

青藏高原全新世环境变化的兹格塘错 元素地球化学沉积记录

张宏亮^{1,2}, 李世杰^{*}, 于守兵³, 申慧彦^{1,2}, 沈德福^{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 100049; 3. 南京水利科学研究院, 江苏 南京 210024)

摘要: 兹格塘错是位于藏北高原腹地的一个封闭型湖泊, 流域内没有现代冰川和永久积雪存在, 其湖泊的水量平衡主要是大气降水和蒸发之间的平衡, 因此其湖泊的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, 在其湖泊中心水深 30 m 处钻取了一支深 727 cm 的沉积岩芯, 对沉积岩芯进行了元素地球化学分析, 利用主成分分析得出影响沉积物化学组成的三个主要因子, 主要受控于流域侵蚀因子和径流因子, 区域背景作用因子所占比重很小。结合 Mg/Ca 的变化, 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, 揭示了兹格塘错流域气候的干湿变化, 呈现暖干/冷湿气候组合模式; 元素地球化学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; 元素地球化学,

中图分类号 P595 X144

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]。元素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应湖泊水体环境的变化过程^[3]。很多学者对湖相沉积中元素地球化学与古气候环境的关系表现了极大的兴趣^[4-7], 湖相沉积元素地球化学成为恢复和重建古气候环境演化的重要手段之一^[8-10]。

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, 该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, 但针对该湖仅有少量研究^[11-14]。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, 我们在兹格塘错进行湖泊沉积物的钻探取芯 (ZGT02) 并进行了多指标环境的分析^[15-17]。本文对兹格塘错沉积岩芯 ZGT02 的元素地球化学进行分析, 以求探讨青藏高原兹格塘错区域全新世以来的环境演化过程。

1 兹格塘错区域概况

兹格塘错 (32°00' ~ 32°09'N, 90°44' ~ 90°57'E) 位于藏北高原腹地, 唐古拉山南坡东巧盆地内,

收稿日期 (Received date): 2008-11-02; 改回日期 (Accepted): 2008-02-01。

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高分辨率湖泊沉积记录研究 (40471001) [Foundation National Natural Science of China High Resolution Records of Holocene Climatic Change Events Derived from Lake sediments on the Qinghai-Tibet Plateau, No. 40471001]

作者简介 (Biography): 张宏亮 (1970-), 男, 河南林州人, 博士研究生, 主要从事湖泊资源与环境研究。[Zhang Hongliang (1970-) male born in Linzhou, Henan, presently a candidate for PhD, major in lake resource and environments] Tel: 025-86882093, E-mail: phyto1@163.com

* 通讯作者 (Correspondent author): 李世杰, 研究员, 博士生导师, 主要从事湖泊沉积与全球变化研究。[Li Shijie Professor Doctoral supervisor major in lake sediments and global change] E-mail: shj1@niglas.ac.cn

地处羌塘高寒草原半干旱地带东南边缘, 为班公湖 - 东巧 - 怒江深大断带上的断陷湖泊之一, 是一个典型的高原封闭型湖泊 (图 1)。湖面海拔 4 561 m, 湖面面积约 190 km², 湖泊最深点 38.9 m^[18]。流域面积 3 430 km², 湖泊补给系数 17.3。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, 水量平衡因素简单, 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, 多年平均蒸发量为 791.9~1 111.5 mm 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。由于海拔较高, 该流域气温很低, 年平均气温 -3.4~0.4℃。最热月 (7 月) 均温 8.9℃, 最冷月 (1 月) 均温 -13℃^[11], 湖面冰冻期接近 5 个月 (11 月下旬~翌年 4 月底)。

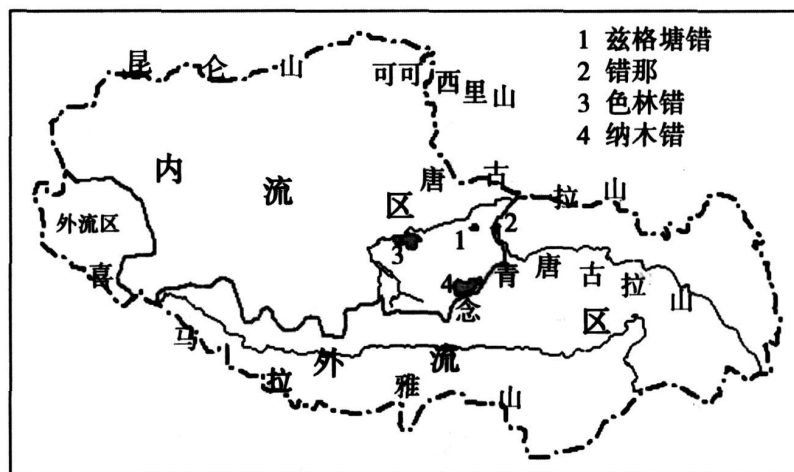


图 1 兹格塘错地理位置

Fig. 1 Location of the Zigetang Lake

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 2), 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。岩心采用 ¹⁴C AMS 测年, 由德国合作者完成, 采用 Calib 5.0 进行日历年代校正。表层 8 cm 采用 ¹³⁷Cs 和 ²¹⁰Pb 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 3), 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 万年期间应该是高分辨率的分析结果。

