

文章编号: 1000-0690(2000)01-0083-05

洱海近代气候变化的化学记录

陈敬安, 万国江, 陈振楼, 黄荣贵

(中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要:对洱海现代沉积物进行采样, 将放射性核素精确计年与沉积物化学记录研究相结合, 成功地恢复了洱海近650年来的气候与环境变迁。研究表明, 洱海区域气候主要表现为暖干与冷湿相交替的气候演替类型, 且存在约200年时间尺度的变化准周期, 目前正处于暖干期末期-冷湿期初期, 预计气温将有所下降, 降雨量将有所增加。

关键词:湖泊沉积物; 化学记录; 气候变化; 洱海

中图分类号: P532.42 文献标识码: A

地球表面形成的各种地质档案(如极地冰芯、黄土、深海沉积、湖泊沉积、泥炭等)记载了丰富的地球环境与气候演化信息。近半个世纪以来, 地质学家利用这些地质档案开展了大量卓有成效的古气候重建工作^[1~4]。这使得人们对地质历史时期的古气候有了全面深入的了解, 但目前这些研究大多集中于东南季风区, 而且多为大时间范围(百万年)、大时间尺度(千年、万年)的研究。当“温室效应”、土地荒漠化以及淡水资源短缺等一系列全球性环境问题日益严峻地摆在我们面前的时候, 人们就开始更加关注那些与人类生活密切相关的过去发生的各种短时间尺度(年际、10年、100年)的气候变化。为此, “过去全球变化/南北半球古气候计划”(PAGES/PANASH)已将获取最近2000年来连续、高分辨自然记录及精确计年作为该项目的工作重点之一^[5,6]。作为流域地表物质运移的主要宿体, 湖泊沉积物连续、敏感、高分辨地记录了区域及全球环境变化, 它可提供时间分辨率达年至10年的高精度环境信息, 在恢复各种短时间尺度的气候和环境演化系列上具有其它自然历史记录无法替代的优势。尤其是高原封闭、半封闭湖泊, 一般具有汇水面积不大、入湖河流不长、湖水较深等特点, 是气候和环境演化的敏感指示器^[2,7]。毫无疑问, 它将会在PAGES/PANASH计划中发挥重要作用。

为弥补我国对短时间尺度气候变化研究的不足, 同时加强对西南季风区气候变化特征的认识, 本文选择位于西南季风区的洱海开展湖泊现代沉积化学记录与气候变化研究, 试图揭示洱海区域气候变化特征, 重建区域气候与环境演化历史。

1 湖区自然地理概况

洱海位于云南省大理市北郊, $100^{\circ}05' \sim 100^{\circ}17' E$, $25^{\circ}35' \sim 25^{\circ}58' N$, 是滇西最大的断陷湖泊, 长42 km, 宽最大9 km, 湖面海拔1974 m, 属澜沧江水系。该湖水面积约为249.8 km², 汇水面积约为2470 km², 湖水补给系数约10, 平均水深10.5 m, 最大水深20.5 m, 库容约 $2.56 \times 10^9 m^3$ ^[8]。

洱海属亚热带西部型季风气候, 是明显受西南季风影响的地区^[9]。湖区年均气温15℃, 年均降雨量1060 mm, 年均蒸发量1970 mm。洱海汇水区域的基岩以沉积岩和变质岩为主, 广泛发育着碳酸盐岩、片麻岩和硅质岩。

2 样品的采集和分析

为保证样品的代表性, 1991年在远离河道入口及湖水出口处, 用自行设计研制的湖泊沉积物——水界面采样装置^[10]采得长83 cm的沉积物孔柱EH911208-3-5。所采沉积物柱保持完好, 悬浮层

收稿日期: 1999-04-20; 修订日期: 1999-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(批准号: 49894170)及中国科学院重大项目专题(KZ951-A1-402-06-04)资助项目

