

可可西里库赛湖 KS-2006 孔矿物组成揭示的青藏高原北部晚全新世气候变迁*

姚波^{1,2}, 刘兴起^{1**}, 王永波³, 杨波⁴

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

(3: Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Research Unit Potsdam, Potsdam 14473)

(4: 中国科学院青海盐湖研究所, 西宁 810008)

摘要: 通过对可可西里库赛湖 KS-2006 孔矿物组合的分析表明: 库赛湖沉积的碳酸盐为以文石为主的自生碳酸盐, 其含量的高低能够指示温度的变化; 盐类矿物只是在 2150 cal aBP 以来才出现, 表明湖水盐度增高, 与此同时, 石英含量的持续增高可能同冷干气候条件下该区风成活动的加强有关。青藏高原北部晚全新世的气候环境演化过程为: 3770–2550 cal aBP 期间气候条件整体较为温暖; 2550–2150 cal aBP 期间, 气温缓慢下降有变冷的趋势; 约 2150 cal aBP 至今, 气候迅速转冷, 湖区湿度降低, 湖水盐度增高, 风成活动加强, 但 900–700 cal aBP 期间, 为明显的温暖时期。

关键词: 青藏高原北部; 可可西里; 库赛湖; 矿物组合; 晚全新世; 气候演化

Late Holocene climatic changes revealed by mineralogical records from lacustrine core KS-2006 from Lake Kusai in the Hoh Xil area, northern Tibetan Plateau

YAO Bo^{1,2}, LIU Xingqi¹, WANG Yongbo³ & YANG Bo⁴

(1: *State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

(3: *Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research, Research Unit Potsdam, Potsdam 14473, Germany*)

(4: *Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, P. R. China*)

Abstract: The analyses of mineral assemblages of the core KS-2006 from Lake Kusai in the Hoh Xil area indicate that the carbonates in the sediments of Lake Kusai are mostly authigenic and mainly composed of aragonite. The variation of aragonite content probably reflects the temperature of lake water. Salt minerals were found since 2150 cal aBP, which is an indicative of the increase of salinity of lake water. Meanwhile, the increase of quartz content may be related to the enhancement of wind activity which is caused by the cold-dry climate in this area. The process of climatic and environmental evolutions of late Holocene in this area could be divided into 3 stages as follows: the climate was generally warm between 3770 cal aBP and 2550 cal aBP, then the temperature dropped slowly during 2550–2150 cal aBP; from 2150 cal aBP to present, the climate became cold and dry characterized by low temperature and high salinity of lake water, and strengthening of wind activity; however, there is a distinctly warm period occurred during 900–700 cal aBP.

Keywords: Northern Tibetan Plateau; Hoh Xil area; Lake Kusai; mineral assemblage; late Holocene; climatic evolution

湖泊沉积物中的矿物是古气候环境研究的敏感性指标之一。其中, 粘土矿物^[1-2]、盐类矿物^[3-5]、碳酸盐

* 全球变化研究国家重大科学研究计划项目(2010CB950101)和中国科学院战略性先导科技专项项目(XDA05080403)联合资助。2011-01-05 收稿; 2011-03-25 收修改稿。姚波, 男, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: yaobo654321@163.com.

** 通讯作者; E-mail: xqliu@niglas.ac.cn.

矿物^[6-11]在恢复古气候的研究中应用最广,它们能够揭示湖区的降水、湖水的盐度和温度等环境特征。

库赛湖地处青藏高原北部的可可西里地区,由于受人类活动的影响较少,库赛湖是研究自然气候变迁的理想湖泊之一。Liu 等^[12]、王永波等^[13-15]通过对库赛湖 KS-2006 孔沉积岩芯的总有机碳(TOC)和粒度的研究表明,晚全新世以来库赛湖对全球和区域性的气候变化均十分敏感。本文将通过分析库赛湖 KS-2006 孔沉积岩芯中的矿物组成,阐明库赛湖 KS-2006 孔矿物的来源及其气候指示意义,在此基础上探讨青藏高原北部可可西里地区 3770 年以来的气候变化特征。

