

滇池 700 年来气候变化与人类活动的湖泊环境响应研究

陈荣彦¹, 宋学良², 张世涛¹, 张子雄², 杨伟¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093;

2. 云南省地质科学研究所, 云南 昆明 650091)

摘要: 通过对滇池剖面沉积物质量磁化率、 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素、粒度、矿物成分、 CaCO_3 、有机质、铁、粘土矿物元素的测定, 利用 ^{210}Pb 测年, 恢复了滇池地区近 700 年来的气候变化。通过对湖泊沉积记录的分析, 发现滇池经历了两个高湖水期和一个低湖水期, 具有明显的 200 年气候周期性; 本区气候变化具有冷湿—暖干的气候变化特征。滇池沉积记录包含了人类活动的信息, 揭示了人类疏挖海口河, 改变了湖泊沉积速率; 最近十几年, 工农业活动污染物进入湖泊, 改变了湖泊的营养度, 是滇池迅速富营养化的阶段。

关键词: 滇池; 湖泊沉积物; 质量磁化率; 气候变化; 人类活动

中图分类号: P343.3 文献标识码: A 文章编号: 1008—858X(2008)02—0007—06

1996 年, 国际过去全球变化(PAGES)项目科学执行委员会将“农业时期土地利用和气候变化对流域系统的影响”(Land use and climatic impacts on fluvial system during the period of agriculture)计划列为新的国际合作研究的前沿领域, 目的在于加强十年至百年尺度人与自然的相互作用的流域系统研究, 为预测未来流域系统环境变化提供科学依据。历史时期的湖泊沉积物包含着气候变化和人类活动的双重影响, 通过对湖泊沉积物的多环境指标分析和综合研究, 可以揭示人类活动特别是土地利用方式变革和气候变化的湖泊响应过程^[1-5]。

滇池位于亚热带高原西南季风气候区, 是云南省内最大的淡水湖泊。流域面积 2 920 km², 水域面积 298 km², 流域最大入湖河流盘龙江, 流经昆明市区后汇入滇池。湖泊唯一出水口为西南部海口, 属高原半封闭型湖泊。流域辖昆明、嵩明、呈贡、晋宁等几个县市, 是省内最大的坝子, 为历史上农业活动比较聚集的

地区。前人有对滇池万年尺度的古气候研究^[6-7], 但对百年尺度的气候变化尚未涉足。本文通过对滇池沉积物多环境指标的测定分析, 探讨了滇池流域近 700 年来的气候变化及人类活动的湖泊环境响应。

1 采样与分析

采取未经扰动的连续泥芯柱是研究工作的关键步骤。在观音山以东湖心部位, 用 Minnesota 活塞取芯器采取定向连续泥芯, 见图 1。对质量磁化率 x 、 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素、粒度、矿物组成、 CaCO_3 、有机质、Fe 和粘土矿物元素 K、Na、Mg 进行测量分析, 采用 ^{210}Pb 测年法。

质量磁化率的测定, 采用 WCTP-F 型稀土永磁法拉第天平, 在低于 50 °C 温度下烘干, 研为粉状, 再等体积取样测量。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素测定用 VG PRISM II 型稳定同位素仪测定, 有机碳(OC)用 550 °C 温度下, 2 h 的烧矢量表示, 地

收稿日期: 2007—10—26
基金项目: 国家重点基础研究发展计划“973”项目(2002CB412300); 滇中湖群对人类近现代活动的沉积响应及湖泊恢复研究(14051052)资助

作者简介: 陈荣彦(1982—), 女, 硕士研究生。Email: gry82720@163.com

球化学分析 Fe、K、Na、Mg 用1 mol HCl 煮解后用 JA9000 电感耦合等离子仪测定。粒度测定使用 SKC-2000 型光透射式粒度分布测定仪测定,用 X 光衍射测定矿物成分。CaCO₃ 值的确定是先测定 IC, 然后 IC×8.33 推算 CaCO₃ 的近似值。

