposit rate is supposed to be 0.187 cm/a. The earliest time was thus extrapolated to be 796 years before 2002 A. D., namely 1206 A. D. The average time resolution reaches 11 a.

Mineral content was analyzed from 5 selected sediment samples by X-ray diffraction. All analyzed samples were mainly composed of authigenous aragonite and calcite. Therefore the carbonates in Hala Lake sediment are mainly authigenous. In terms of the Hala Lake,  $\delta^{13}\text{C}$  possibly reveals drainage temperature (icebound state due to perennial low temperature) effect on exchange between atmospheric carbon dioxide and aquatic carbon. Total organic carbon content (TOC) in lake sediment stands for the biological primary production in the lake and/or the drainage. Thereby sediment TOC can reveal historical vegetation state, which is unavoidably affected by preservation condition. Carbonate content in lake sediment can indicate aquatic salinity variation and consequently indicate the environmental humidity variation indirectly. Frequency magnetic susceptibility is affected by dynamical factors in lacustrine deposition and also indirectly indicates the environmental humidity variability.

Palaeoclimatic proxies show that the  $\delta$  value of oxygen of carbonate varies from  $-3.8\text{‰}$  to  $+1.9\text{‰}$  with an average of  $-0.7\text{‰}$ , while the  $\delta$  value of carbon is from  $1.5\text{‰}$  to  $4.9\text{‰}$ , and the average is  $3.3\text{‰}$ . The oxygen and carbon isotope curves change covariantly along the whole profile. The variation range of TOC is from 4.9% to 2.3%, and the average is 3.1%, which seems to be relatively stable as a whole except some small fluctuations. Carbon content fluctuates between 17.0% and 42.8% with an average of 23.9%. The magnetic susceptibility, averaged at the level of  $12.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ , fluctuates between  $9 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$  and  $19.1 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{kg}$ . It rises rapidly near the top. Frequency magnetic susceptibility varies with smaller magnitude, from  $-9.4\%$  to  $+12.2\%$ , averaging at  $+3.4\%$ .

A palaeoenvironmental history of ca. 800-year of the lake is reconstructed on the basis of multi-proxy analyses. The general environment change is from cool and wet to warm and dry. Three stages can be recognized: 1206 ~ 1700 A. D., a cool and wet climate with a gradually cooling and wetting trend. 1700 ~ 1920 A. D. is a more or less fluctuating period. Coincident fluctuating of oxygen and carbon stable isotopes ( $\delta$  values) indicates that there was a warming and drying period before 1771 A. D. and subsequently a comparatively cool and wet period during 1780 ~ 1900 A. D. 1920 ~ 2002 A. D., the warmest and driest stage. Magnetic susceptibility appears to be fluctuating on a stable level in high frequency before 1970 A. D., but rises rapidly after 1970 A. D. with an ascending range of about 54%, indicating a sharply increased anthropologic gold mining activities since 1970s. The low value of  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  as well as carbonate content corresponding to the period of 1653 ~ 1718 A. D. indicates the lowest temperature and highest efficient humidity in the drainage history. This period was the coldest and wettest in the north of Qinghai-Tibet Plateau in the past ca. 800 years. The  $\delta^{13}\text{C}$  curve variability shows that the environmental state of the north of Qinghai-Tibet Plateau became the warmest and driest in the 20<sup>th</sup> century, *i. e.*, 20<sup>th</sup> century is the hottest 100 years during the past ca. 800 years.  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  values of carbonate and carbonate content in the profile simultaneously decrease remarkably around 1925 A. D. This may reflect the rapid warming occurred in China and the world in the 1920s.

**Key words** Hala Lake, lake sediment, stable isotope of oxygen and carbon of carbonates, environmental change