元素分析工作在中国科学院南京地理与湖泊研究所沉积与环境重点实验室 ICP 分析室完成。按照

标准的 ICP 预处理程序, 用 Leeman Labs Profile ICP - AES 测定。采用 SPEX CertPrePTM Custom Assurance Standard 多元素标准溶液。以中国水系沉积物成份分析标准物质 GBW 07311 作为标准参考物质。

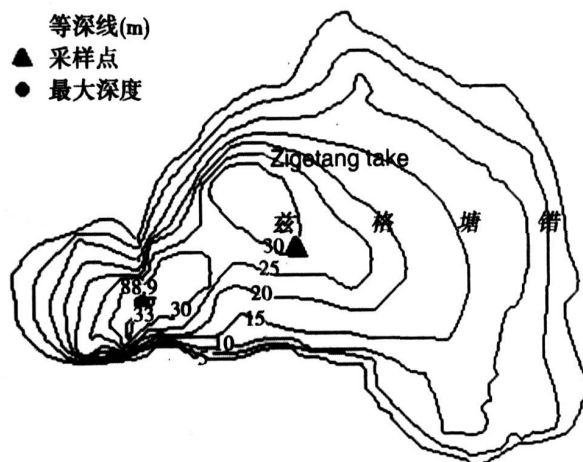
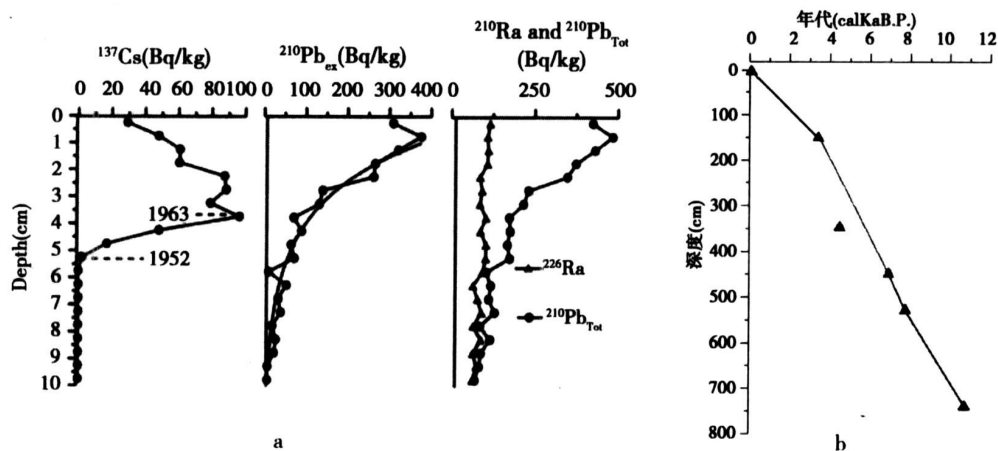


图 2 采样点位置及兹格塘错等深线

Fig. 2 Location of ZGT02 core and isobath of Zigetang Lake



a Depth profile of the ^{137}Cs dating b Depth-age curve of the ZGT02 Core

图 3 沉积岩芯深度年代曲线

Fig. 3 Depth-age curve of sediment core

3 沉积物元素地球化学的分析结果

ICP共分析了 19种元素含量, 其中 Cd的含量低于 1 mg/kg 没有测出具体含量。元素含量较大的有 Al Ca Fe K Mg Na Sr Ti等。其中 Ca含量最高为 166 mg/g 最低 54.1 mg/g 平均为 106.6 mg/g 为沉积物中含量最高的元素, 其次为 Mg 最高值达 108 mg/g 平均值 64.5 mg/g Al以 35.9 mg/g的平均含量居第三位。以下按平均含量从高到低依次为 Na 27.5 mg/g Fe 18 mg/g K 14.9 mg/g Ti 1.53 mg/g Sr 0.9 mg/g 以下元素含量较低, 按平均含量依次为 Mn 345.9 g/kg P 304.5 g/kg Ba 257.7 g/kg Cr 55.1 g/kg Ni 53.7 g/kg V 51.7 g/kg Zn 47.5 g/kg Pb 17 g/kg Co 8.6 g/kg 各元素含量在不同深度之间变化极大, 反映了沉积环境长时间尺度的变化, 总体上划分为四个演化阶段(图 4)。

4 沉积物元素地球化学的环境变化指标分析

4.1 元素地球化学的环境指示意义

沉积物物质来源一般包括流域侵蚀带来的外来组分和湖泊水体各种物理、化学及生物湖泊过程所产生的内生沉淀两部分。因此, 湖泊沉积物的化学组成与湖泊水化学条件有关且又受制于湖盆流域的地质、地球化学背景和风化作用的强度, 而这两者

