

文章编号: 1000-0550(2008) 02-0294-06

云南属都湖近百年环境演变的湖泊沉积记录 与器测资料对比研究

姚 远^{1,2} 张恩楼¹ 沈 吉¹ 蒋庆丰¹

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008 2. 中国科学院研究生院 北京 100049)

摘 要 通过对属都湖湖心钻取的短岩芯 Esdr1 进行放射性核素 ¹³⁷Cs 和常规的元素分析, 利用 ¹³⁷Cs 建立精确的年代标尺, 开展地球化学记录环境演变与器测资料的对比研究。器测资料表明, 近 50 年来, 该地区主要的气候变化特征: 1958~1983 年, 气候偏冷湿; 1983~2002 年, 气候逐渐暖干化, 这些气候波动特征被沉积岩芯忠实记录。研究表明属都湖沉积物地球化学代用指标指示的气候演化特征与器测资料可很好的对比印证, 属都湖沉积岩芯完整的记录了区域气候变化的信息。

关键词 湖泊沉积 地化指标 环境演变 器测资料

第一作者简介 姚远 男 1977 年出生 博士研究生 湖泊沉积与环境 E-mail yya@niglas.ac.cn

中图分类号 P595 P512.2 **文献标识码** A

0 引言

作为流域地表物质运移的汇, 湖泊沉积物由于蕴含的信息量大、连续性好、分辨率高, 在恢复区域气候和环境演化时具有独特的优势^[1,2]。横断山地区高山湖泊因其多是冰川遗迹湖, 通常具有汇水面积小, 入湖河流短等特点。属都湖位于云南香格里拉县东北部, 海拔 3 705 m, 面积 1.1 km², 最大水深为 8 m, 集水面积约 10 km², 湖区多年平均降水量 970 mm^[3]。属都湖地区构造上处于青藏高原东南缘横断山脉高山峡谷区的北段, 区域气候主要受西南季风控制, 对该湖沉积物进行多环境指标分析, 结合流域与湖泊的耦合研究, 可有效重建该地区全新世以来气候环境的演化历史。通过与本地区已有的气候环境演化记录(如洱海、程海、鹤庆盆地湖泊沉积记录, 石笋记录等)的对比研究, 有效地判识本地区全新世以来西南季风及区域气候演化过程, 对深入理解青藏高原全新世以来的气候演变具有重要的意义^[4,5]。2005 年 3 月, 在属都湖湖心, 钻取长度分别为 25 cm (Esdr1) 和 665 cm (SDH) 的两根岩芯用于开展该地区全新世以来的环境演变研究(图 1)。

湖泊沉积过程受控于区域地貌特征、人类活动和气候变化等众多因素的影响。而人类活动的影响可造成自然沉积过程扰乱, 从而给沉积记录的判识带来

困难。正是基于这一点, 本文以短岩心 Esdr1 沉积物为研究对象, 利用核素 ¹³⁷Cs 建立年代标尺, 地球化学指标恢复属都湖地区近代环境演化历史, 通过与器测资料的对比印证, 对属都湖沉积物能否忠实记录气候变化和人类活动的信息进行检验评价, 为下一步开展长岩芯 SDH 多环境指标的研究工作奠定良好的基础。

1 器测资料记录的区域气候特征

中甸气象站, 距离湖区约 30 km, 其气象观测数据可以作为流域气候的参考。收集该气象站 1958 年建站到 2002 年的年降水、温度、相对湿度、日照时数、风速等数据。年蒸发量通过公式计算。蒸发是一个复杂的物理过程, 蒸发量的大小受蒸发面上太阳辐射、空气湿度、温度和风速众多因素的影响。计算水体蒸发量的公式很多, 但目前应用较多的当属彭曼(Penman)公式。然而彭曼公式也具有地区性特点, 实际应用时必须对公式中的参数进行地区性的修正^[6]。经典的彭曼公式中的一些参数是在英国特定的海洋性气候条件下确定的。云南属于典型的低纬高原季风气候, 对参数要做相应的调整。本文采用的是增加海拔高度(*h*)的彭曼修正式^[7]。

