

青藏高原兹格塘错沉积物中碳酸盐与可溶盐 环境记录的研究

申慧彦^{1,2}, 李世杰^{*}, 于守兵^{1,2}, 张宏亮^{1,2}

(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, 江苏 南京 210008;

2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要: 兹格塘错是位于藏北高原腹地的一个封闭型湖泊, 其湖泊变化过程可直接反映区域的气候变化。为了探讨该区域全新世的气候与环境变化过程, 在湖泊中心水深 30 m 处钻取了一支深 727 cm 的沉积岩芯, 对沉积岩芯的碳酸盐和可溶盐含量进行分析, 其结果反映了全新世期间湖泊水体退缩与扩张、水质的浓缩与淡化的过程, 揭示了区域气候的干湿变化; 指出兹格塘错全新世以来一直处于碳酸盐演化阶段, 碳酸盐含量共出现六次明显低值时期, 分别为 (1) 9.3~9.0 cal ka B. P.、(2) 8.3~7.7 cal ka B. P.、(3) 6.0~5.8 cal ka B. P.、(4) 4.7~4.2 cal ka B. P.、(5) 3.1~2.9 cal ka B. P.、(6) 0.6~0.2 cal ka B. P.; 而氯离子和硫酸根含量总体很低, 且变化趋势几乎一致。碳酸盐和可溶盐含量变化所反映出的湖面波动与环境变化得到了其他资料较好的支持, 同时又显示了区域的差异性。

关键词: 青藏高原; 湖泊沉积; 全新世环境记录; 碳酸盐; 可溶盐

中图分类号: P512.2 X141

文献标识码: A

湖泊沉积是记录湖泊及其流域气候环境信息的有效载体, 它记录了构造运动、气候变化、生态演化等丰富的信息^[1,2]。兹格塘错位于藏北高原中部, 属高原内流封闭湖泊, 夏季受印度洋季风的影响, 冬季被西风系统所覆盖, 区域环境受人类活动直接影响微弱, 是研究全球气候环境演变的理想地区之一。为了探讨印度洋季风在全新世期间的变化及其对区域环境的影响, 我们选择在兹格塘错进行湖泊沉积物的钻探取芯, 并进行多环境指标的分析。碳酸盐和可溶盐是湖泊沉积物的重要组成部分, 在干旱半干旱地区的封闭湖泊, 其含量变化可敏感的反映湖泊水体环境的变化过程。近年来, 很多学者对湖相

碳酸盐与古气候环境的关系表现了极大的兴趣^[3-5], 湖相碳酸盐成为恢复和重建地质历史时期古气候环境演化的重要手段之一。本文通过对兹格塘错沉积岩芯碳酸盐和可溶盐含量分析, 探讨了青藏高原兹格塘错区域全新世以来的气候演化。

1 兹格塘错区域概况

兹格塘错 (32°00'~32°09'N, 90°44'~90°57'E) 位于西藏安多县, 湖面海拔 4 561 m, 湖面面积 184.00 km², 湖泊最深点 38.9 m, 是班公湖-东巧-怒江深大断带上的断陷湖泊^[6]; 流域面积 3 430

收稿日期 (Received date): 2008-01-02; 改回日期 (Accepted): 2008-03-04.

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目“青藏高原全新世气候变化事件高分辨率湖泊沉积记录研究 (40471001) [National Natural Science Foundation of China High Resolution Records of Holocene Climatic Change Events Derived from Lake Sediments on the Qinghai-Tibetan Plateau No. 40471001].

作者简介 (Biography): 申慧彦 (1978-), 女, 山东济宁人, 博士研究生, 主要研究方向: 湖泊资源与环境。[Shen Huiyan (1978-), female, born in Jinan, Shandong, presently a candidate for PhD, major in lake resources and environments.] Tel: 025-86882093; E-mail: huiyanshen@163.com

* 通讯作者 (Correspondent author): 李世杰, 研究员, 博士生导师, 主要研究方向: 湖泊沉积与全球变化。[Li Shijie, Professor, doctoral supervisor, major in lake sediments and global change.]