的变化均与气候变化密切相关。对于某个特定自然条件下的湖泊, 如果没有突发性的地质事件和强烈的人为干扰, 气候变化将是决定沉积物化学特征的重要因素。因而对湖泊沉积物的化学组成进行研究, 就可以了解湖区的环境与气候概况。

然而, 沉积物地球化学组成受多种环境因素影响, 且不同元素地球化学行为不同, 反映的气候信息也存在差异。因此, 如何识别和提取这些指标所记录的古环境信息成为一个重要问题, 目前有以下两类方案。

1. 采用元素含量的加和或比值方法放大元素指标对气候的响应或者消除各种扰动因素的影响, 提高其准确性和灵敏度。韩淑娣等^[8]采用 Sr/Ba Fe/Cl $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ 对新疆巴里坤湖地球化学元素分析, 得到三个高值和低值区间。余素华^[9]在青藏高原第四纪地球化学元素演化的研究中采用 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{MgO}$ 比值作为环境演化指标。其大值与碎屑沉积为主的沉积相对应, 表明湖水相对淡化时期; 其小值与蒸发盐沉积为主的沉积层相对应, 表明为相对咸化时期。对贵州红枫湖沉积物岩芯研究发现碳酸盐含量和 CaO/MgO^* Al_2O_3 比值可作为湖泊沉积物中高分辨率、短尺度的气温变化的代用指标^[10]。刘平等^[7]对银川盆地钻孔研究时, 采用 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 和 Mn/Fe 比值曲线。小于 1 时为还原环境, 大于 1 时为氧化环境; 而 Mn/Fe 值大时指示深水环境, 小时指示浅水环境。