1 研究区概况

库赛湖(35°30′-35°50′N,92°30′-93°15′E)位于青藏高原北部可可西里地区(图1)。流域南、北部出露上三叠统深灰、灰黑色砂质板岩,断层面清晰可见;东部为第四系晚更新统冲积、洪积和冰水堆积砂砾层,并分布一些湖泊退缩后残留的小湖^[16]。库赛湖区属青南高寒草原半干旱气候,年均气温变化在 0.0-2.0℃,年降水量变化在 100-150 mm。库赛湖海拔高度为 4475 m,湖西北-东南向长 42.5 km,最大宽 13.0 km,平均宽 5.98 km,湖泊面积 254.4 km²。湖泊集水面积 3700 km²,补给系数 13.1,主要依靠源于大雪峰(5863 m)的库赛河补给。湖泊周围植被以典型的高寒草原为主,湖东南角分布有一些盐化草甸。库赛湖水深为 10-50 m,湖泊东南部水域较浅,约为 10 m;湖西北水域较深,最大深度达 50 m。湖水 pH 值 8.3,矿化度 28.54 g/L,属硫酸镁亚型微咸水湖^[17-18]。

2 样品采集与测试分析

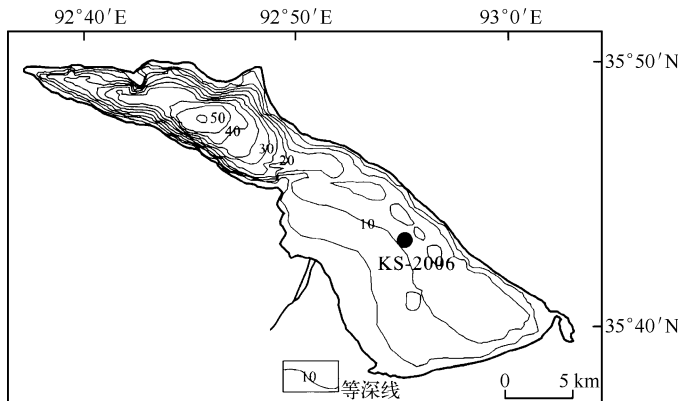


图1 青藏高原北部库赛湖及采样点位置

Fig. 1 The location of sampling point and Lake Kusai in Hoh Xil area, northern Tibetan Plateau

2006年6月,利用奥地利产 UWITEC 水上平台,在可可西里库赛湖东南部(35°43′18.4″N,92°55′11.8″E)水深 14.5 m 处(图1),采得长岩芯(KS-2006)和短岩芯(约 30 cm)各 1 根,长岩芯扣除每钻重叠部分后实际长度为 606 cm。将 KS-2006 岩芯运回实验室后,以 1 cm 的间隔进行分样。整个岩芯岩性较为一致,以粉砂为主,除表层 20 cm 沉积物由于含水量较大层次不明显外,整体呈明暗条带的交互状分布。深度 20-280 cm 以浅黄棕色的明条带为主,其中夹杂灰-黑色暗条带;深度 280-450 cm 段则以灰色的暗条带为主,浅黄棕色的明条带分布其中;深度 450 cm 以下至岩芯底部以浅黄棕色的明条带为主。

对长岩芯(KS-2006)不同深度的 7 个样品,利用总有机碳在日本东京大学碳素实验室进行了 AMS¹⁴C 测试。

选取部分经烘干研磨至 100 目左右的样品,在中国科学院青海盐湖研究所利用荷兰帕纳科公司的 X-pert Pro 型粉晶 X 射线衍射仪,进行矿物种类及相对百分含量的测定。实验条件为:石墨单色滤波器,Cu 靶 K_α 辐射(λ = 1.5406 Å),电压/电流:40 kV/40 mA。扫描角度(2θ)为 10°-80°,扫描速度为 5°/min。各矿物种类的检出及相对百分含量的确定由该仪器自带的软件 X'Pert HighScore Plus 完成。