km^2 , 流域内有 4 条较大的河流, 其中以柴荣藏布最长, 约 60 km; 流域内人类活动的影响微弱。兹格塘错湖水补给主要是地表径流, 区域没有冰川分布, 湖泊水量变化主要取决于降水与蒸发之间的平衡。区域降水主要受印度洋季风的影响, 年降水量在 240 ~ 300 mm, 多集中于 5 ~ 9 月, 从气候划分来看, 兹格塘错区域属于高原亚寒带半干旱气候区, 四季不分明, 只有冷暖季节之分。由于海拔高, 该流域气温很低, 年平均气温 $-3.4 \sim -0.4^\circ\text{C}$ 。最热月 (7 月) 均温 8.9°C , 最冷月 (1 月) 均温 -13°C ^[7], 湖面冰冻期接近 5 个月 (11 月下旬 ~ 翌年 4 月底)。

2 材料与方法

2002 年, 在兹格塘错西部深水区 (水深 30 m) 打钻 (图 1), 获得长 727 cm 的沉积岩芯 (ZGT02)。岩芯 50 cm 以上以 0.5 cm 间隔分样, 50 cm 以下以 1 cm 间隔分样。岩芯柱的新鲜剖面颜色以灰色、灰黑色和黑色为主, 整体性质较为一致, 反映了稳定、连续的沉积演化过程。 ^{14}C AMS 测年由德国合作者完成, 采用 Calb 5.0 进行日历年代校正。表层 8 cm 采用 ^{137}Cs 测年, 得到近 50 a 的平均沉积速率为 0.8 mm/a 。根据校正结果计算出各个阶段沉积速率, 内插出深度年代曲线 (图 2), 根据测年和沉积速率的确定, 分析样品的时间分辨率在 6 ~ 12 a 这在岩芯覆盖的全新世 1 万 a 期间应该是高分辨率的分析结果。碳酸盐指标测定在中国科学院南京地理与湖泊所湖泊沉积与环境重点实验室完成, 采用酸碱中和滴定法, 具体步骤为: 将样品研磨烘干后, 称样 0.12

~ 0.20 g 于三角瓶内, 而后向三角瓶中加入 0.1N 的 HCL 20 ml 置于 80°C 恒温水浴锅 20 min, 冷却后加 1 ~ 2 滴酚酞, 以 0.1N 的 NaOH 滴定至微红色, 计算碳酸盐的百分含量。可溶盐含量分析采用离子色谱法在中科院南京土壤所完成, 步骤为: 样品研磨烘干后, 称样 0.200 0 g 于离心管内, 加入 10 ml 去离子水搅拌后静置 30 min, 以 5000 RPM 离心 20 min, 抽取上清液, 过 0.22 μm 滤膜, 滤液注入离子色谱仪, 进行分析。

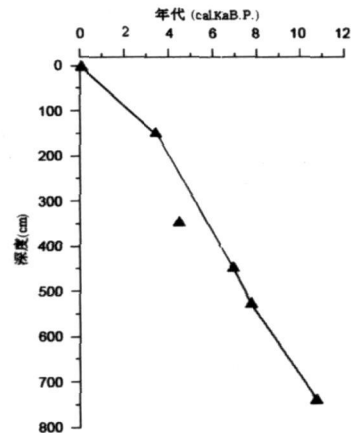


图 2 沉积岩芯深度年代曲线

Fig. 2 Depth-age curve of sediment core

3 碳酸盐和可溶盐的环境指示意义

碳酸盐是湖泊沉积物中常见的组成部分。在干旱、半干旱地区的封闭型湖泊, 沉积物中碳酸盐含量的增加和减少反映了湖泊水体的浓缩和扩张过程, 可有效的反映湖泊水位变化和流域环境的干湿变化^[8,9]。但是在碳酸盐整体含量很高的情况下, 必须明确湖泊的演化阶段才能对碳酸盐含量的指示意义做出正确的解释。当硫酸根、氯离子和碳酸盐含量都很低, 说明湖泊处于矿化度较低阶段, 湖泊处于扩张时期; 当碳酸盐含量降低, 而硫酸根和氯离子含量升高时, 则指示湖泊处于萎缩咸化过程, 表明气候向干旱化发展。

湖相沉积的碳酸盐由外源碳酸盐和内生碳酸盐构成^[10], 由于湖泊外源碳酸盐主要来源于湖盆流域的母岩, 并不反映湖泊现代沉积的环境信息, 因而只有湖泊内生碳酸盐才真正具有气候变化的指示意义。兹格塘错流域河流盐度多在 $0.50 \sim 1.15 \text{ g/L}$ 之间 (表 1)^[7], 阳离子以 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 为主, 阴离子以 HCO_3^- 为主。与兹格塘错湖水相比, 流域径