中甸气象站气象资料显示(图 2): 1958~2002 年的年均降水量为 640 mm, 1958~1983 年间降水量

¹ 国家自然科学基金重点项目(批准号: 40334038)及国家自然科学基金(批准号: 40572077)联合资助。

收稿日期: 2007-04-17 收修改稿日期: 2007-07-27

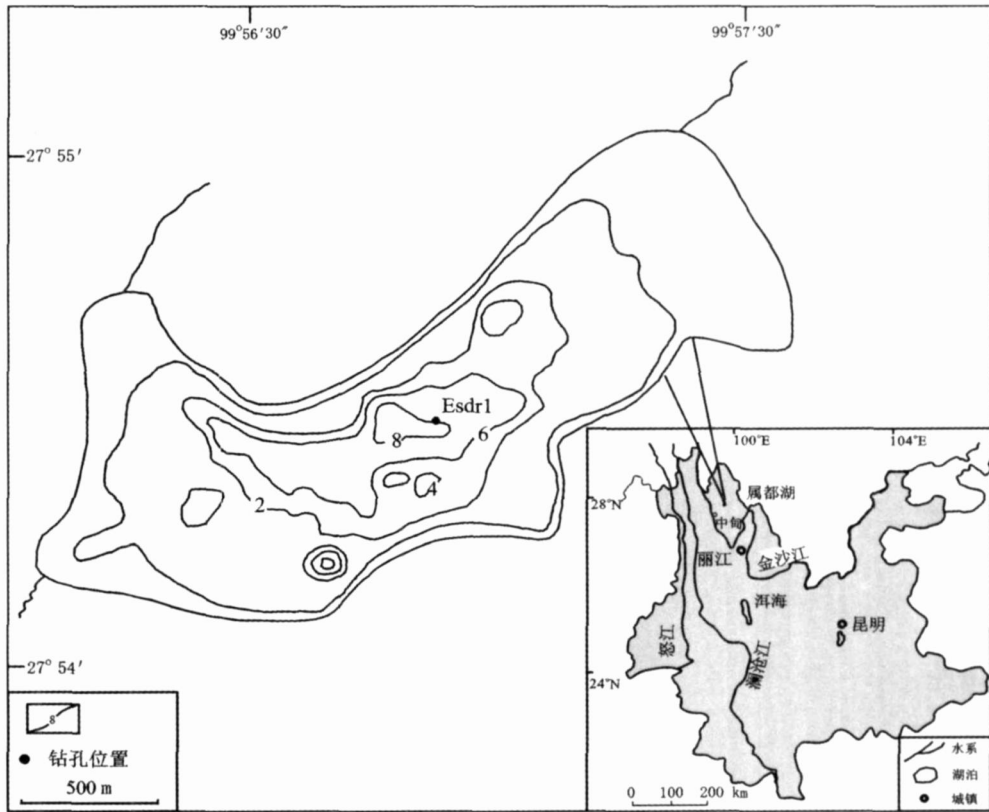


图 1 属都湖地理位置及钻孔位置图

Fig. 1 The location of the Shudu Hai within the Yunnan province and the sampling sites