样品中不同矿物的重量百分数的计算公式为:

$$X_i = \left(\frac{K_{i,n}}{I_{i,n}} \sum_{j=1}^m \frac{I_{j,n}}{K_{j,n}} \right)^{-1}$$

其中, X_i 为样品中 i 矿物重量百分数; K_{i,n} 和 K_{j,n} 是矿物 i 和 j 分别在衍射线 n 上的参照强度比值; I_{i,n} 和 I_{j,n} 是

矿物 i 和 j 分别在衍射线 n 上的积分强度; m 是样品中所有矿物的个数. 样品中矿物百分含量的测定误差为 $\pm 5\%$.

3 结果与讨论

3.1 年代序列

库赛湖 KS-2006 孔岩芯年代序列是由 AMS¹⁴C 与¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 测年结果综合确立的,利用表层样品所获得的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 测年结果对整个岩芯 AMS¹⁴C 测年结果进行校正,具体年代序列的建立详见 Liu 等^[12]的研究.

3.2 库赛湖沉积物的矿物组成及其环境指示意义

3.2.1 库赛湖沉积物的矿物组成 湖泊沉积物的矿物来源通常可以分为三类^[19]:(1) 外源矿物,由地表径流、风力和冰川搬运、岸蚀作用等带入湖中的碎屑物质;(2) 自生矿物,由湖泊水体内部发生的化学过程导致的化学沉淀以及生物成因形成的矿物;(3) 沉积后期成岩作用形成的矿物.

X 衍射结果显示,库赛湖沉积物的矿物由碎屑岩矿物、碳酸盐矿物和少量的盐类矿物组成,其中碎屑岩矿物以石英、白云母和绿泥石为主,碳酸盐矿物以文石为主(图 2).

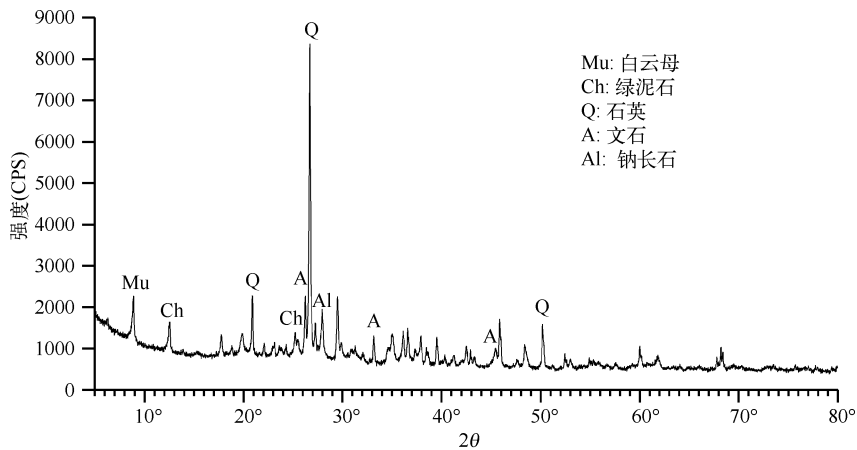


图 2 库赛湖沉积物矿物组成的 XRD 图谱

Fig. 2 X-ray diffraction spectra of mineral components from Lake Kusai sediment

3.2.2 库赛湖 KS-2006 孔碳酸盐的来源及其环境指示意义 一般地,碎屑岩矿物为外源矿物,它们能够反映区域的气候环境状况,如降水、风成活动强度、风化程度等;盐类矿物为自生矿物,通常反映湖水的盐度;而碳酸盐矿物可以是外源矿物,也可能是自生矿物,自生的碳酸盐矿物能够反映湖水的温度和盐度^[10,19-20]. 下面将着重对库赛湖 KS-2006 孔碳酸盐矿物的来源及其环境意义进行讨论.