作者简介: 陈敬安(1973-), 男, 博士, 从事环境地球化学研究。E-mail: jingan.chen@hotmail.com

未受扰动,界面水清澈透明。沉积物按 0.5~1.0 cm 间距野外现场精细分截,带回实验室烘干后,研磨成粉末,然后进行地球化学分析。其中, CaO 、 MgO 、 Al_2O_3 、 K_2O 、 Na_2O 等常量组分采用岩石化学全分析方法测定, Sr 、 Ba 等微量元素采用 X-射线荧光光谱仪测定,测量误差小于 5%。

3 结果和讨论

沉积物放射性核素 ^{137}Cs 和 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 法计年结果^[11, 12]表明,洱海沉积物平均堆积速率约为 $0.046 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,由此经高分辨计算可得出各样品的沉积年代,长 83 cm 的洱海 EH911208-3-5 沉积物柱反映了洱海近 650 年来的沉积历史。洱海沉积物各种地球化学指标的时间变化序列绘制于图 1。由图 1 可见,沉积物柱 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 Sr/Ba 、 Ca/Mg 和 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值均呈现出“中间低、两端高”的相似变化。为揭示以上化学指标所记录的去环境信息,首先必须明确它们的环境指示意义。

3.1 沉积物化学指标环境意义辨识

3.1.1 沉积物 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值

在以往的研究中,沉积物碳酸盐总量和自生碳酸盐含量曾被广泛地用于揭示湖区的气候变化,但由于沉积后碳酸盐易遭受早期成岩改造作用,因而当应用到某一个具体湖泊时,必须首先排除早期成岩作用的影响。在早期成岩作用过程中,湖泊碳酸盐沉积记录的改造主要涉及两个方面:一是原生碳酸盐(包括外源碳酸盐和自生碳酸盐)的溶解;二是次生碳酸盐的形成。对孔隙水方解石溶解——沉淀平衡特征的研究表明,洱海孔隙水基本未出现方解石的过饱和现象,因而不存在次生碳酸盐的形成。尽管由于孔隙水对方解石的不饱和而导致了部分原生碳酸盐的溶解,但它对沉积物碳酸盐的改造程度小于 6%^①,因而洱海沉积物原生碳酸盐记录基本不受早期成岩作用影响,可真实反映气候变化。

事实上,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,因而只有自生碳酸盐才真正具有气候变化指示意义。

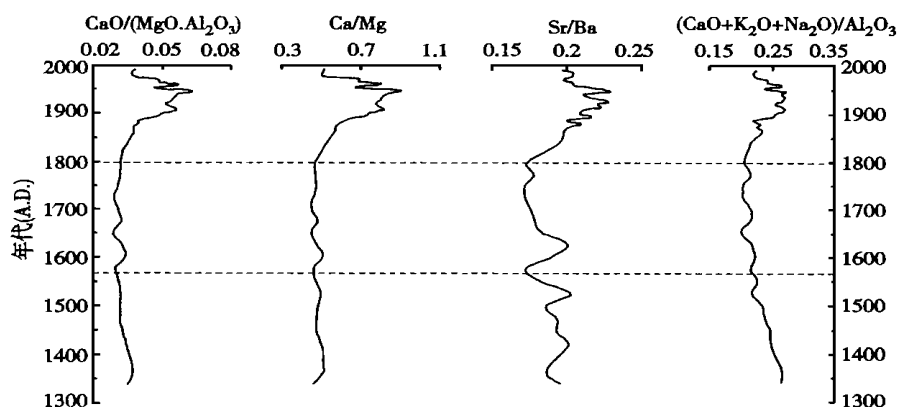


图 1 洱海沉积物地球化学指标垂直变化剖面

Fig. 1 The vertical profiles of geochemical indexes in sediments of Lake Erhai

目前普遍认为浮游生物光合作用引起二氧化碳同化作用是湖泊自生碳酸钙沉淀的重要因素,气温高,浮游生物光合作用增强,湖泊水体中 CO_2 被大量吸收,致使 $\text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^- \rightleftharpoons \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 的反应平衡向右移动,导致碳酸钙沉淀的产生;同时,气温高时,湖水蒸发强烈也有利于碳酸钙沉淀。因此,湖泊自生碳酸钙的高含量指示气温相对较高。但由