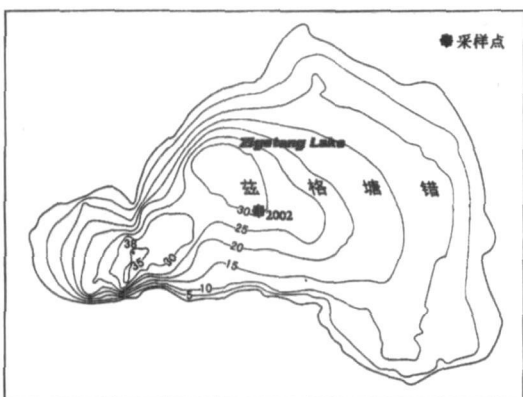


图 1 ZGT02 孔位置图及兹格塘错等深线示意

Fig. 1 Location of ZGT02 core and isobath of Zhetang Lake

流中 Ca^{2+} 含量明显偏高, 这主要是因为湖水在演化过程中大量 Ca^{2+} 因沉淀析出, 表明兹格塘错沉积物中碳酸盐沉积主要是由化学沉积作用所形成的内生碳酸盐, 而通过湖盆流域由地表径流搬运至湖泊的外源碳酸盐所占的比例很小。但兹格塘错湖水中 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 的含量并没有随 Ca^{2+} 的减少而降低, 其原因是受到富含 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 的地表径流和地下泉水的补给。在自然水体中产生碳酸盐沉淀的必要条件是水体过饱和, 引起水体过饱和条件的因素有

两个: 生物因素和物理化学因素^[11]。据沈永平等^[12]调查, 兹格塘错基本没有水生生物, 这可以排除兹格塘错内生碳酸盐中生物因素影响。物理化学因素包括温度变化、水体蒸发浓缩、 CO_2 的溶解与释放等。碳酸钙的溶解度随温度而变化, 温度越高, 碳酸钙的溶解度越小; 温度对碳酸钙沉淀的影响还表现在: 湖水温度升高, CO_2 在水体中的溶解度减小, 并以气体形式从水体中逸出, 从而导致过饱和条件的形成; 同时, 高温期水体蒸发浓缩也利于碳酸钙沉淀。

表 1 兹格塘错湖水、流域河流、泉水及降水的化学组成
Table 1 The chemical components of Zige Tang Lake, rivers, springs and precipitation

水体	Mg^{2+} (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	CO_3^{2-} (mg/L)	HCO_3^- (mg/L)	盐度 (mg/L)
湖水	120	10	1 530	8 200	3 420	14 860	41 360
本土尔曲	44.23	33.82	7.46	77.45	4.37	292.75	501.95
司麦纠曲	24.55	14.48	7.87	14.50	40.57	106.65	229.50
柴荣藏布	43.53	21.13	10.35	22.12	18.61	461.84	669.24
曲纳曲	67.94	196.70	14.40	43.82	37.65	787.75	1 150.30
降水	1.45	4.95	1.72	2.57	0.02	26.55	41.88
泉水	67.00	148.20	9.30	140	41.20	895	1450

4 碳酸盐与可溶盐含量变化

整体而言, ZGT02岩芯整个沉积阶段碳酸盐含量很高, 总平均含量为 42.42%, 最高含量为 54.90%, 最低为 26.11%, 波动幅度为 28.79%。碳酸盐含量共出现六次明显低值阶段, 分别是 (1) 9.3~9.0 cal ka B. P., 碳酸盐含量范围为 26.62%~38.60%, 平均值为 34.34%; (2) 8.3~7.7 cal ka B. P., 为 26.76%~38.14%, 平均含量为 32.17%; (3) 6.0~5.8 cal ka B. P., 平均值为 32.78%; (4) 4.7~4.2 cal ka B. P., 平均值为 32.53%; (5) 3.1~2.9 cal ka B. P., 平均值为 34.42%; (6) 0.6~0.2 cal ka B. P., 平均值为 34.79% (图 3)。兹格塘错沉积物可溶盐成分主要是氯离子、硫酸根离子, 依据测得结果作含量变化曲线, 氯离子和硫酸根含量总体很低, 整个沉积阶段氯离子含量变化范围为 0.08%~0.92%, 硫酸根变化范围为 0.02%~2.46%, 两者变化趋势几乎一致, 到了近百年来, 氯离子和硫酸根含量快速增加。