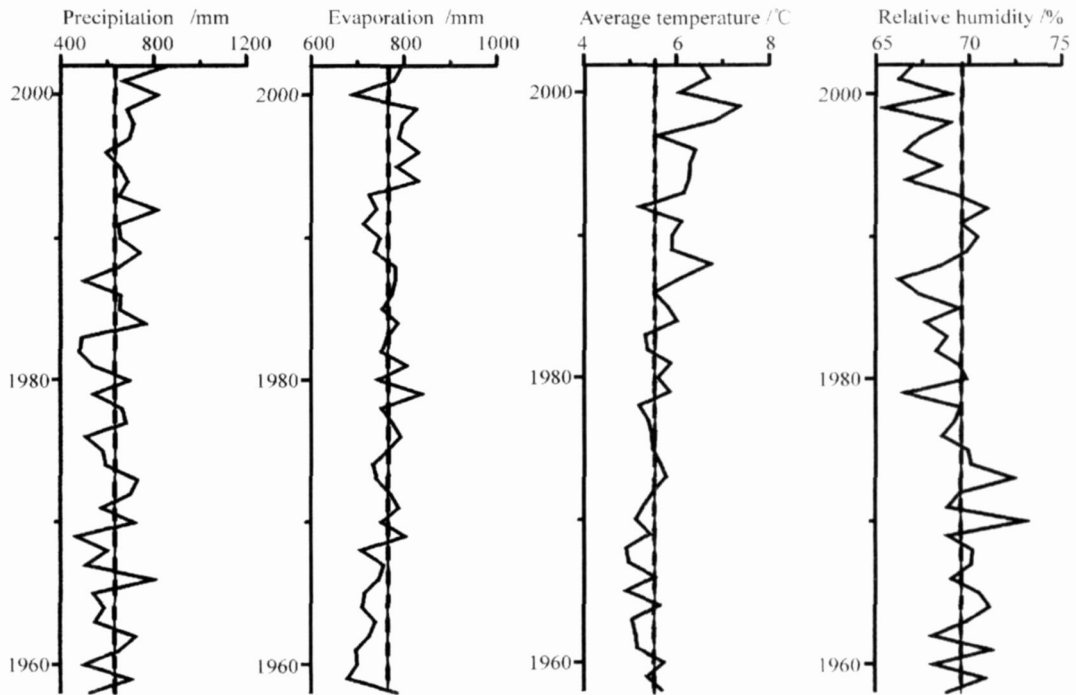


图 2 1958 ~ 2002 年中甸地区降水量、蒸发量、温度和相对湿度变化特征

Fig. 2 Precipitation, evaporation, temperature and relative humidity variations in the region of Zhongdian during 1958 ~ 2002

波动变化, 1983年以后, 年降水量逐渐增加; 1958~2002年的年平均温度为 5.72°C , 年均温度逐渐上升。1958~2002年平均相对湿度总体逐渐减小。总体而言, 在过去的近 50年中, 中甸地区气候经历了开始的相对冷湿到后期逐渐变得暖干。

2 属都湖 Esdr1 岩芯记录的区域气候变化

2.1 样品分析

^{137}Cs 测定步骤: 干样 3~5 g 研磨至 100 目, 采用美国 EG & G Ortec 公司生产的高纯锗井型 γ 谱仪测定。低环境本底通过 110 mm 厚铅块、2 mm 厚铜板和 5 mm 厚有机玻璃组成的全封闭屏蔽室保证, 用中国原子能科学院提供的标准体源标定。

常量元素的测定步骤: 样品冷冻干燥后, 研磨过 100 目筛, 在 $\text{HCl}-\text{HNO}_3-\text{HF}$ 微波消解系统中反应, 最后将溶液定容至 25 mL 用 ICP-AES 方法测定。实验均在中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊沉积与环境开放实验室完成。

2.2 年代标尺建立

进行高分辨率的环境演变研究, 精确可靠的定年是基础。对于短时间尺度的环境变化研究而言, 放射性核素定年发挥了极其重要的作用, 而 ^{137}Cs 作为人为核扩散散落的放射性核素, 广泛应用于短时间尺度上的湖泊现代沉积计年。以人为活动释放后通过大气扩散而散落并在沉积物垂直剖面中蓄积核素 ^{137}Cs 比活度峰的位置作为时标^[8]。

虽然 ^{137}Cs 散落在全球有着类似的时间分布序列, 但各地散落的强度却有明显差异^[9, 10]。已有研究表明, 在我国湖泊沉积岩芯的 ^{137}Cs 剖面一般可以给出三个明显的年代标志, 即 1952 年、1963 年和 1986 年。而来源于切尔诺贝利事故产生的峰值, 即 1986 年时标, 在我国北部明显较南方易辨别^[11~14]。云贵地区的很多湖泊沉积物还可识别出 1975 年的辅助时标^[8, 15]。