由 X 衍射结果(图 2 和图 3)显示,库赛湖 KS-2006 孔碳酸盐矿物以文石为主,平均含量为 12.3%,但波动很大,在 2% - 34% 之间;方解石含量较低,平均为 5.5%,且在钻孔中的波动较小;白云石含量很少,平均仅为 1.0%,且在钻孔中不连续. 因此,库赛湖 KS-2006 孔碳酸盐含量的变化取决于文石的含量变化. 我们认为库赛湖 KS-2006 孔中文石是自生的碳酸盐矿物,其理由如下:(1) 如果文石是外源的,那么其含量的变化应该同外源碎屑岩矿物含量的变化具有一定的正相关关系,即外源碎屑物矿物增多的时候,文石的含量也应该增加,反之亦然. 然而库赛湖 KS-2006 孔文石的含量和外源碎屑岩矿物的含量(石英、绿泥石、白云母、钠长石等矿物的含量之和)具有很好的负相关关系(图 4a),这说明库赛湖沉积物中的文石可能为自生碳酸盐矿物.(2) 库赛湖流域中出露的围岩为砂质板岩,并没有文石.(3) 经鉴定,胖真星介(*Eucypris inflata*) 在 KS-2006 孔中连续分布,胖真星介壳体主要由文石组成,它们对 KS-2006 孔文石的含量可能具有较大的贡献. 综上所述,库赛湖 KS-2006 孔文石为自生的碳酸盐矿物.

尽管影响自生碳酸盐沉淀的因素有很多,如盐度、温度、湖泊的初级生产力等^[21-22],但当湖水的盐度达

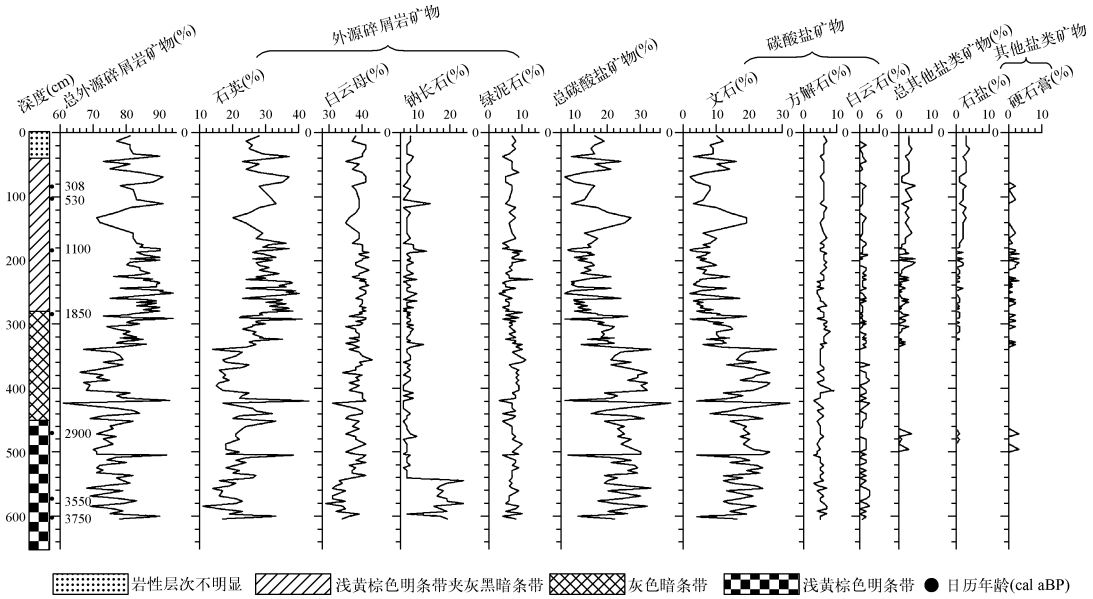


图3 库赛湖 KS-2006 孔矿物组成随深度的变化

Fig. 3 Variation of mineral assemblages vs depth for core KS-2006 from Lake Kusai