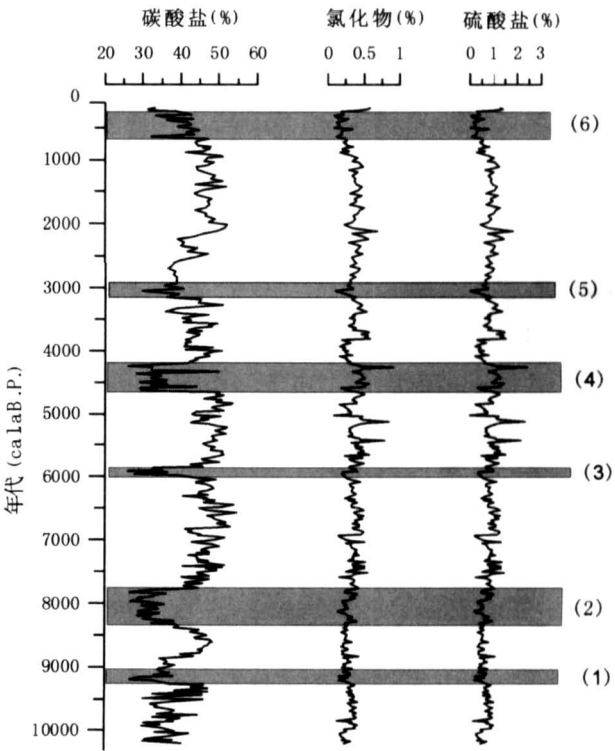


图 3 ZGT02岩芯碳酸盐与可溶盐含量变化曲线

Fig. 3 The carbonate and Soluble Salt Content of ZGT02core
© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 讨论

湖泊化学沉积作用是湖泊中长期复杂的地球化学积累过程。随着气候干燥,蒸发强烈,使得湖水不断浓缩而咸化,当盐类一旦达到饱和或过饱和状态,即发生结晶沉淀,首先结晶的是溶解度小的碳酸盐,继而析出硫酸盐类矿物,随着湖水进一步浓缩,发生氯化物类沉积;若气候湿润、湖水补给来源充沛、湖泊扩张淡化,则沉积物中的盐离子含量降低^[1,13]。ZGT02沉积物中氯离子与硫酸根含量变化趋势相近,而且两者的绝对含量都很低;碳酸盐含量高,变化幅度大,变化特征明显,这表明兹格塘错全新世以来一直处于碳酸盐演化阶段。

就兹格塘错流域而言,因无冰川分布,其地表径流受大气降水的影响,所以湖泊的水量平衡主要受降水和蒸发两因素的平衡所控制,即在相对湿润的气候条件下,湖水淡化,碳酸盐含量较低;当气候干旱时,降水减少,湖面降低,湖水浓缩,碳酸盐含量增高。ZGT02碳酸盐含量变化出现六次降低时期,说明在这些时期湖泊水位上升,水体扩张,水质淡化。本研究发现在 10.4~9.0 cal ka B. P. 全新世早期的大部分时段,兹格塘错沉积物碳酸盐含量整体较低,特别是在 9.3~9.0 cal ka B. P. 期间,碳酸盐含量出现低值阶段,指示湖水补给增多,湖水淡化,湖泊水位上升,流域气候湿润。已有的研究指出,在全新世初期出现了暖湿气候^[14-16];黄赐璇等人^[17]通过对孢粉的研究也发现 10~8 ka B. P. 期间。青藏高原北部和西部气候由冷干转向冷湿;色林错在 9.2~8.4 ka B. P. 时期出现稳定高湖面^[18];苟弄错在 10.4 ka B. P. 进入冰后期,10~8.0 ka B. P. 出现高水位^[19,20]。这些共同说明了在全新世早期青藏高原气候变的湿润,只是因地区不同,时间上存在差异。