图 3 为 Esdr1 孔 ^{137}Cs 比活度剖面图, 最底部开始出现 ^{137}Cs 蓄积的 18.25 cm 应为核试验开始的 1952 年; 而在深度为 15.5 cm 左右, 由于沉积后的核素迁移, ^{137}Cs 出现了多个峰值, 选取比活度最高的 15.25 cm 对应 1963 年的核试验高峰期; 12.75 cm 对应 1975 年核试验; 10.25 cm 的峰值对应 1986 年的切尔诺贝利核泄漏事件。沉积年代采用内插外推法, 岩芯底部对应于 20 世纪 20 年代末。从图 3 可以看出,

1952~1986 年, 沉积速率比较稳定, 1986 年以后湖泊沉积速率明显加快。器测资料显示 80 年代后期中甸地区年降水量增加, 加之人类活动增强, 流域植被遭破坏, 更多的泥沙被携带入湖; 同时出口处修建的水坝使得湖泊中更多的悬浮物在湖泊中沉积下来, 这应是 80 年代后期湖泊沉积速率明显加快的原因。

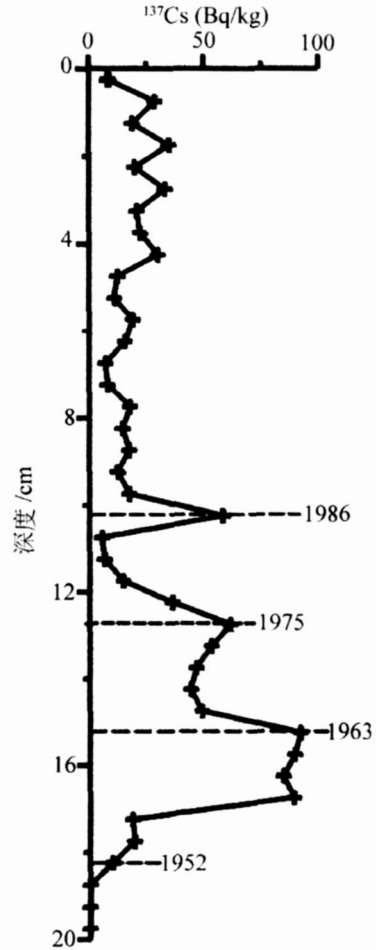


图 3 属都湖岩芯 Esdr1 ^{137}Cs 垂直分布图

Fig 3 Dating result of ^{137}Cs in Shudu Hai Esdr1 core

2.3 代用指标的环境意义

Fe/Mn 比值对环境的指示意义是基于其对不同氧化—还原条件的敏感性。 Fe 、 Mn 元素性质表明 Fe^{2+} 更易被氧化, 而 Mn^{2+} 的氢氧化物比 Fe 的氧化物更易于被还原。通常浅水环境中, 氧气充足, Fe 的主要存在形式为 $[\text{Fe}(\text{OH})]^{2+}$, 在缺氧或氧气不充足的深水条件下, 铁以 Fe^{2+} 形式为主。氧化—还原界面是一个以氧化还原化学指标作判据的化学界面, 为湖泊环境系统中一个空间位置非稳定的界面。有机质的生物氧化作用是一个决定性因素。微生物参与的

氧化作用控制着沉积物—水界面物质转换和循环,影响着氧化—还原界面中的消化—反消化作用和铁—锰循环过程的季节性变化^[16]。流域土壤中的 Fe、Mn 迁移能力相似,湖泊沉积物中的 Fe/Mn 比值变化取决于沉积环境。当水体为不利于氧化的环境时, Mn 易被消耗, Fe/Mn 比值较高;当水体为氧化条件强的环境时, Fe 易被氧化, Fe/Mn 比值较低。通常湖泊水位深,沉积物—水界面处氧化弱;水位较浅,沉积物—水界面处氧化强。因此 Fe/Mn 比值可以用来指示湖泊水深变化^[17]。