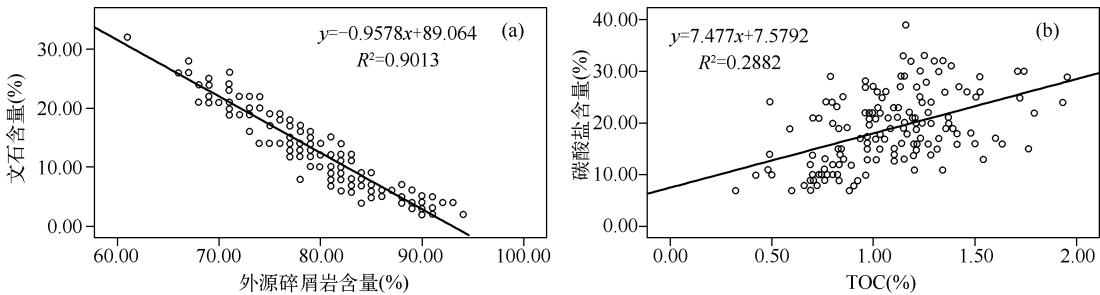


图4 库赛湖 KS-2006 孔文石和外源碎屑岩矿物(a)以及碳酸盐和 TOC(b)的相关关系

Fig. 4 Correlation between aragonite and clastic rocks(a), and between carbonates and TOC(b) for core KS-2006 from Lake Kusai

到一定程度,能够使碳酸盐矿物析出的时候,湖水的温度则对于碳酸盐矿物的析出具有至关重要的作用,这是由于:(1) 温度升高降低了 CO_2 或 H_2CO_3 的溶解作用, CO_2 逸散到空气中,湖水中 CO_2 的溶解度降低,会导致碳酸盐溶解度降低从而过饱和沉淀;(2) 温度升高可以引起蒸发作用的加强,从而致使碳酸盐矿物因过饱和而沉淀;(3) 湖泊的初级生产力会随温度的升高而升高,湖泊初级生产力的提高致使湖泊浮游动植物生长繁盛,光合作用的加强消耗溶解在湖水中的二氧化碳,导致碳酸盐因过饱和而沉淀。

研究表明,库赛湖 KS-2006 孔中有机碳 (TOC) 主要是内源的,其反映湖泊的初级生产力^[12-15]。库赛湖 KS-2006 孔碳酸盐含量同 TOC 含量具有正相关关系(如图 4b),这说明:TOC 较高时,湖泊的初级生产力较高,浮游动植物生长较繁盛,说明气候较为温暖,相应的碳酸盐含量也高;相反,TOC 较低时,湖泊初级生产力较低,说明气候较为寒冷,相应的碳酸盐含量也低。因此,我们可以利用 KS-2006 孔文石的含量反映湖水的温度,文石的含量高时表明湖水温度高,反之则低。

3.3 青藏高原北部 3770 年来的气候环境特征

根据库赛湖 KS-2006 孔矿物含量的变化特征,将 3770 cal aBP 以来青藏高原北部的气候环境特征讨论

如下(图 5):