8.3~7.7 cal ka B. P. 时期兹格塘错沉积物碳酸盐含量出现一个显著的低值时期,许多研究结果表明在 8.2 cal ka B. P. 左右出现全球低温事件^[21,22],这是全新世早期的一个明显寒冷时期,在青藏高原高山地区也发现该时期的冰川前进现象^[23],这些结果表明在这个时期兹格塘错区域可能处于冷湿的气候环境。

在 7.7~4.7 cal ka B. P. 时期,除了 6.0~5.8 cal ka B. P. 期间碳酸盐含量出现了短暂的降低,碳

酸盐含量一直处于较高水平,这一时期与全新世中期的暖期相对应。但由于兹格塘错区域没有冰川分布,气候的温暖没有能够补给大量的冰川融水,反而加强其蒸发量,使得湖水浓缩、盐度升高;这与那些流域中有大量冰川融水补给的湖泊,如青海湖^[24,25],色林错^[26]等所表现出的湖面升高、水质淡化不同。而陈发虎等^[27]对阿拉善高原的湖泊沉积和湖泊地貌研究发现:7.0~5.0 cal ka B. P. 时期,包括阿拉善高原、鄂尔多斯高原以及黄土高原南部等,气候干燥,指出中国全新世夏季风强盛期或最宜期的发生和衰退时间具有空间和时间的差异性。

4.7~4.2 cal ka B. P. 期间兹格塘错沉积岩芯中的碳酸盐含量再次显著降低,表明兹格塘错区域出现湿润气候,而我国北方也在这一时段存在洪水事件^[28]。但期间碳酸盐及可溶盐含量存在着短暂的波动,出现了高含量峰值,说明了这一阶段气候波动剧烈,刘东生等^[29]曾指出这一阶段也是一个气候的转变时期。青藏高原湖泊沉积记录 4 ka B. P. 前后气候开始强烈波动,并向冷干方向发展,出现所谓的新冰期颤动^[30,31],如纳木错在 4.2 ka B. P. 以来湖面下降^[32]。兹格塘错碳酸盐含量经过 4.7~4.2 cal ka B. P. 期间的波动,随后又处于较高阶段,只在 3.1~2.9 cal ka B. P. 期间出现短暂的降低,表明经过 4.7~4.2 cal ka B. P. 强烈波动后,兹格塘错区域大部分时段处于干旱时期。到了 0.6~0.2 cal ka B. P. 期间,碳酸盐含量逐渐波动下降,指示湖水淡化,水位上升,这和小冰期冷期相对应。在青藏高原苟鲁错和青海湖湖泊沉积中同样也记录了小冰期的冷湿期和高湖面相对应^[33,34]。

近百年来,硫酸盐和氯化物含量明显上升,而碳酸盐含量未呈现上升变化,说明兹格塘错可能由碳酸盐沉积阶段向盐湖沉积方向演化,这与近百年来气候的暖干化趋势有关。

综上所述,青藏高原腹地全新世气候变化的几个典型的“寒冷事件”与 ZGT02岩芯碳酸盐含量低值阶段相对应;而在全新世中期兹格塘错沉积岩芯的环境指标指示大部分时段气候偏干。

6 结论

1. ZGT02岩芯氯离子与硫酸根含量都很低,碳酸盐含量高、变化幅度大、变化特征明显,表明兹格塘错全新世以来一直处于碳酸盐演化阶段。

2. 碳酸盐含量在全新世期间共出现六次明显降低时期,分别为(1)9.3~9.0 cal ka B.P.、(2)8.3~7.7 cal ka B.P.、(3)6.0~5.8 cal ka B.P.、(4)4.7~4.2 cal ka B.P.、(5)3.1~2.9 cal ka B.P.、(6)0.6~0.2 cal ka B.P.,说明在这六个时期湖泊水位上升,水体扩张,水质淡化,气候湿润。

3. 碳酸盐含量的变化可作为靠降水与蒸发维持水量平衡的封闭湖盆的湖水淡化与浓缩的指标,覆盖全新世的 ZGT02 沉积岩芯中碳酸盐和可溶盐含量得变化表明兹格塘错区域全新世初期气候湿润、中晚期气候偏干且干湿交替的气候变化特征。

参考文献 (References)