在岩石风化过程中, Ti、Al 属于比较稳定的惰性元素, Al 主要以铝硅酸盐矿物及其风化产物存在, Ti 风化后难以形成可溶性化合物,两者一般都在残余相(风化产物中)富集,以碎屑矿物形式被搬运。在气候湿润期,径流相对发育,被冲蚀进入湖泊中的碎屑物增加,沉积物中的 Al、Ti 含量上升;气候干燥期,流域径流不发育,相应冲蚀入湖沉积的碎屑物较少,沉积物中的 Al、Ti 含量低,因此沉积物中的 Ti 和 Al 含量可以间接指示区域降水变化^[18~20]。

(CaO + K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ 比值反映了活性组分与惰性组分之间的关系。在干旱气候条件下,流域地表径流贫乏,惰性组分 Al₂O₃ 难以被径流带入湖区沉积,而活性组分 (CaO, K₂O, Na₂O) 仍然可以化学侵蚀的形式呈离子、胶体状态迁移至湖泊,在水体相对萎缩的环境下,沉淀至水体底部而相对富集,导致沉积物 (CaO + K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ 比值增大。反之,在

湿润气候条件下,流域地表径流发育,惰性组分 Al₂O₃ 以碎屑状态被冲刷入湖沉积,由于湖泊处于相对扩张期,蒸发作用较弱,水体相对淡化,易溶盐离子 Ca、K、Na 等多以游离态存在于水体中,因而沉积物 (CaO + K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ 比值减小。因此沉积物 (CaO + K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ 比值可有效指示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^[21~23]。

2.4 地化指标记录的气候变化特征

上述的环境指标对气候波动敏感,指示意义明确,综合分析各指标指示的环境信息,可将 Esdr1 剖面分为 3 个阶段(图 4):

1 25~18.5 cm (1930~1952 年) 该阶段 Al 和 Ti 的含量为剖面的最高值阶段,指示流域降水丰富,径流发育,较多风化残留的碎屑物被带入湖泊; (CaO + K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ 比值为剖面的最低值,反映了流域湿润的气候特征。Fe/Mn 比值在平均值附近波动,变化很小。由于该阶段属都湖为外流湖泊,在湖区西南有出口水体外流,湖泊水深和面积不会发生大的变化,因此 Fe/Mn 比值较稳定。该阶段应是近 80 年来气候最湿润的时期。

2 18.5~10.5 cm (1952~1985 年) 沉积物中 Al 和 Ti 含量在该阶段开始时有显著降低,后缓慢减小,反映流域降水量逐渐减少, (CaO + K₂O + Na₂O) / Al₂O₃ 比值在平均值附近变化,处于整个剖面的相对