上述方法对单个指标的环境指示意义取得一定成效, 但不适于处理地球表层复杂的非线性地球化

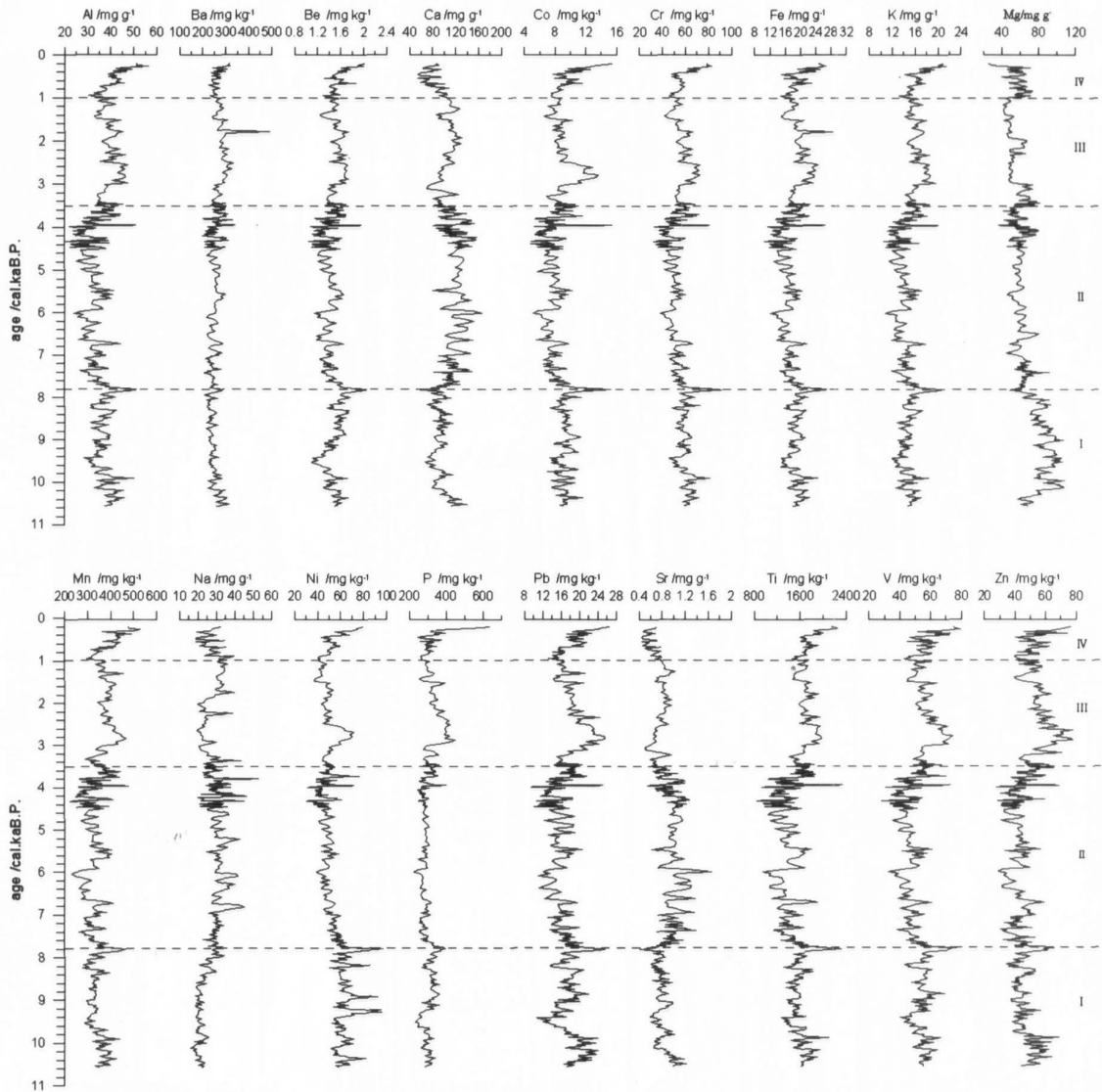


图 4 兹格塘错湖泊沉积物元素含量随深度变化

Fig 4 Element content in sediment core of Zige Tang Lake

学过程。

2. 采用因子分析方法识别控制沉积物化学组成的主要因子, 综合提取与辨识多种地球化学元素所记录的气候与环境信息^[5]。陈敬安等利用因子分析, 识别出控制沉积物化学组成的三个主要因子: 流域侵蚀因子、早期成岩因子和湖泊内生碳酸钙沉淀因子, 并发现流域因子和湖泊内生碳酸钙沉淀因子得分曲线可分别作为气候干湿和冷暖变化的代用曲线。

其中流域侵蚀因子主要包括在表生环境下地球化学性质稳定、赋存在陆源碎屑矿物中的化学元素和氧化物, 如 TiO_2 、 Fe_2O_3 、Cu、Ni、Ca、Cr、V 和 Zn 等惰性成分, 此外还包括公因子负载为负值的活性

成分 Na_2O 。早期成岩因子包括 MnO 、 K_2O 和 Rb 主要作为沉积物埋藏初期低温条件下湖泊沉积物有机质降解的氧化剂。同时, 在早期成岩过程中, 环境条件发生变化时, 粘土矿物所吸附的碱金属离子 (Rb 、 K 等) 被释放进入孔隙水扩散迁移导致 K_2O 和 Rb 的贫化。

湖泊内生碳酸钙沉淀因子主要是与碳酸钙沉淀密切相关的三个变量 CaO 、 Sr 和 Ba 。温度升高时, 浮游生物光合作用增强, CO_2 被大量吸收, 同时蒸发旺盛, 有利于碳酸钙沉淀。 Sr 的化学性质与 Ca 类似, 伴随 $CaCO_3$ 发生沉淀。而 Ba 与 Sr 因相互竞争碳酸根离子而导致其含量存在相反变化。

4.2 元素地球化学的环境指标分析

采用 SPSS11. 5. 0 统计分析软件, 对所采集岩芯的 374 个样品分别进行 18 种地球化学元素因子分析, 步骤如下

对指标进行无量纲化处理。采用标准化处理, 所用公式为

$$x_{ij}' = (x_{ij} - x_{\bar{j}}) / \sigma_j \quad \text{若 } \sigma_j = 0 \text{ 令 } x_{ij}' = 0$$
式中 x_{ij}' 是第 i 个样品中第 j 个元素含量, $x_{\bar{j}}$ 是第 j 个元素在所有样品中的平均含量, σ_j 是第 j 个元素在所有样品中的标准差, $x_{\bar{j}}$ 是第 i 个样品中第 j 个元素含量的无量纲化值。将无量纲化数据输入 SPSS 软件计算, 采用四次方最大法进行旋转, 计算结果如表 1。

表 1 主成分计算结果表

Table 1 Result of Principal Component Analysis			
主成分	主成分值	方差贡献率	累积方差贡献率
1	11.50	63.86	63.86
2	2.66	14.75	78.61
3	1.22	6.79	85.40

由表 1 可知, 第一主成分的特征根值为 11.50, 方差贡献率为 63.86%, 前三个主成分分类及方差贡献率为 85.40%, 表明前三个主成分的数值变化就可以基本代表 18 个原始变量的变化。同时求得载荷矩阵(表 2)。各个主成分 F_1 、 F_2 和 F_3 组成特征及所表示的环境意义为:

表 2 主成分载荷矩阵表

Table 2 Component Matrix of elements in sediment core of Zigetang Lake							
元素名称	F_1	F_2	F_3	元素名称	F_1	F_2	F_3
Al	0.972	0.052	-0.040	Mn	0.833	0.197	-0.087
Ba	0.649	0.554	0.175	Na	-0.391	0.163	-0.551
Be	0.899	0.164	0.038	Ni	0.641	-0.443	0.407
Ca	-0.407	0.782	0.435	P	0.790	0.199	-0.059
Co	0.915	-0.154	0.108	Pb	0.912	0.021	0.084
Cr	0.914	-0.125	0.222	Sr	-0.514	0.613	0.551
Fe	0.967	0.022	0.075	Ti	0.953	-0.015	-0.082
K	0.934	0.147	-0.245	V	0.950	-0.053	-0.009
Mg	-0.261	-0.870	0.263	Zn	0.855	0.145	-0.078