- [1] Wang Sumin, Zhang Zhenke. The new progress of the study of lake sediment and environmental evolution in China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(6): 579~587[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]
- [2] Wang Sumin, Dou Hongshen. China Lakes Chorography[M]. Beijing: Science Press, 1998, 22~27[王苏民, 窦鸿身主编. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社, 1998, 22~27]
- [3] Chen Jing'an, Wan Guojiang, Wang Fushun, et al. Environmental records of carbon in recent lake sediments[J]. *Science in China (Ser. D)*, 2002, 32(1): 73~80[陈敬安, 万国江, 汪富顺, 等. 湖泊现代沉积物碳循环记录研究[J]. 中国科学(D), 2002, 32(1): 73~80]
- [4] Jie Dongmei, Lv Jinfu, Li Zhiyin, et al. Carbonate content of sedimentary core and Holocene lake-level fluctuation of Dabusu Lake[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2001, 21(2): 77~82[介冬梅, 吕金福, 李志民, 等. 大布苏湖全新世沉积岩芯的碳酸盐含量与湖面波动[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(2): 77~82]
- [5] Shen Ji, Wu Ruijin, Yang Xiangdong, et al. Paleoclimatic change inferred from $\delta^{18}\text{O}$ and carbonate content of the section in Dabusu Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(3): 217~222[沈吉, 吴瑞金, 羊向东, 等. 大布苏湖沉积剖面碳酸盐含量、氧同位素特征的古气候意义[J]. 湖泊科学, 1997, 9(3): 217~222]
- [6] Guan Zhihua, Chen Chuanyou, Qu Yuxiong, et al. The Rivers and Lakes in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1984, 159~168[关志华, 陈传友, 区裕雄, 等. 西藏河流与湖泊[M]. 北京: 科学出版社, 1984, 159~168]
- [7] Li Wanchun. The study of lake sediment in Tibet Plateau from Zige-tangco[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001. [李万春. 青藏高原湖泊现代过程研究—以兹格塘错为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2001.]
- [8] Li Shijie, Qu Rongkang, Zhu Zhaoyu, et al. A carbonate content record of Late Quaternary climate and environment changes from lacustrine core TS95 in Tianshuhai lake basin, Northwest Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(2): 58~65[李世杰, 区荣康, 朱照宇, 等. 24万年来西昆仑山甜水海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化[J]. 湖泊科学, 1998, 10(2): 58~65]
- [9] Zhang Enlou, Shen Ji, Wang Sumin, et al. Climate and environment change during the past 900 years in Qinghai Lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(1): 32~38[张恩楼, 沈吉, 王苏民, 等. 青海湖近 900 年来气候环境演化的湖泊沉积记录[J]. 湖泊科学, 2002, 14(1): 32~38]
- [10] Liu Xingqi, Shen Ji, Wang Sumin, et al. A 16000-year paleoclimatic record derived from authigenic carbonate of lacustrine sediment in Qinghai Lake[J]. *Geological Journal of China Universities*, 2003, 9(1): 38~46[刘兴起, 沈吉, 王苏民, 等. 16ka 以来青海湖湖相自生碳酸盐沉积记录的古气候[J]. 高校地质学报, 2003, 9(1): 38~46]
- [11] Chen Jingan. The study of lake sediments in environmental record[D]. Beijing: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, 2001 [陈敬安. 湖泊现代沉积物高分辨率环境记录研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2001.]
- [12] Shen Yongping, Xu Daoming. Fluctuations of lakes and their environments since last glaciation in Amdo area, Tibet[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(2): 172~180[沈永平, 徐道明. 西藏安多的湖泊变化与环境[J]. 冰川冻土, 1994, 16(2): 172~180]
- [13] Ren Mingda, Wang Nailiang. The Conspectus of Sedimentary Environment[M]. Beijing: Science Press, 1985, 101[任明达, 王乃梁. 现代沉积环境概论[M]. 北京: 科学出版社, 1985, 101]
- [14] Zhou Weijian, Lu Xuefeng, Wu Zhengkun, et al. Peat record reflecting Holocene climatic change in Zoige Plateau and AMS radiocarbon dating[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(12): 1040~1044[周卫建, 卢雪峰, 吴振坤, 等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年[J]. 科学通报, 2001, 46(12): 1040~1044]
- [15] Gasse F, AmalM, Fontes JC, et al. A 13 000-year climate record from western Tibet[J]. *Nature*, 1991, 353(24): 742~745
- [16] Tianchi L. A preliminary study on the climatic and environmental changes at the turn from Pleistocene to Holocene in East Asia[J]. *Geojournal*, 1998, 17(4): 649~657
- [17] Huang Ckuan, E. Van Campo, Li Shuanke. Holocene environmental changes of western and northern Qinghai-Xizang Plateau based on pollen analysis[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 1996, 13(4): 423~432[黄赐璇, 冯·康波·艾利斯, 李栓科. 根据孢粉分析论青藏高原西部和北部全新世环境变化[J]. 微体古生物学报, 1996, 13(4): 423~432]
- [18] Gu Zhaoyan, Li Jiaqi, Yuan Baoyin, et al. Lacustrine authigenic deposition expressive of environment and the sediment record from Siling Co, Tibet, China[J]. *Quaternary Sciences*, 1994, (2): 162~174[顾兆炎, 刘嘉麒, 袁宝印, 等. 湖相自生沉积作用与环境—兼论西藏色林错沉积物记录[J]. 第四纪研究, 1994, (2): 162~174]
- [19] Li Bingyuan, Li Yuanfang, Kong Zhaochen, et al. 20000 years environmental change of the Gonong Co in Hoh Xil of Qinghai[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1994, 39(18): 1727~1728[李炳元, 李