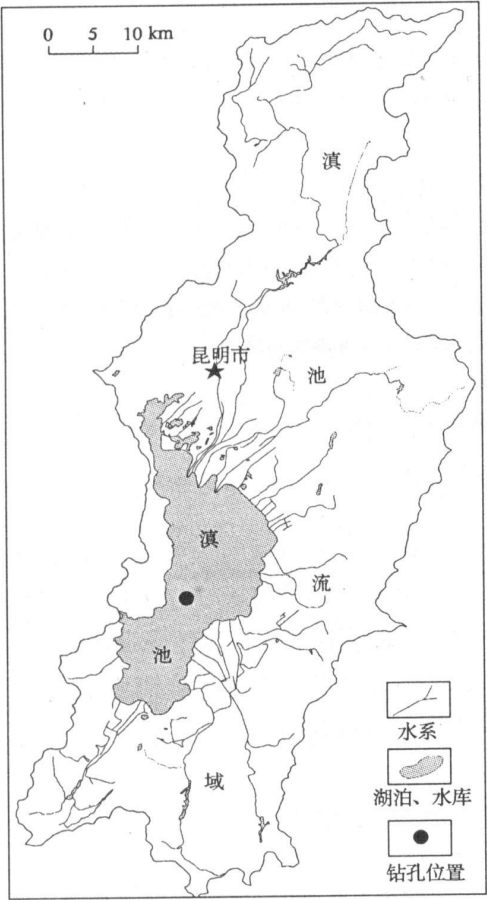


图 1 滇池流域及钻孔位置图

Fig 1 Location map of Dianchi lake drainage area and distribution of monitoring drill

²¹⁰Pb 测年数据由美国明尼苏达大学湖泊研究中心测试。以4 cm间隔取样测定, 因为²¹⁰Pb 半衰期仅22.26年, 因此只能对大约100年形成物质进行年龄测定, 更深层年龄只能用²¹⁰Pb 实测年龄结合沉积速率外推。实测最大年龄值为30 cm处104 aBP, 从30~85 cm处沉积物成分、颜色等基本一致, 因此以30 cm处沉积物沉积通量(0.0515 g/cm²a)不变计算, 30~85 cm段沉积物垒积干重量为29.61 g/cm², 沉积时间为574.95年, 所以85 cm处年龄为679 aBP。

据测年数据, 推算在85 cm以上平均沉积速率为1.37 mm/a, 以下平均沉积速率仅0.20 mm/a, 在文中仅讨论剖面85 cm以上沉积物记录的气候变化及其对人类活动的响应。

2 各环境指标与气候变化的关系

湖泊沉积物磁化率的变化可以揭示源区物质的侵蚀状况、人类活动引起的土地利用方式的改变^[8-9], 但也应看到因为汇水区物质磁性特征和沉积环境对湖盆中磁性矿物富集、保存和次生变化等的影响^[10], 和黄土磁化率与气候变化存在明显的对应关系不同^[11], 需要配合其它环境指标来更客观的反映环境变化。矿物组成、粒度测4个样品。测得的矿物成分中, 蒙脱石和伊利石为粘土矿物, 蒙脱石是干旱气候条件下盐度较高的水体代表性矿物; 湖泊沉积物中粒度粗细与水动力作用有关, 反映湖面波动造成的湖岸进退变化。因钻孔位置未变, 粒度粗说明水动力作用较强, 钻孔位置距湖岸较近, 即湖水位较低; 而粒度细则说明水动力作用较弱, 钻孔位置距湖岸较远, 即湖水位较高。滇池沉积物磁化率与粒度、矿物成分之间的关系见表1。蒙脱石高含量值对应磁化率低值, 说明低磁化率值对应着干旱气候。磁化率与粒度呈负相关关系。磁化率最高的 III I 段, <8φ 的粒级质量分数分别为 55.8%和 63.1%, 而 >6φ 的粒级质量分数分别为 4.45%和 5.5%, 说明在高磁化率段, 粒度较细, 即高磁化率值对应高湖水期; 磁化率最低的 II 段, <8φ 的粒级质量分数是 3.95%, >6φ 的粒级质量分数是 29.4%, 说明在磁化率低值段, 粒度较粗, 即磁化率低值对应低湖水期。

灰岩风化侵蚀主要依靠化学风化作用, 以重碳酸盐形式被搬运, 但在湖泊沉积物中, 特别是近湖心部位灰岩碎屑不多, 所以 CaCO₃ 沉积主要以生物化学作用为主, 是原地生成的物质组分。通过 X 衍射, 含 CaCO₃ 的矿物成分主要为方解石, 是水中植物光合作用过程中吸收的 CO₂ 使湖水中的重碳酸盐 Ca(HCO₃)₂ 生成微晶方解石(1~5 μm)进入沉积物。因此, 滇池湖泊沉积物中的 CaCO₃ 的变化可以灵敏的指示湖泊