于难以对湖泊自生与外源碳酸盐进行定量区分,在位于碳酸盐岩发育地区的洱海尤其如此,所以使得提取湖泊自生碳酸钙沉淀记录的环境信息变得十分困难。湖泊沉积物中碳酸盐矿物主要为白云石和方解石,沉积物 CaO/MgO 值基本上反映了方解石(CaCO_3)与白云石 $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ 比值的变化。在淡水湖泊中,白云石一般不是自生沉淀的,而主要来源

① 陈振楼,高原湖泊地球化学记录早期成岩改造过程的研究. 中国科学院地球化学研究所, 博士论文, 1996.

于流域侵蚀带来的陆源碎屑; 方解石则包含了由流域风化机械搬运而来的外源组分和湖泊自生碳酸钙沉淀, 特别是在水生植物茂盛或湖水蒸发强烈的湖泊, 自生碳酸盐沉淀可占相当比重。因此, 对于陆源碎屑输入基本稳定的湖泊, CaO/MgO 值可反映湖泊自生碳酸钙沉淀的相对多少, 其高值指示气温较高。 Al_2O_3 是沉积物中的稳定组分, 用其含量可以校正陆源碎屑输入的变化, 因此, 洱海沉积物 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 值可灵敏反映湖泊自生碳酸钙含量的相对高低, 从而具有指示气温变化的意义, 即其高值指示温暖时期, 低值指示相对寒冷时期。

3.1.2 盐度指标

SrSO_4 的溶解度大于 BaSO_4 , 当水体盐度较低时, SO_4^{2-} 浓度一般较小, Ba^{2+} 优先与 SO_4^{2-} 结合形成 BaSO_4 沉淀而沉降于湖底, Sr 则以游离态离子赋存在湖水中。只有当湖水浓缩到一定程度、水体矿化度和水体盐度较高时, 湖水中的 Sr^{2+} 才能形成 SrSO_4 沉淀而沉降于湖底, 因而沉积物 Sr/Ba 比值能有效地用来指示湖泊水体盐度变化。通常, Ca/Mg 比值具有与 Sr/Ba 比值相同的环境指示意义, 也被广泛地用来反映水体盐度^[13]。因此, 洱海沉积物 Sr/Ba 、 Ca/Mg 比值可用于指示湖水盐度变化, 其高值指示水体盐度较高, 反映湖泊相对萎缩, 标志气候干旱期; 低值指示湖水盐度较低, 反映湖泊相对扩张, 标志气候相对湿润期。

3.1.3 沉积物 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值

$(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值反映了活性组分与惰性组分之间的关系, 文启忠曾用黄土中的 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值来揭示第四纪时期的气候干湿变化^[14]。事实上, 这一指标也可应用于沉积物。在干旱气候条件下, 湖盆流域降水减少, 蒸发作用增强, 地表径流贫乏, 基本以碎屑状态存在的惰性组分(如 Al_2O_3) 难于以机械搬运的物理形式迁移至湖泊, 但活性组分(如易溶盐元素 Ca 、 K 、 Na) 仍然可以化学侵蚀的形式呈离子、胶体状态迁移至湖泊, 在湖泊相对萎缩、蒸发作用强烈的环境下, 可沉淀至湖底而相对富集, 导致沉积物 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值增大。反之, 在湿润气候条件下, 湖盆流域降水增多, 蒸发作用减弱, 地表径流发育, 大量以碎屑状态存在的惰性组分(如 Al_2O_3) 被冲刷而迁移至湖泊, 并沉降于湖底, 导致沉积物中惰性组分的含量增大, 而此时湖泊处于相对扩张期, 蒸发作用较弱, 湖水相对淡化, 易溶盐离子 Ca 、 K 、 Na 等多