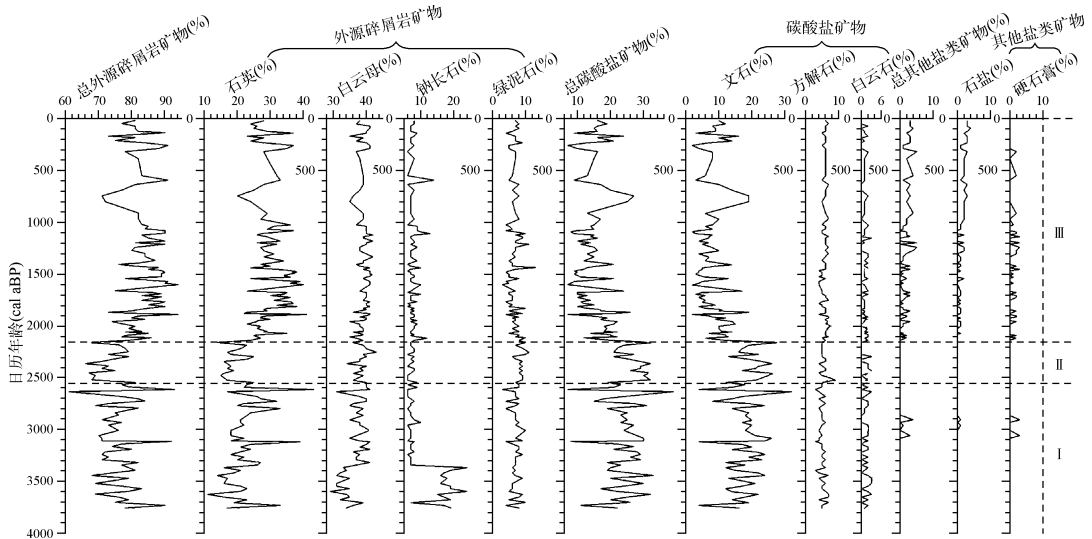


图 5 晚全新世库赛湖 KS-2006 孔矿物组成及气候演化阶段

Fig. 5 Stage of mineral assemblages and climate change for core KS-2006 from Lake Kusai since late Holocene

阶段 I: 约 3770–2550 cal aBP, 碳酸盐含量为本孔最高值, 平均为 23.5%, 碎屑物矿物含量平均为 76%, 在 3100 cal aBP 时见少量盐类矿物, 反映该时段的气候条件整体较暖. 王永波等^[14]对库赛湖 KS-2006 孔 TOC、TN 和粒度的研究表明, 2630 cal aBP 前, TOC、TN 和粒度的含量总体较高, 气候条件较湿润, 因此该时期气候的温暖与气候较湿润对应. Chen 等^[23]对鄂尔多斯高原北部库布其沙地内的一个盐湖——盐海子沉积物的多指标分析显示, 4.3–2 kaBP 是全新世湿润的阶段, 是全新世气候最适宜期; 翟新伟^[24]对蒙古高原南部(内蒙古鄂尔多斯)柴盖淖尔湖沉积记录的研究指出, 柴盖淖尔反映中全新世(5.6–2.9 cal kaBP)气候温暖湿润.

阶段 II: 约 2550–2150 cal aBP, 碳酸盐含量呈现逐步减少的趋势, 表明较上一时期温度开始缓慢降低. 张彭熹等^[25]通过青海湖沉积物岩芯中胖真星介(*Eucypris inflata*)壳体 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 及单个介壳的微量元素分析, 指出了 2.5 kaBP 开始, 气候逐步转为冷干. 同时, 他们也指出青海湖 4–3 kaBP 间湖面大, 气温较暖湿, 这和本研究揭示的青藏高原北部 3770–2550 cal kaBP(阶段 I)期间气候较暖是一致的; 王绍武^[26-27]指出根据 Blytt-Sernander 方案, 全新世中间有 4 个气候转折期, 其中第 4 个转折期的时间为 2.5 cal kaBP(与 Bond-2 对应). 另外, 王永波等^[14]的研究中指出, 2630–1720 cal aBP 阶段, 早期相对湿润, 晚期逐步转干, 结合阶段 I 中分析的暖湿对应, 该阶段的气候由暖转冷应与气候条件的逐步转干对应.