环境变化, 是环境变化研究中一个良好的环境代替指标, 它数量的增多, 说明湖泊营养度改变, 湖泊的生产力和生物量增多^[12]。OC 的含

量可代表有机质的量^[13], 主要反映湖泊生物量的自然变化。

表 1 样品质量磁化率、粒度与矿物组成关系表

Table 1 Relation table of mass susceptibility, average grain and mineral component						
气候 分段	采样深度/ cm	质量磁化率/ (10 ⁻⁸ m ³ /kg)	矿物组成(按含量从大到小)	平均粒度/ μm	不同粒级所占质量分数/%	
					< 8φ	> 6φ
IV	3	65.51	伊利石 石英 方解石 高岭石 三水铝石 锐钛矿 褐铁矿	5.87		
III	18	102.34	伊利石 石英 高岭石 蒙脱石 锐钛矿 褐铁矿 长石	2.51	55.8	4.45
II	63	20.34	石英 蒙脱石	12.40	3.95	29.4
I	76	104.55	伊利石 石英 高岭石 蒙脱石 三水铝石 褐铁矿 锐钛矿 长石	1.83	63.1	5.5

文中 $\delta^{18}\text{O}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素采用的标准(PDB)由美国南卡罗来纳州皮狄组中一种白垩纪拟箭石与磷酸反应生成的 CO_2 气体中 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值确定的。利用湖泊内自生碳酸盐测定碳、氧同位素。 $\delta^{18}\text{O}$ 的测定可以反映沉积物生成时湖水温度和水体的 ^{18}O 浓度。蒸汽中富集 ^{16}O , 而残余水中富集 ^{18}O 。一般讲内陆湖泊水体 $\delta^{18}\text{O}$ 值的增加主要是蒸发/降水比值的增加所致。现测得昆明地区降雨 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-

13.05‰(标准平均海水值), 而滇池水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值为-6.45‰(标准平均海水值), 后者明显高于前者, 与现今昆明地区降水量小于蒸发量的情况一致。 $\delta^{13}\text{C}$ 可以跟踪湖泊生物量变化, 因在光合作用过程中, ^{12}C 被优先从分解的无机碳中分馏出来, 而剩余的无机碳中 ^{13}C 含量增高。 CaCO_3 、OC 及 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线见图 2。

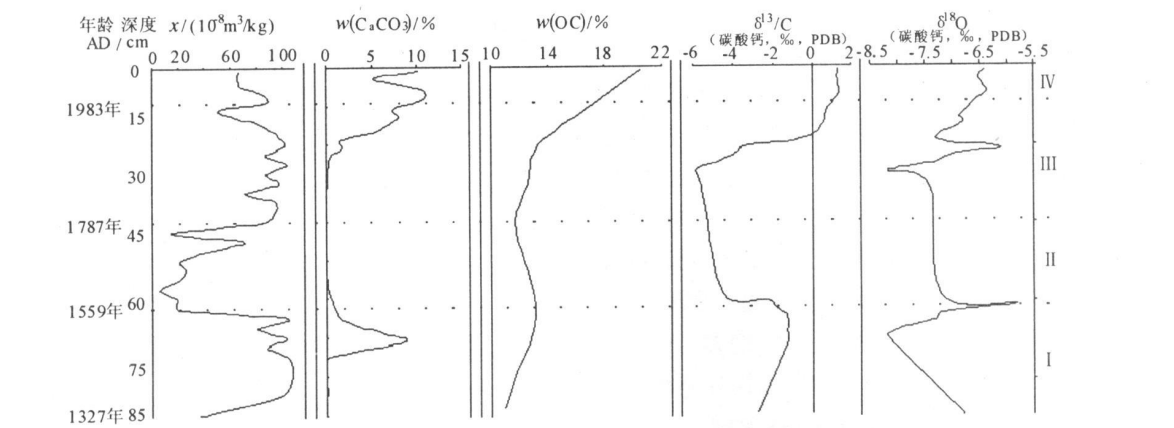


图 2 磁化率及碳酸钙、有机碳和碳、氧同位素及气候分期图

Fig 2 Variation of magnetic susceptibility, CaCO_3 , organic carbonate and $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ isotope and division of climate periods