以游离态存在于湖水中, 难以形成盐类矿物沉淀而在沉积物中富集, 因而沉积物 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值减小。由此可见, 沉积物 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值可有效指示湖盆流域气候的干湿变化, 其高值反映降水偏少时期的干旱气候, 低值反映降水较多时期的湿润气候。

3.2 洱海近 650 年来的气候变化

由以上分析可知, 洱海沉积物 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值可反映区域气候的冷暖变化, 高值指示温暖期, 低值指示相对寒冷期; 而沉积物 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Sr/Ba 和 Ca/Mg 比值可用来反映区域气候的干湿波动, 高值指示气候干旱期, 低值指示气候相对湿润期。

如图 1 所示, 垂直剖面上 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Sr/Ba 和 Ca/Mg 比值自上至下可分为如下 3 个大的变化阶段, 对应着洱海区域气候变化的 3 个明显不同时期:

(1) 剖面上段, 也即 1800 年至今, 这些比值显著偏高, 反映洱海在这段时期气温相对较高, 降水偏少, 湖水相对咸化, 湖面收缩, 整体上处于明显的暖干期。其间, 1800~1950 年间, 这些比值呈现出一致性的递增趋势, 尤其是自 1880~1950 年间, 递增趋势更加明显。这反映了洱海区域气候自上世纪末以来整体上变干变暖。1950~1980 年间, 这些比值转而呈递减趋势, 反映气温有所下降, 降雨量有所增加, 这与大理气象站的气候资料相当吻合。由图 2 和图 3 可见, 自本世纪 50 年代初至 70 年代末, 洱海气温在波动中呈持续下降趋势, 降雨量也明显分为两段, 后半期的降雨量大于前半期。这在一定程度上说明了沉积物化学指标记录区域气候与环境变化信息的灵敏性和可靠性, 洱海沉积物化学指标可提供时间分辨率达年至 10 年的高精度环境信息。

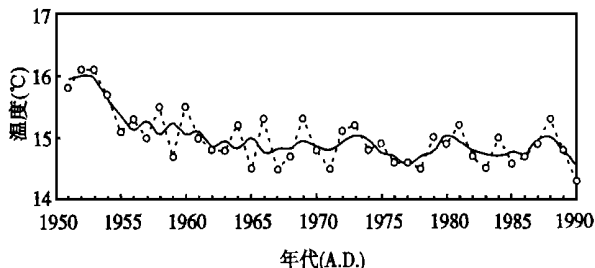


图 2 洱海年均气温变化及其趋势

Fig. 2 Variation of annual mean temperature and its trend in Lake Erhai

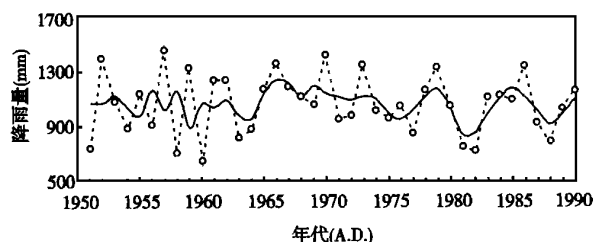


图3 洱海年均降雨量变化及其趋势

Fig. 3 Variation of annual mean precipitation and its trend in Lake Erhai

近 100 年来的全球变化研究表明, 北半球自 19 世纪 80 年代末开始升温, 到本世纪 40 年代达最高值, 40 年代末下降, 至 70 年代末达到最低值, 80 年代又开始回升。图 1 显示, 洱海沉积物 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Sr/Ba 和 Ca/Mg 比值自上世纪末以来递增趋势明显, 至 1946 年前后达到极大值, 尔后又呈下降趋势, 至 1976 年前后达到极小值, 80 年代又稍有回升。由此可见, 近 100 年来洱海沉积物化学指标所反映的洱海区域气候冷暖变化与北半球气候冷暖变化表现出惊人的相似, 这说明洱海区域气候冷暖变化与全球气候冷暖变化息息相关, 全球性气候因子对洱海区域气候起着很强的控制作用。