阶段 III: 约 2150 cal aBP 至今, 碳酸盐含量迅速下降到本孔的最低值, 平均为 15%, 随着碳酸盐含量的降低, 外源碎屑岩矿物则持续增高, 尤以石英含量的增高最为明显. 湖区流域径流量的增加、冰川和风力搬运能力的加强都可能导致入湖外源碎屑物含量的增加. 我们认为库赛湖在此阶段外源碎屑物含量的增加可能是由风力搬运能力的增加造成的, 这是因为在降水缺乏的干旱半干旱地区, 地表径流不发育, 粗颗粒物很难被地表径流搬运到湖泊中部位置沉积^[28-29]; 加之在此阶段出现少量的以石盐和石膏为主的盐类矿物, 表明气候条件相对干旱, 湖水较浅, 盐类矿物容易析出; 王永波等^[15]对库赛湖 KS-2006 孔粒度的研究表明, 2500 cal aBP 以来风成活动加强, 进入尘暴事件的高发期. 因此, 该阶段气候总体冷干. 刘兴起等^[30]在对青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成研究中指出, 2100–0 cal aBP 期间, 气候条件为冷干; 同样, 刘兴起等^[31]在对同区域的茶卡盐湖的研究中也指出, 2300 cal aBP 以来, 湖泊极度萎缩、咸化; 周爱峰^[32]对苏干湖 SG031 孔多指标分析研究发现, 苏干湖流域晚全新世近 2670 年来气候持续变干, 本研究结果与其有较高的一致性.

值得指出的是,碳酸盐含量在 900-700 cal aBP 期间出现一次高值段,表明气候明显转暖,该暖期与中世纪暖期在时间上具有较好的对应^[33-34]。

4 结论

通过对库赛湖 KS-2006 孔矿物组合的分析和研究,得出以下几点结论:(1) 3770 cal aBP 来,库赛湖沉积物碳酸盐主要是以文石为主的自生碳酸盐,其可以反映温度的变化;2150 cal aBP 以来,出现少量盐类矿物(硬石膏和石盐),同时石英含量的持续增高,可能同该期气候冷干引起的风成活动的加强有关。(2) 根据库赛湖 KS-2006 孔矿物的组合,青藏高原北部 3770 cal aBP 来的气候环境演化过程如下:3770-2550 cal aBP 期间气温气候条件整体较为温暖;2550-2150 cal aBP 期间,气温缓慢下降有变冷的趋势;约 2150 cal aBP 至今,气候整体冷干,但在 900-700 cal aBP 期间,温度有明显的增高。