泊。因此，它在湖泊沉积物中的含量代表汇流区土壤侵蚀作用的强度，也可以非晶质含水氧化物形态保留在土壤中，以有机酸络合物形成的凝胶颗粒的形式被带到湖泊里。在氧化条件下，Fe 的溶解度低，在还原条件下，较易从土壤中溶析出来。从水体中沉淀在沉积物中的 Fe 在湖水较深而形成分层情况下，在还原环境中，还会被重新溶解，造成 Fe 在湖水沉积物剖面中分布情况的改变，即向剖面顶部迁移，造成顶部

出现 Fe 峰值，从而歪曲沉积作用的历史变化^[14]。沉积物剖面顶部，含铁质粘土层，Fe 含量增长与粘土矿物元素 K、Na、Mg 一致，表明与汇流区土壤加速侵蚀有关，而不是(或不完全是)氧化、还原环境改变所致，这也正好被沉积物高速沉积所证实，粘土矿物元素变化曲线见图 3。图 3 选择剖面深度 200 cm，主要为了说明磁化率和矿物元素在 85 cm 处发生了突变，85 cm 以上为高速沉积层。

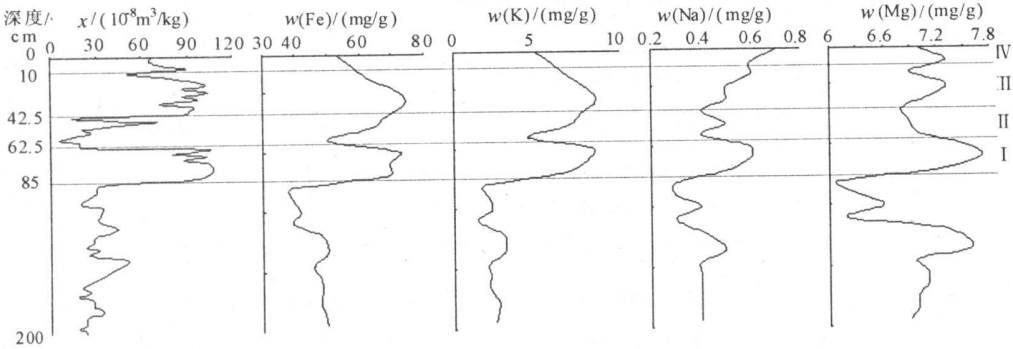


图 3 磁化率与粘土矿物元素变化曲线

Fig 3 Variation curve of magnetic susceptibility and clay mineral elements

从图 2 中可以看出 CaCO_3 、OC、 $\delta^{13}\text{C}$ 三者之间具有较好的一致变化性。因为碳酸钙为湖泊内部自生物质，其高含量时，说明湖泊生物量较高，对应有机碳和碳同位素为高值。而 CaCO_3 的低值段，则可能是在干早期，由于近岸高能环境，1~5 μm 的微晶方解石难于在此沉积。而在 IV 段， CaCO_3 、OC、 $\delta^{13}\text{C}$ 值都很高，碳同位素甚至达到了正值，说明本段湖水生物量很高，应当与湖泊富营养化有关。氧同位素变化与前三者有差别，需要结合其他因素来说明。从图 3 可以看出，在 85 cm 处，磁化率和粘土矿物元素均发生了突变，都升到高值，这说明在此处外源物质突然增多，向湖泊输入了大量的磁性物质，并且也从外界带来了大量的生物碎屑。这些生物碎屑则使 CaCO_3 、OC、 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 I 段为高值；而 $\delta^{18}\text{O}$ 主要可以指示 CaCO_3 形成时湖水的温度，其在本段为一低值，说明温度较低。而在 III 段，氧同位素有两次明显的波动，在此期磁化率波动也较明显，说明本期气候变化较剧烈。

3 沉积记录的气候干湿、冷暖变化

根据磁化率变化趋势，结合其它环境指标，将近 700 年来滇池沉积记录的气候变化分为 4 个阶段，见图 2。

I (85 ~ 62.5 cm, 1 327 a ~ 1 559 aBP), 磁化率值变化于 88 ~ 107 个磁化率单位之间，为剖面磁化率最高值段；样品粒径 1.83 μm ，为几个样品的粒度最小值；主要矿物为伊利石、石英； CaCO_3 、OC、 $\delta^{13}\text{C}$ 为高值， $\delta^{18}\text{O}$ 为低值，粘土矿物元素为高值段，代表本期是温度较低、湖面较高的历史气候期。并且本期湖泊内生物量高，说明本段户内营养度发生了变化。