(2) 剖面中段, 也即 1570~1800 年间, 这些比值基本上均在低水平上作小幅度波动, 表明这段时期洱海气温相对较低, 气候湿润多雨, 地表径流发育, 湖水盐度较小, 湖泊相对扩张, 处于明显的冷湿期。这可能是现代小冰期(一般泛指 1550~1850 年间的气候相对寒冷时期^[5]) 在洱海地区的反映。

(3) 剖面下段, 也即 1340~1570 年间, 这些比值相对较高, 且整体上呈递减趋势, 尤其是 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 、 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 比值, 递减趋势更为明显, 反映了这段时期洱海气温相对较高, 降雨较少, 地表径流贫乏, 处于气候的暖干期。但作为湖水盐度指标的 Sr/Ba 和 Ca/Mg 比值, 其递减趋势并不明显, 这可能与湖水盐度的多因素控制有关。

综上所述, 近 650 年来, 洱海区域气候大体经历了 3 个变化阶段: 1340~1570 年间的气候暖干期、1570~1800 年间的冷湿期以及 1800 年至今的暖干期。这 3 个阶段都持续了大约 200 年, 反映洱海区

域气候具有约 200 年时间尺度的变化准周期, 目前正处于暖干期末期-冷湿期初期, 预计气温将有所下降, 降雨量将有所增加。同时, 上述事实也表明: 洱海区域气候主要表现为暖干与冷湿相交替的气候演替类型。大理气象站 1951~1990 年间的气候资料(图 2 和图 3) 显示: 1951~1964 年间, 洱海气温整体偏高, 降雨量偏少; 1964~1990 年间, 洱海气温偏低, 而降雨量却有所增加, 映证了洱海地区暖期干燥、冷期湿润的气候变化特征。由此看来, 西南季风区可能具有与东南季风区明显不同的气候干、湿、冷、暖组合类型: 在东南季风区, 气候一般表现为暖期湿润、冷期干燥^[1], 在西南季风区则表现为暖期干燥、冷期湿润。西南季风区固有的地理位置、特殊的地貌类型以及青藏高原隆升效应的强烈影响可能是产生这种差异的主要原因。

4 结论

(1) 洱海沉积物 $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ 比值具有气候冷暖变化指示意义, 而 $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 Sr/Ba 、 Ca/Mg 比值具有气候干湿变化指示意义。这些比值近 650 年来的时间变化序列成功地捕捉到了洱海区域气候 10 年至 100 年量级的短尺度波动。

(2) 洱海区域气候主要表现为暖干与冷湿相交替的气候演替类型, 且具有约 200 年时间尺度的变化准周期, 目前正处于暖干期末期-冷湿期初期, 预计气温将有所下降, 降雨量将有所增加。

(3) 1570~1800 年间的冷湿期可能是现代小冰期在洱海地区的反映, 近 100 年来的气候变化研究也表明, 洱海区域气候冷暖变化与全球气候冷暖变化息息相关, 全球性气候因子对洱海气候起着很强的控制作用。与此同时, 洱海区域气候又表现出明显的“暖干与冷湿相交替”的区域特色。因此, 加强对该地区的气候变化研究对丰富全球变化、认识西南季风区气候变化特征、完善亚洲古季风研究均具有重要的理论与现实意义。

参考文献:

- [1] 刘东生. 黄土与环境[M]. 北京: 科学出版社, 1985. 336~348.
- [2] 万国江. 环境质量的地球化学原理[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 51~52.
- [3] COHMAP Members. Climatic changes of the last 18, 000 years: observations and model simulations[J]. Science, 1988, **241**(4868/