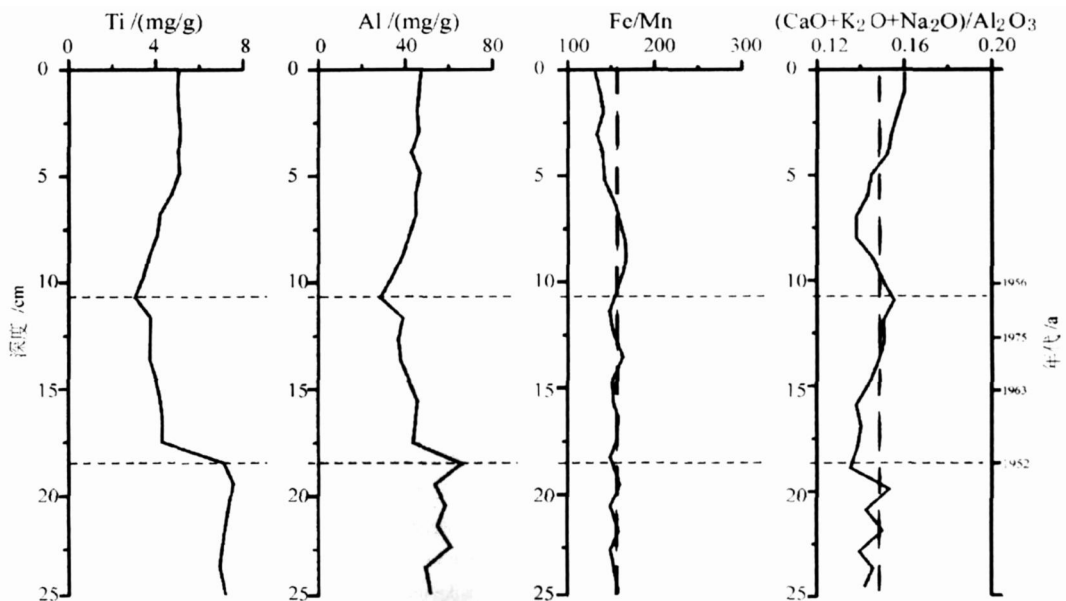


图 4 属都湖沉积物元素地球化学分布特征

Fig. 4. Curves of the climate indicator in sediments in Core Esdr1

3 10 5~0 cm (1985~2005年)沉积物中 Al和 Ti含量升高,相比前期降水量应有所增加。80年代中期在湖泊出口处修建了堤坝,由开口湖变为封闭湖,水深增加湖面扩张,这应是开始阶段 Fe/Mn比值相对较高和 $(CaO + K_2O + Na_2O) / Al_2O_3$ 低值的原因。后期随着湖泊在降水和蒸发间达到新的平衡, Fe/Mn比值有显著降低,指示蒸发量大有效降水减少,湖面下降。 $(CaO + K_2O + Na_2O) / Al_2O_3$ 比值也有明显的增大,流域气候干燥。总体而言,虽然该阶段降水略有增加,但温度快速上升对气候影响更大,区域气候向暖干化方向发展。

3 地化指标恢复的气候变化与器测资料的对比印证

图2显示的是中甸气象站记录的该地区1958~2002年降水量、温度、相对湿度变化曲线。1958~1983年,年平均温度低于6℃,年降水在600~800mm之间变化。通过彭曼公式计算得出的湖面蒸发量为低值期,相对湿度高,空气干燥,主要气候特征为冷湿。1983~2002年,降水量有所增加,但由于温度上升湖泊蒸发量也有明显增加,相对湿度低,气候逐渐向暖干化发展。在过去的近50年,中甸地区气候总体上经历了相对冷湿向逐渐暖干化的发展过程。

气象资料显示,1982年、1983年年降水量分别为483.2mm、490mm,为1958~2002年年降水量的低值阶段。1982年和1983年年均温度为5.31℃和5.99℃,温度较低,1983年以后,降水和温度都有显著上升。地化指标曲线在10.5cm(1985年)也有突变,由于湖泊沉积对气候变化的响应有一定程度的滞后,沉积物中Al和Ti含量在10.5cm从减小到逐渐增加,指示的可能正是1983年左右气候大的波动。

通过对沉积物地化指标的分析,可将属都湖地区近80年气候变化历史划分为2个阶段,其中,1958~2005年的气候变化特征总体是由湿润逐渐变为暖干。恢复的气候变化与器测资料记录的环境历史虽然在时间段上略有差异,但总体上都经历了相对湿润—暖干的气候变化历史,属都湖沉积物地化指标恢复的区域气候变化特征与器测资料记录可很好的对比印证。

4 结论

(1) 器测资料表明,近50年来,属都湖地区主要的气候变化特征:1958~1983年,气候相对冷湿;

1983~2002年,气候逐渐向暖干化发展,这些气候波动特征均被沉积岩芯忠实记录。地球化学代用指标指示的气候变化特征与器测资料可很好的对比印证,属都湖沉积物完整的记录了区域气候变化和人类活动的信息,是恢复该地区古气候变化的良好载体。

(2) Fe/Mn、Al/Ti和 $(CaO + K_2O + Na_2O) / Al_2O_3$ 等环境代用指标对气候变迁敏感,分别指示了湖泊水深、流域降水和气候干湿变化等信息,是恢复过去气候变化良好的代用指标。

参考文献 (References)