1. 第一主成分 F_1 因子的方差贡献率为 63.86%, 远高于其他成分, 对沉积物化学组成具有决定作用。元素载荷较大(绝对值 > 0.7)的有 Al、Be、Ca、Cr、Fe、K、Mn、P、Pb、Ti、V 和 Zn。从地球化学元素含量变化曲线上可以看出, F_1 因子所包含的元素变化趋势一致(图 4)。主要包含表生环境下地球化学性质稳定, 赋存在陆源碎屑矿物中的化学元素, 如 Al、Fe、Ca、Cr、Pb、Ti、V 和 Zn。早期成岩过程中作为湖泊沉积物有机质降解的主要氧化剂 Mn 以及活性成分 K。

湖泊沉积物主要来源于流域侵蚀带来的外来组分和水体中物理、化学和生物过程产生的内生沉淀。 F_1 组分主要反映了外来沉积的影响, 其中活性成分反映了径流的溶解能力, 惰性成分反映径流的侵蚀能力。

2. 第二主成分 F_2 因子方差贡献率为 14.75%。元素载荷较大(绝对值 > 0.5)的有 Ba、Ca、Mg 和 Sr。主要为活动性居中的元素, 但 Mg 的负载为负值, 表明 Mg 含量与其他元素含量出现消长变化。其原因为地表径流和泉水中 Mg 含量低于湖泊水体, 而 Ca 含量高于水体。Ca 和 Mg 都是活动性中等的元素, 半湿润、半干旱条件利于它们的溶解、迁移和富集。顾兆炎等^[3]了湖面波动对 Ca/Mg 沉积速率比值产生影响, 建立了湖泊碱金属元素沉积速率方程, 湖面上升, Mg/Ca 比值减小; 反之亦然。故湖泊中 Mg/Ca 比值能有效反映水位波动情况。Sr 往往随着 CaCO_3 在沉积物中富集。因此, F_2 因子主要反映流域径流情况。

3. 第三主成分 F_3 因子的方差贡献为 6.79%, 元素载荷较大的有 Na 和 Sr 为活性元素。但 Na 的载荷为负值, 这说明两者变化相反。Sr 更多来自于地下泉水活动。故 F_3 指示泉水活动情况, 反映区域背景作用。

以上分析显示兹格塘错沉积物化学组成主要受流域侵蚀因子(F_1)和径流因子(F_2)控制, 区域背景作用因子(F_3)所占比重很小。在不同层位的沉积物化学组成相异, 三种因子作用也不相同。计算出三种因子在各个层位得分, 可对沉积环境演化做出分析。同时, 青藏高原封闭湖泊 Mg/Ca 值能有效反映湖泊水位波动。本文将因子分析和 Mg/Ca 比值变化分析相结合解释湖泊水位变化情况, 整体上可分为四个阶段(图 5):

I) 10.5~7.8 cal ka B. P. 阶段

Mg/Ca 比值波动频繁, 总体呈现上升 - 下降趋势, 其间经历多次波动变化。10.5~9.5 cal ka B. P. 时期 F_1 因子和 F_2 指示的流域侵蚀作用和溶解作用能力下降, Mg/Ca 比值上升, 在 9.5 cal ka B. P. 同时达到极值。但在 9.8 cal ka B. P. 左右经历一次明显波动。 F_1 和 F_2 同时出现峰值, Mg/Ca 比值出现极低值。

9.5~7.8 cal ka B. P. 时期 F_1 和 F_2 因子出现小幅波动, 但总体保持稳定。Mg/Ca 比值不断下降, 流域气候比较稳定。9.3 cal ka B. P. 左右, F_1 和 F_2 因子值跃升, Mg/Ca 比值明显下降但存在滞后效应, 揭示流域变湿, 入湖水量增加, 水位上升。已有的研究表明在全新世初期出现了暖湿气候^[19-21]; 黄赐璇等人^[22]通过对孢粉的研究发现 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^[19]; 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^[23-24]。这些共同说明了在全新世早期青藏高原气候变的湿润, 但不同地区存在时间上的差异。

8.2 cal ka B. P. 左右, F_1 和 F_2 因子值下降, Mg/Ca 比值跃升, 记录了一次明显的气候事件。该气候事件与全球所谓的 8.2 ka 冷事件相对应, 青藏高原古里雅冰芯记录^[25]极为显著, 出现迅速降温, 缓慢升温特征, 最冷时降温可达 7.8~10℃。急剧降温使得降水以固态保存, 入湖径流明显减少, 致使 F_1 和 F_2 因子值下降。