- 4869): 1043– 1052.
- [4] 安芷生, 吴锡浩, 卢演涛, 等. 最近 18000 年中国古环境变迁[J]. 自然科学进展- 国家重点实验室通讯, 1991, **1**(2): 153– 159.
- [5] 谭明, 秦小光, 刘东生. 石笋记录的年际、十年、百年尺度气候变化[J]. 中国科学, D 辑, 1998, **28**(3): 272– 277.
- [6] PAGES. Paleoclimates of the Northern and Southern Hemispheres[M]. Bern: Pages Press, 1995. 95– 1.
- [7] 陈敬安, 万国江, 黄荣贵. 洱海沉积物重金属地球化学相及其污染历史研究[J]. 地质地球化学, 1998, **26**(2): 1– 8.
- [8] 万国江, 徐义芳, 李荪蓉, 等. 云贵高原若干湖泊水库水化学组分研究[J]. 环境科学丛刊, 1988, **9**(3): 37– 51.
- [9] 朱海虹. 云南断陷湖泊环境与沉积[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 113– 116.
- [10] 袁自强, 吴德殊, 黄荣贵, 等. 湖泊沉积物——水界面系列采样装置的研制[J]. 环境科学, 1993, **14**(1): 70– 73.
- [11] 万国江. 现代沉积年分辨的 ^{137}Cs 计年——以云南洱海和贵州红枫湖为例[J]. 第四纪研究, 1999, **1**: 73– 80.
- [12] Wan G J, Santschi P H, Sturm M, et al. Natural (^{210}Pb , ^7Be) and fallout (^{137}Cs , $^{239,240}\text{Pu}$, ^{90}Sr) radionuclides as geochemical tracers of sedimentation in Greifensee, Switzerland[J]. Chemical Geology, 1987, **63**(1/2): 181– 196.
- [13] 王苏民, 李建仁. 湖泊沉积—研究历史气候的有效手段[J]. 科学通报, 1991, **36**(1): 54– 56.
- [14] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989. 59– 63.
- [15] Lamb H H. Climate: Present, Past and Future[M]. London: Methuen, 1977. 835.

Recent Climatic Change and Its Chemical Records in Lake Erhai

CHEN Jing-an, WAN Guo-jiang, CHEN Zhen-lou, HUANG Rong-gui

(State Key Lab of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang Guizhou 550002)

Abstract: As a main lodging of surface substances, the plateau-lake sediment continuously records the information of regional climate and environment with high-resolution, and has major implications for reconstructing short time-scale climatic changes. Through careful sampling of recent sediments and accurate dating by radionuclides, the evolutionary history of the regional climate and environment in recent 650 years is reconstructed successfully by chemical records in sediments of Lake Erhai.

The results show that the $\text{CaO}/(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3)$ ratio in sediments can indicate palaeotemperature changes while the $(\text{CaO} + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3$, Sr/Ba , Ca/Mg ratios have the palaeoclimate implications for revealing the aridity/humidity changes, according to it three climate phases are revealed: the warm-dry period within 1340– 1570AD, the cold-humid period within 1570– 1800AD and the warm-dry period since 1800AD. This suggests that the climatic succession type in the region of Lake Erhai is the warm-dry and the cold-humid alternatively and there exists 200 years time-scale climatic quasi-periodical changes. At present, it is at the end of the warm-dry period and at the beginning of the cold-humid period, so the temperature will fall and the precipitation will increase.

On the one hand, the regional climate in Lake Erhai shows consistency with the global climate. On the other hand, it takes on specific regional characteristics. Therefore, to strengthen palaeoclimate study in this region is very important and meaningful in theory and reality for extending contents of global changes, realizing climatic change characteristics in the southwest monsoon zone and perfecting the Asian paleomonsoon study.

Key words: Lake sediments; Chemical records; Climatic changes; Lake Erhai