- 元芳,孔昭宸,等. 青海可可西里苟弄错地区两万年来环境变化[J]. 科学通报, 1994, 39(18): 1727~ 1728]
- [20] Hu Dongsheng. The lake evolution in Kekexili region[J]. *Arid Land Geography*, 1995, 18(1): 60~ 67[胡东生, 可可西里地区湖泊演化[J]. 干旱区地理, 1995, 18(1): 60~ 67]
- [21] Alley R, Mayewski P, Sowers T, *et al*. Holocene climatic instability: A prominent widespread event 8200 years ago[J]. *Geology*, 1997, 25(6): 483~ 486
- [22] Wang Ninglian, Yao Tandong, Thompson L G., *et al*. Evidence for cold events in the early Holocene from the Guliya Ice Core, Tibetan Plateau, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(17): 1422~ 1427[王宁练, 姚檀栋, Thompson L G., 等. 全新世早期强降温事件的古里雅冰芯记录证据[J]. 科学通报, 2002, 47(11): 1422~ 1427]
- [23] Li Shijie, Jiao Keqin. Evolution of glaciers in the West Kunlun Mountains during the past 30 ka[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1990, 12(4): 311~ 318[李世杰, 焦克勤. 3万年来西昆仑山南坡的冰川变化[J]. 冰川冻土, 1990, 12(4): 311~ 318]
- [24] Jia Yulian, Shi Yafeng, Fan Yunqi. Water balance of paleolake Qinghai and its precipitation estimation at three high lake-level stages since 40 kaBP[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3): 211~ 218[贾玉连, 施雅风, 范云崎. 四万年以来青海湖的三期高湖面及其降水量研究[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 211~ 218]
- [25] 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 in China (Series D)*, 2005, 48(6): 742~ 751[沈吉, 刘兴起, R. Matsumoto 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), 2004, 34(6): 582~ 589]
- [26] Gu Zhaoyan, Liu Jialin, Liu Dongsheng, *et al*. The change of monsoon, Xizang Plateau, since 12 ka B. P.—the evidence from geochemistry of Selincuo sediment[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(1): 61~ 64[顾兆炎, 刘嘉麟, 刘东生, 等. 12000年以来青藏高原季风变化—色林错沉积物地球化学的证据[J]. 科学通报, 1993, 38(1): 61~ 64]
- [27] Chen Fahu, Wu Wei, Zhu Yan, *et al*. A mid-Holocene drought interval as evidenced by lake desiccation in the Alishan Plateau, Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(1): 1~ 9[陈发虎, 吴薇, 朱艳, 等. 阿拉善高原上全新世干旱事件的湖泊记录研究[J]. 科学通报, 2004, 49(1): 1~ 9]
- [28] Xia Zhengkai, Yang Xiaoyan. Preliminary study on the flood events about 4kaB. P. in North China[J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 667~ 674[夏正楷, 杨晓燕. 我国北方 4kaB. P. 前后异常洪水事件的初步研究[J]. 第四纪研究, 2003, 23(6): 667~ 674]
- [29] Wu Wenxiang, Liu Tungsheng. Variations in the East Asia Monsoon around 4000aB. P. and the collapse of Neolithic around Central Plain[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(3): 278~ 284[吴文祥, 刘东生. 4000aB. P. 前后东亚季风变迁与中原周围地区新石器文化的衰落[J]. 第四纪研究, 2004, 24(3): 278~ 284]
- [30] Li Shijie. Characteristic of existing glacial development in the Hoh Xil region, Qinghai-Xizang plateau[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(1): 11~ 17[李世杰. 青藏高原可可西里地区现代冰川发育特征[J]. 地理科学, 1996, 16(1): 11~ 17]
- [31] Wang Naiang, Li Jijun, Cao Jixiu, *et al*. A preliminary research on the climate records of lacustrine deposits of Qingtu lake in the last 6000 years[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1999, 19(2): 119~ 124[王乃昂, 李吉均, 曹继秀, 等. 青土湖近 6000年来沉积气候记录研究: 兼论四五世纪气候回暖[J]. 地理科学, 1999, 19(2): 119~ 124]
- [32] Zhao Xitao, Zhu Dagang, Yan Fuhua, *et al*. Climatic change and lake-level variation of Nam Co, Xizang since the Last Interglacial Stage[J]. *Quaternary Science*, 2003, 23(1): 41~ 52[赵希涛, 朱大岗, 严富华, 等. 西藏纳木错末次间冰期以来的气候变迁与湖面变化[J]. 第四纪研究, 2003, 23(1): 41~ 52]
- [33] Li Shijie, Wang Xiaotian, Xia Weilan, *et al*. The Little Ice Age climate fluctuation derived from lake sediments of Goukaiu, Qinghai, Xizang Plateau[J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 578~ 586[李世杰, 王小天, 夏威岚, 等. 青藏高原苟鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化[J]. 第四纪研究, 2004, 24(5): 578~ 586]
- [34] Shen Ji, Zhang Enbu, Xia Weilan. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1000 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 508~ 513[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[J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 508~ 513]