II (62.5 ~ 40 cm, 1 559 ~ 1 787 a), 磁化率值变化于 6 ~ 70 磁化率单位之间，为本剖面磁化率最低值段；样品粒径 12.40 μm ，是样品中的粒度最大值，碎屑矿物主要为石英和蒙脱石，代表本段为一低湖面的干旱气候期。由于湖水面萎缩，湖岸向湖心靠近，湖浪造成的水动力作用带动较粗粒的石英砂质碎屑增加；突降的暴雨

也会带动石英碎屑等大颗粒的物质进入湖泊^[5]。根据历史文献记载,1764年大旱,昆明滇池水干涸(1980,云南灾害史料,云南省气象科学研究所印),宋学良等对此干旱事件已有研究^[6]。此干旱气候的形成机制可能是受大气环流影响,但需进一步研究。

III(40~10 cm, 1787 a~1983 a),磁化率值变化于72~103个磁化率单位之间,为次高值段,样品粒径 $2.51\ \mu\text{m}$,为样品粒径的较低值,主要矿物成分为伊利石、石英,代表本期湖水面较高。本期磁化率和 $\delta^{18}\text{O}$ 经历了几次较明显的波动,说明本期气候经历了几次干湿、冷暖波动。史料记载,18世纪后干旱和水灾记录都较多,说明气候处于较为剧烈的变动时期。碳同位素和 CaCO_3 含量、OC量都开始增加,说明湖泊生物量开始增加。

IV(10~0 cm, 1983 a~),磁化率值变化于52~89个磁化率单位之间,样品粒径 $5.87\ \mu\text{m}$,主要矿物成分为伊利石、石英,本段湖水面较高。氧同位素含量有所升高,说明湖水蒸发量增大,温度升高。 CaCO_3 、OC为高值段,碳同位素含量增加明显,全部为正值,代表本期湖水生物量大幅增加,是湖泊富营养化的表现。

4 人类活动在湖泊沉积记录中的反应

I段,磁化率突然由低值上升到高值,并且粘土矿物元素含量也为高值段,说明从湖泊外部带来了大量的磁性物质;并且碳酸钙等的高值说明从外界带来了大量的生物碎屑。这些变化的发生与元代疏挖海口河的时间基本一致,说明疏挖海口河使湖水面突降,剥蚀基准面降低,使大量的碎屑物质进入湖泊,从而改变了湖泊沉积物的磁性和 CaCO_3 、OC、 $\delta^{13}\text{C}$ 的含量。

在IV段, CaCO_3 、OC、 $\delta^{13}\text{C}$ 值为高值, $\delta^{13}\text{C}$ 值甚至全部为正,并且沉积物显示本段泥芯呈黑色,有植物碎屑,质量磁化率比III段略低,粘土矿物元素含量基本都有降低,说明外源碎屑物质输入量减少,这些都说明湖泊富营养化的发生。自然演化的湖泊,其营养度的变化是一个缓慢的过程,而非短时间内发生明显的变化。

这说明人类活动改变了湖泊的营养度,主要是因为滇池处于昆明市区的下游,昆明工农业的发展和人口的增加,排污量增加,很多未处理的污染物直接排入滇池,使滇池受到严重的污染,迅速改变了湖泊的营养度。

5 结论

滇池近700年来的气候分期,明显出现两个高湖水期和一个低湖水期,存在明显的200年周期。青海湖、岱海以及青藏高原古里雅冰芯中均发现了200年气候周期的存在,这个200年气候周期值得引起我们的注意。

结合其他环境指标,得出滇池磁化率高值对应高湖水期;而低值,则对应了干旱的低湖水期。

在85 cm处,磁化率和粘土矿物元素发生突变,主要是人类疏挖海口河,使湖水位降低,剥蚀基准面降低,为湖泊带入了大量的外源物质。

湖泊内生的碳酸钙和OC、 $\delta^{13}\text{C}$ 含量指示了湖泊生物量的变化,进而揭示了湖泊的营养度。三者均为高值,碳同位素甚至全为正值,说明湖泊生物量增大,湖泊富营养化,主要是人类活动作用的结果。