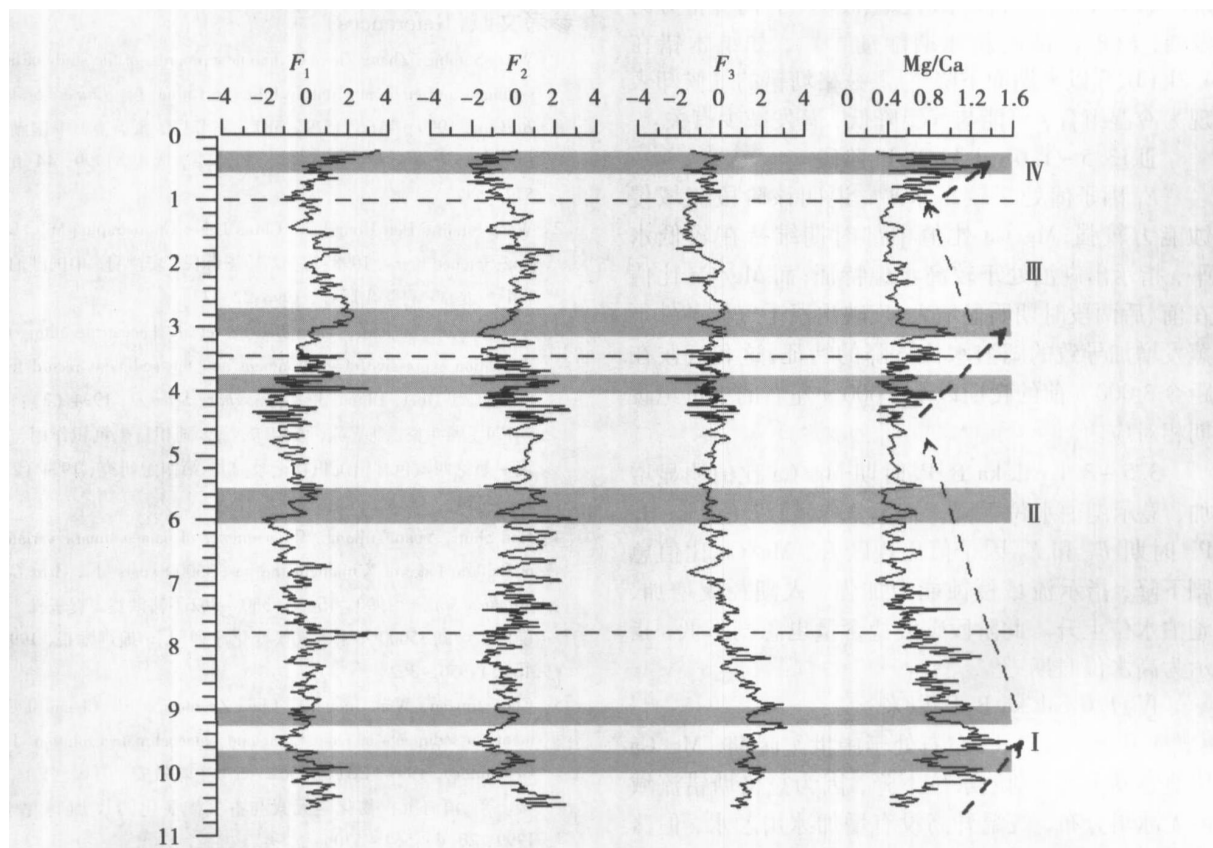


图 5 主成分因子得分曲线和 Mg/Ca 比值变化曲线 (纵坐标为年代, 单位为 ka)

Fig 5 Curves of factor scores and Mg/Ca variations

而后至 7.8 cal ka B. P. 左右 F_1 值出现峰值, F_2 小幅上升, Mg/Ca 比值明显下降; 说明流域侵蚀能力加强, 湖泊水位出现明显上升。

II) 7.8~3.5 cal ka B. P. 阶段

Mg/Ca 比值稳定在较低的水平, 波动起伏较

小、频率较低。该阶段湖泊水位处于较高的稳定时期, 起伏变化不大。 F_1 和 F_2 因子值出现镜相变化; F_2 因子值处于全新世较高水平。 F_1 因子处于全新世较低水平。 F_2 因子值表示流域气候有利于钙、镁等活动性中等元素的溶解、迁移和富集, 为半湿润、

半干旱气候。 F_1 因子值减小,有可能与气候较湿润植被覆盖度好引起流域侵蚀能力减弱,物质颗粒遭侵蚀的难度增加有关。

7.8~6.0 cal ka B. P. 时期 F_1 和 F_2 值及 Mg/Ca 比值波动幅度较大, F_1 指示的流域侵蚀能力不断减弱。6.4~4.5 cal ka B. P. 时期个指标变化幅度较小,流域环境稳定,在 6.0~5.6 cal ka B. P. 间 Mg/Ca 比值较低,此时湖泊处于相对高湖面时期。