Holocene Environmental Change Record Derived from Carbonate and Soluble Salt Content in the Sediment Core of Zigetang Lake, Tibetan Plateau

SHEN Huiyan^{1, 2}, LI Shijie¹, YU Shoubing^{1, 2}, ZHANG Hongliang^{1, 2}

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment Research, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China; 2. Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract Zigetang Lake is an enclosed lake located in the hinterland of North Tibetan Plateau. With bad climate and little precipitation, the regional environment has always been faintly disturbed by human beings. Furthermore, the unique geographic environment of Tibetan Plateau leads to sensitive responses of lake depositing to climatic changes. With great evaporation and no glacier in the catchment, the main supply of water comes from surface runoff and factor of water balance are simple. Thus Zigetang Lake is ideal for study on the climatic evolution of Tibetan Plateau. The ZGT02 core was obtained at water depth of 30 m in the west of Zigetang Lake. The core is about 727 cm long covering the whole Holocene. Carbonate content was determined by titration.

The carbonate content of enclosed lake sediments indicate the variations of the lake level and the wet-dry changes of environment. CO_3^{2-} , HCO_3^- content in the Zigetang lakewater has always been high because of water supply of surface runoff and subterranean fountain abounding in carbonate, as in others ones otherwise has been decreasing along Ca^{2+} precipitation. During the whole Holocene, carbonate content has been abundant and changed obviously. Sulfate radical and chloride contents have been low and fluctuated in the same way. All the facts demonstrate Zigetang Lake has been in the carbonate stage all through the Holocene. The change of carbonate content of ZGT02 core indicate, at initial stages of the Holocene, the climate was wet. Since 7.7 cal. ka B.P., the carbonate content has been high and the climate has been dry in the region; the carbonate content and Soluble Salt Content have fluctuated intensively, the wet-dry changed continually. During 9.3~9.0 cal. ka B.P., 8.3~7.7 cal. ka B.P., 6.0~5.8 cal. ka B.P., 4.7~4.2 cal. ka B.P., 3.1~2.9 cal. ka B.P. and 0.6~0.2 cal. ka B.P., the carbonate content was low and lake level rose.

These environmental changes and the variations of the lake level reflected by the carbonate content of Zigetang Lake sediments are well supported by other research results, at the same time, there are different as the different area.

Key words Zigetang Lake, lake sediments, the record of environment, carbonate content, soluble salt