- 1 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):583-584[Wang Suning, Zhang Zhenke. New progress of study in environmental evolution and lacustrine sedimentation China[J]. Chinese Science Bulletin 1999, 44(6): 579-587]
- 2 Keltz K, 丁仲礼. 湖泊沉积——过去变化的信息库[J]. 第四纪研究,1992,2:138-143[Keltz K, Ding Zhongli. Lacustrine sedimentary-The information of past change[J]. Quaternary Sciences 1992, 2: 138-143]
- 3 段志诚,等. 中甸县志[M]. 昆明:云南民族出版社,1997:80-85 [Duan Zhicheng et al. Zhongdian County Annals[M]. Kunming Yunnan National Press, 1997: 80-85]
- 4 杨建强,崔之久,易朝露. 云南点苍山冰川湖泊沉积物磁化率的影响因素及其环境意义[J]. 第四纪研究,2004,24(5):591-597 [Yang Jianqiang, Cui Zhijiu, Yi Chaolu. The influencing factors and environmental significance of magnetic susceptibility in the glacio-lacustrine sediments on the Diancang Mountain, Yunnan Province[J]. Quaternary Sciences 2004, 24(5): 591-597]
- 5 殷勇,方念乔,王倩. 云南中甸纳帕海湖泊沉积物的磁化率及其环境意义[J]. 地理科学,2002,22(4):413-419 [Yin Yong, Fang Nianqiao, Wang Qian. Magnetic susceptibility of lacustrine sediments and its environmental significance: evidence from Napa Hai Lake, Northwestem Yunnan, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2002, 22(4): 413-419]
- 6 付学功,董晓丽. 彭曼(Penman)公式在河北平原的应用[J]. 河北水利科技,1995,16(2):8-11 [Fu Xuegong, Dong Xiaoli. The application of Penman formula in the Hebei Plain[J]. Hebei Irrigation Technology, 1995, 16(2): 8-11]
- 7 顾本文,戴丛蕊. 云南省水、陆面蒸发量计算方法的初步研究[J]. 中国农业气象,2004,25(2):15-19 [Gu Benwen, Dai Congrui. Preliminary study on method to calculate the evaporation quantity of continental surface[J]. China Agriculture Meteorology, 2004, 25(2): 15-19]
- 8 万国江. 现代沉积年分辨的¹³⁷Cs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 [Wan Guojiang. ¹³⁷Cs Dating by annual distinguish for recent sedimentation samples from Erhai Lake and Hongfeng Lake[J]. Quaternary Sciences 1999, 19(1): 73-80]
- 9 Appleby P G. Radiometric dating of the United Kingdom SWAP sites