4.5~3.5 cal ka B. P. 时期指标变化幅度明显增加,记录显示沉积环境经历剧烈变化时期。4.0~3.8 cal/ka B. P. 时段 F_1 因子值出现突出峰值, F_2 因子值也很高, Mg/Ca 比值快速下降至很低值;流域径流增加,湖泊水位出现上升。而我国北方也在这一时段存在洪水事件^[26]。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^[27,28],如纳木错在 4.2 ka B. P. 以来湖面下降^[29]。兹格塘错的气候却表现为冷湿组合,可能与气温降低,蒸发减少有关。

III) 3.5~1.0 cal ka B. P. 阶段

F_1 因子值处于较高水平,说明该阶段流域侵蚀能力较强, Mg/Ca 比值中部时期维持在较低水平,指示出湖泊处于较高水位特征;而 Mg/Ca 比值在前、后两段时期明显增大,反映出温干气候条件下蒸发增加导致的湖泊水位下降的特征,这和气候在距今 3 000 a 前的暖期以及 1 000 a 左右的中世纪暖期相对应。

3.5~3.1 cal ka B. P. 时期 Mg/Ca 比值明显增加,显示湖泊水位下降。而后 3.1~2.7 cal ka B. P. 时期 F_1 和 F_2 因子值出现跃升, Mg/Ca 比值急剧下降,指示流域侵蚀能力加强,入湖径流增加,湖泊水位上升。此阶段碳酸盐含量也急剧降低,指示为高水位时期^[16]。

IV) 1.0 cal ka B. P. 以来

1.0 cal ka B. P. 左右处于中世纪暖期, Mg/Ca 比值急剧上升,湖泊水位下降,因为兹格塘错流域内无冰川分布,气温升高没有增加冰川融水,但蒸发量增加,致使水位下降。0.5 cal ka B. P. 以来 F_1 因子值增加,与此同时 Mg/Ca 比值开始下降;指示流域气候湿润,湖泊水位开始上升,这与小冰期相对应。在青藏高原苟鲁错和青海湖湖泊沉积中也记录了小冰期的冷湿期和高湖面相对应^[30,31]。

5 结论

1. ZGT02 岩芯元素主成份分析表明主要受流域

侵蚀因子和径流因子控制,区域背景因子所占比重较小。

2. Mg/Ca 值在全新世期间共出现多次明显降低时期,分别为 (1) 10~9.7 cal ka B. P.、(2) 9.3~9.0 cal ka B. P.、(3) 6.0~5.6 cal ka B. P.、(4) 4.0~3.8 cal ka B. P.、(5) 3.1~2.7 cal ka B. P.、(6) 0.6~0.2 cal ka B. P.。说明在这几个时期湖泊水位上升,水体扩张,水质淡化,气候湿润。

3. 元素地球化学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。气候变化在时间上与其他地区有很好的一致性,但气候组合形式存在差异。兹格塘错气候变化模式为暖干冷湿模式。

参考文献 (References)

- [1] Wang Suming, 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. 中国湖泊志 [M]. 北京: 科学出版社, 1998, 22~27]
- [3] 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]
- [4] Han Shutij, Yuan Yujiang. The sequence of paleoclimatic variation of Balkun Lake of Xinjiang in the past 35000 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1990, 45(3): 350~362 [韩淑堤, 袁玉江. 新疆巴里坤湖 35000 年来古气候变化序列 [J]. 地理学报, 1990, 45(3): 350~362]
- [5] Chen Jing'an, Wan Guojiang, Chen Zhenbu, et al. Chemical elements in sediments of Lake Erhai and paleoclimate evolution [J]. *Geochimica*, 1999, 28(6): 562~570 [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]
- [6] Chen Jing'an. 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.]
- [7] Liu Pinggui, Fan Shuxian, Li Xueju. The geochemical element characteristics and paleosedimentary environment of the Quaternary deposits in Yinchuan Basin [J]. *Journal of Geomechanics*, 2000, 6(4): 43~51 [刘平贵, 范淑贤, 李雪菊. 银川盆地第四纪地球化学元素特征及沉积环境 [J]. 地质力学学报, 2000, 6(4): 43~51]