5 参考文献

- [1] Andreas D, Mueller, Flavio S *et al.* Late Quaternary palaeoenvironment of northern Guatemala: evidence from deep drill cores and seismic stratigraphy of Lake Pete'n Itza. *Sedimentology*, 2010, **57**(5): 1220-1245.
- [2] 史兴民, 李有利, 杨景春. 新疆玛纳斯河蘑菇湖沉积物中粘土矿物及其环境意义. 干旱区地理, 2007, **30**(1): 84-88.
- [3] Liu XQ, Dong HL, Rech JA *et al.* Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene-Holocene. *Quaternary Science Reviews*, 2008, **27**(7): 867-879.
- [4] Li MH, Kang SC, Ge J *et al.* Saline rhythm and climatic change since 20.6 kyr BP from the Qiulinanmu Playa Lake in Tibet. *Carbonates Evaporites*, 2010, **25**(1): 5-14.
- [5] Last WM, Vance RE. Bedding characteristics of Holocene sediments from salt lakes of the northern Great Plains, Western Canada. *Journal of Paleolimnology*, 1997, **17**(3): 295-296.
- [6] Sklyarov EV, Solotchina EP, Vologina EG *et al.* Detailed Holocene climate record from the carbonate section of saline Lake Tsagan-Tyrm(West Baikal area). *Russian Geology and Geophysics*, 2010, **51**(3): 237-258.
- [7] Solotchina EP, Kuzmin MI, Stolpovskaya VN *et al.* Carbonate mineralogy of Lake Hövsgöl sediments: water balance and paleoclimatic conditions. *Doklady Earth Sciences*, 2008, **419A**(3): 438-443.
- [8] Bourillot R, Vennin E, Rouchy JM *et al.* The end of the Messinian Salinity Crisis in the western Mediterranean: Insights from the carbonate platforms of south-eastern Spain. *Sedimentary Geology*, 2010, **229**(4): 224-253.
- [9] Müller, Irion G, Förstner U. Formation and diagenesis of inorganic Ca-Mg carbonates in the lacustrine environment. *Naturwissenschaften*, 1972, **59**(4): 158-164.
- [10] 刘兴起, 沈吉, 王苏民等. 16 ka 以来青海湖湖相自生碳酸盐沉积记录的古气候. 高校地质学报, 2003, **9**(1): 39-45.
- [11] Brunskill GJ. Fayetteville-Green-Lake, New-York. 2. Precipitation and Sedimentation of calcite in a meromictic lake with laminated sediments. *Limnology and Oceanography*, 1969, **14**(6): 830.
- [12] Liu XQ, Dong HL, Yang XD *et al.* Late Holocene forcing of the Asian winter and summer monsoon as evidenced by proxy records from the northern Qinghai-Tibetan Plateau. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, **280**: 276-284.
- [13] 王永波. 可可西里库赛湖揭示的青藏高原北部近 4000 年来气候变化[学位论文]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2008.
- [14] 王永波, 刘兴起, 羊向东等. 可可西里库赛湖揭示的青藏高原北部近 4000 年来的干湿变化. 湖泊科学, 2008, **20**(5): 605-612.
- [15] 王永波, 刘兴起, 张恩楼等. 青藏高原北部可可西里地区近 4000 年来尘暴事件初探——来自库赛湖沉积物粒度的证据. 沉积学报, 2009, **27**(4): 691-696.
- [16] 张以菲, 郑祥身. 青海可可西里地区地质演化. 北京: 科学出版社, 1996: 9-15.
- [17] 李炳元. 青海可可西里地区自然环境. 北京: 科学出版社, 1996: 1-15.
- [18] 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 482.
- [19] 王苏民等译, Lerman A 著. 湖泊的化学、地质学和物理学. 北京: 地质出版社, 1989: 184-186.
- [20] 雷国良. 额济纳盆地晚更新世以来湖相沉积记录与环境演变[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2009.

- [21] Verduin J. Rate of carbon-dioxide transport across air-water boundaries in lakes. *Limnology and Oceanography*, 1975, **20**(6): 1052-1053.
- [22] Emerson S. Chemically enhanced CO₂ gas exchange in a eutrophic lake: A general model. *Limnology and Oceanography*, 1975, **20**(5): 743-753.
- [23] Chen CA, Lan H, Lou J *et al.* The dry Holocene Megathermal in Inner Mongolia. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2003, **193**: 181-200.
- [24] 翟新伟. 蒙古高原全新世气候与环境变化研究[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [25] 张彭熹, 张保珍, 钱桂敏等. 青海湖全新世以来古环境参数的研究. *第四纪研究*, 1994, (3): 225-238.
- [26] 王绍武. 全新世气候. *气候变化研究进展*, 2009, **5**(4): 247-248.
- [27] 王绍武. 全新世北大西洋冷事件: 年代学和气候影响. *第四纪研究*, 2009, **29**(6): 1146-1153.
- [28] 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.
- [29] Deckker PD, Corregge T, Head J. Late Pleistocene record of cyclic eolian activity from tropical Australia suggesting the Younger Dryas in not an unusual climatic event. *Geology*, 1991, **19**(6): 602-605.
- [30] 刘兴起, 王苏民, 沈吉. 青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成的古气候古环境意义. *湖泊科学*, 2003, **15**(2): 112-117.
- [31] 刘兴起, 王永波, 沈吉等. 16000a 以来青海茶卡盐湖的演化过程及其对气候的响应. *地质学报*, 2007, **81**(6): 843-849.
- [32] 周爱峰. 晚全新世苏干湖年纹层沉积及其环境记录[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [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.
- [34] Hughes MK, Diaz HF. Was there a "Medieval Warm Period", and if so, where and when? *Climatic Change*, 1994, **26**: 109-142.