参考文献:

- [1] 张振克,吴瑞金.近300年来岱海流域气候干湿变化与人类活动的湖泊响应[J].首都师范大学学报:自然科学版,2001,22(3):70-76.
- [2] 羊向东,王苏民,沈吉,等.近0.3ka来龙感湖流域人类活动的湖泊环境响应[J].中国科学:D辑,2001,31(12):1031-1038.
- [3] 张振克,吴瑞金,沈吉,等.近1800年来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录[J].湖泊科学,2000,12(4):297-303.
- [4] Wang Su min, Zhang Zhen ke. New progress of lake sediment and environmental changes research in China[J]. Chinese Science Bulletin 1999, 44(19): 1744-1754.
- [5] 张振克,吴瑞金,朱育新,等.云南洱海流域人类活动的湖泊沉积记录分析[J].地理学报,2000,55(1):66-73.
- [6] 吴艳宏,吴瑞金,薛滨,等.13kaBP以来滇池地区古环境演化[J].湖泊科学,1998,10(2):5-9.
- [7] Yu Li zhong, Oldfield F, Wu Yu shu, et al. Paleoenvironmental implication of magnetic measurements on sediment core from

Kunming Basin, Southwest China[J] . Journal of Paleolimnology, 1990(3): 95—111.

[8] Dearing J A, Ekener J K, Happey-wood C M. Recent sediment flux and erosional processes in a Welsh upland lake catchment based on magnetic susceptibility measurements[J] . Quaternary Research, 1998(16): 356—372.

[9] Dearing J A, Flower R J. The magnetic susceptibility of sedimenting material trapped in Lough Neagh, Northern Ireland, and its erosional significance[J] . Limnol Oceanogr, 1982(27): 969—975.

[10] 胡守云, 王苏民, E Appel, 等. 呼伦湖湖泊沉积物磁化率变化的环境磁学机制[J] . 中国科学: D 辑, 1998 28(4): 334—339.

[11] An Z S, Kukla G, Porter *et al.* Magnetic susceptibility evidence of monsoon variation on the Loess Plateau of China during the last 130, 000 Years[J] . Quaternary Research, 1991(36): 29—36

[12] 张世涛, 宋学良, 张子雄, 等. 星云湖表层沉积物矿物组成及其环境意义[J] . 地球科学进展, 2003, 18(6): 928—932.

[13] 刘子亭, 余俊清, 张保华, 等. 烧失量分析在湖泊沉积与环境变化研究中的应用[J] . 盐湖研究, 2006, 14(2): 67—72.

[14] Engstim D. R. *et al.* Chemical stratigraphy of lake sediments as a record of environmental change[M] // Elizabeth Y. H. Lake sediments and environmental history. Leicestershire: Leicester University Press, 1992.

[15] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映[J] . 地理研究, 1998, 17(3): 297—302.

[16] 宋学良, 李杰森, 张子雄, 等. 距今 200 年前昆明地区干旱气候期的发现[J] . 云南地理环境研究, 1998, 10(1): 20—25.

Dianchi Lake Sediment Records of Climate Changes and Humane Activities in the Past 700 Years

CHEN Rong-yan¹, SONG Xue-liang², ZHANG Shi-tao¹, ZHANG Zi-xiong², YANG Wei¹

(1. Faculty of Land Resource Engineering in Kunming University of Science and Technology, Kunming, 650093, China; 2. Yunnan Institute of Geological Sciences, Kunming, 650091, China)

Abstract: Based on ²¹⁰Pb, ¹⁴C chronology and the measurements of mass susceptibility, $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{18}\text{O}$ isotope, grain size, mineral component, calcium carbonate, and organic substances, the climate variation during the past 700 years in the area of Dianchi Lake has been established. It has distinct 200 a periodicity with two high and a low water level. Its climate is warm-dry and cold-wet alternated. The study also shows that the sediment has the information of humane activities. The depositional rate was changed by the dredging of Haikou River in Yuan dynasty. In recent decades, the contaminations of agriculture and industry were put into Dianchi Lake and changed the lakes nutrition, eutrophication gets accelerated.

Key words: Dianchi lake; Lacustrine sediment; Mass susceptibility; Climatic changes; Humane activities