- [8] Han Shutǐ Zhong W ei Paleoclimate significance from trace element variation in Barkol Lake in Xinjiang [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1990, 10(2): 150~ 158 [韩淑媿, 钟巍. 新疆巴里坤湖 ZK0024 孔微量元素变化的古气候意义 [J]. 地理科学, 1990, 10(2): 150~ 158]
- [9] Yu Suha Wei Qi zhong Geochemical evolution and environment changes since Quaternary in Qing-Zang (Qinghai-Tibet) Plateau [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1995, 15(4): 97~ 106 [余素华, 文启忠. 试论青藏高原第四纪沉积地球化学演化与环境变迁 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1995, 15(4): 97~ 106]
- [10] Wu Fengchang Wan Guojiang Huang Ronggui Recent temperature records of annually laminated sediments in Hongfeng Lake, Guizhou [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1996, 16(4): 345~ 350 [吴丰昌, 万国江, 黄荣贵. 贵州红枫湖纹理沉积物中近代气温记录 [J]. 地理科学, 1996, 16(4): 345~ 350]
- [11] Li W anchun 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]
- [12] Shen Yongping Xu Daming Fluctuations of lakes and their environments since last glaciation in Ando 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] Jia Yulian Shi Yafeng Fan Yunqi Water balance of paleolake Qinghai and its precipitation estimation at three high lake-level stages since 40ka BP [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]
- [14] Li Shijie Li W anchun Xia Weilan *et al* Preliminary survey report of lake changes of Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Science*, 1998, 10(4): 95~ 96 [李世杰, 李万春, 夏威岚, 等. 青藏高原现代湖泊变化考察初步报告 [J]. 湖泊科学, 1998, 10(4): 95~ 96]
- [15] Ullrich Herzschuh Katja Winter Bernd Wünnenann, *et al* A general cooling trend on the central Tibetan Plateau throughout the Holocene recorded by the Lake Zige-tang pollen spectra [J]. *Quaternary International*, 2006, 154(55): 113~ 121
- [16] Shen Huiyan, Li Shijie Yu Shoubing *et al* Holocene environmental change record derived from carbonate and soluble salt content in the sediment core of Zige-tang Lake, Tibetan Plateau [J]. *Journal of Mountain Science*, 2008, 26(2): 189~ 195 [申慧彦, 李世杰, 于守兵, 等. 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 [J]. 山地学报, 2008, 26(2): 189~ 195]
- [17] Shen Huiyan, Li Shijie Yu Shoubing *et al* Grain-size characteristics of sediments from the Zige-tangco Lake, Tibetan Plateau and their environmental implication [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(4): 163~ 169 [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): 163~ 169]
- [18] Guan Zhijia 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]
- [19] 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反射性碳测年 [J]. 科学通报, 2001, 46(12): 1040~ 1044]
- [20] Gasse F, Amold M, Fontes JC, *et al* A 13 000-year climate record from western Tibet [J]. *Nature*, 1991, 353(24): 742~ 745
- [21] Tianchil 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
- [22] Huang C kuan, 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]
- [23] Li Bingyuan Li Yuanfang Kong Zhaochen *et al* 20000 years environmental change of the Gonong Co in Hohxil 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]
- [24] 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]
- [25] 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]
- [26] Xia Zhengkai Yang Xiaoyan Preliminary study on the flood events about 4ka B. P. in North China [J]. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(6): 667~ 674 [夏正楷, 杨晓燕. 我国北方 4ka B. 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]
- [27] Li Shijie Characteristic of existing glacial development in the Hohxil 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]
- [28] Wang Naifang Li Jijun Cao Jixu *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]
- [29] Zhao X itao, 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]
- [30] Li Shijie, Wang Xiaotian, Xia Weilan, et al. The Little Ice Age climate fluctuation derived from lake sediments of Gouhucuo, Qinghai Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 578~586 [李世杰, 王小天, 夏威夷, 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]
- [31] Shen Ji, Zhang Enbu, Xia Weilan. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1 000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 508~513 [沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 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 Elements in the Sediment Core of Zigetang Lake, Tibetan Plateau

ZHANG Hongliang^{1,2}, LI Shijie¹, YU Shoubing³, SHEN Huiyan^{1,2}

(1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences,

Nanjing 210008 China; 2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049 China;

3. Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210024 China)

Abstract The unique geographic environment of Tibetan Plateau leads to sensitive responses of lake depositing to climatic changes. Located in the hinterland of North Tibetan Plateau, Zigetang Lake is an enclosed lake with bad climate and little precipitation; the regional environment has always been faintly disturbed by human beings, with great evaporation and no glacier in the catchment; the main supply of water comes from surface runoff and factors of water balance are simple. Thus Zigetang Lake is ideal for study on the climatic evolution of Tibetan Plateau. A 727 cm long core (ZGT02) was obtained at water depth of 30 m in the west of Zigetang Lake, and its AMS age covers the whole Holocene. Geochemical analysis shows that element content in the sediment changes with the depth; three important factors were identified using factor analysis method, which control chemical composition of sediments, such as catchment erosion, diagenetic modification and endogenic calcium carbonate precipitation. Furthermore, research combined with Mg/Ca, the evolution history of the regional climate and environment is evaluated, and it is revealed that the basic climate succession in the region of Zigetang Lake is warm-dry and cold-humid alternately; the lake level fluctuates frequently during the Holocene, including the following high lake level periods, i.e. (1) 10~9.7 cal ka B.P., (2) 9.3~9.0 cal ka B.P., (3) 6.0~5.6 cal ka B.P., (4) 4.0~3.8 cal ka B.P., (5) 3.1~2.7 cal ka B.P., (6) 0.6~0.2 cal ka B.P.. These environmental changes and the variations of the lake level reflected by the geochemistry of Zigetang Lake sediments are well supported by other research results at the same time; there are differences as the different area.

Key words Zigetang Lake; lake sediments; geochemical