- [J]. *Philosophy Royal Society of London* 1990 327: 233-238
- 10 Scott M R, Rotter R J, Salter P F. Transport of fallout plutonium to the ocean by the Mississippi River [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 1985, 75: 321-326
- 11 Donink J D, Burns V, Emert J P. Transport of environmental radionuclides in an alpine watershed [J]. *Earth and Planetary Science Letters* 1987, 84: 165-180
- 12 Appleby P G. Chronostratigraphic techniques in recent sediments [C]// William M L, Smol J P. eds *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments Volume 1: Basin Analysis, Coring and Chronological Techniques*. Kluwer Academic Publishers, 2004: 171-203
- 13 项亮. ^{137}Cs 湖泊沉积年代学方法应用的局限——以 Crawford 湖为例 [J]. *湖泊科学*, 1995, 7(4): 307-313 [Xiang Liang. Limitation of the application of ^{137}Cs linochronology: a case study of ^{137}Cs profile in Crawford lake sediment [J]. *Journal of Lake Sciences* 1995, 7(4): 307-313]
- 14 项亮, 吴瑞金, 吉磊. ^{137}Cs 和 ^{241}Am 在滇池、剑湖沉积孔柱中的蓄积分布及时标意义 [J]. *湖泊科学*, 1996, 8(1): 27-34 [Xiang Liang, Wu Ruijin, Ji Lei. ^{137}Cs and ^{241}Am profiles and dating of sediments from two lakes in Yunnan province, China [J]. *Journal of Lake Sciences* 1996 8(1): 27-34]
- 15 徐经意, 万国江, 王长生, 等. 云南省泸沽湖、洱海现代沉积物中 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 的垂直分布及其计年 [J]. *湖泊科学*, 1999, 11(2): 110-116 [Xu Jingyi, Wan Guojiang, Wang Changsheng et al. Vertical distribution of ^{210}Pb and ^{137}Cs and their dating in recent sediments of Lugu Lake and Erhai Lake, Yunnan Province [J]. *Journal of Lake Sciences* 1999 11(2): 110-116]
- 16 汪福顺, 刘丛强, 梁小兵, 等. 湖泊沉积物中微量金属二次迁移过程中微生物作用的实验研究 [J]. *湖泊科学*, 2006, 18(1): 49-56 [Wang Fushun, Liu Chongqiang, Liang Xiaobing et al. Impact on the remobilization of trace metals in lake sediments by micro-organisms [J]. *Journal of Lake Sciences* 2006 18(1): 49-56]
- 17 朱立平, 王君波, 陈玲, 等. 藏南沉错湖泊沉积多指标揭示的 2 万年以来环境变化 [J]. *地理学报*, 2004, 59(4): 514-524 [Zhu Liping, Wang Junbo, Chen Ling et al. 20 000-year environment change reflected by multistatist lake sediments in Chencuo, Southern Tibet [J]. *Acta Geographica Sinica* 2004, 59(4): 514-524]
- 18 Weaver C E. Postassium, Illite and the Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1967, 31(11): 2181-2196
- 19 Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical process affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 1980, 44(11): 1659-1666
- 20 杨兢红, 王颖, 张振克, 等. 苏北平原 2.58M a 以来的海陆环境演变历史——宝应钻孔沉积物的常量元素记录 [J]. *第四纪研究*, 2006 26(3) 340-351 [Yang Jinghong, Wang Ying, Zhang Zhenke et al. Major element records of land-sea interaction and evolution in the past 2.58M a from the Baoying bore hole sediments, northern Jiangsu Plain, China [J]. *Quaternary Sciences* 2006 26(3): 340-351]
- 21 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海近代气候变化的化学记录 [J]. *地理科学*, 2000 20(1): 83-87 [Chen Jing'an, Wan Guojiang, Chen Zhenlou et al. Recent climatic change and its chemical records in lake Erhai. *Scientia Geographica Sinica*, 2000 20(1): 83-87]
- 22 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 [Wang Sumin, Zhang Zhenke. New progress in the research of lake sediments and environmental evolution in China [J]. *Chinese Sciences Bulletin*, 1999, 44(6): 579-587]
- 23 吴艳宏, 李世杰, 夏威夷. 可可西里苟仁错湖泊沉积物元素地球化学特征及其环境意义 [J]. *地球科学与环境学报*, 2004 26(3): 64-67 [Wu Yanhong, Li Shijie, Xiaweilan. Element geochemistry of lake sediment from Gourenco Lake, Kekexili Qinghai-Xizang plateau and its significance for climate variation [J]. *Journal of Earth Sciences and Environment* 2004 26(3): 64-67]

Study on the Climate Evolution Comparing Meteorological Observation and Sediment Core During the Past 80 Years in Shudu Lake, Yunnan Province

YAO Yuan^{1, 2} ZHANG Er-lou¹ SHEN Ji¹ JIANG Qing-feng¹

(¹ Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008;

² Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)

Abstract A short sediment core Esdr1 from Shudu lake has been analysed of geochemistry elements and radionuclides. Accurate sediment chronology was established by ^{137}Cs . Meteorological observation records reveal that climate changes experience two stages during past 44 years in the region of Shudu: a cold/wet stage during 1958~1983 A.D., a warm/dry stage between 1983 and 2002. Climate changes reconstructed by Esdr1 core geochemical proxies are consistent with Meteorological observation records. Sediment in Shudu Hai documented in detail Regional climate changes and human activities which mean that the sediment from this lake could be the suitable archive for environment changes reconstruction in this region.

Key words lake sediments, geochemical proxies, environmental changes, meteorological observation