文章编号:1000-0550(2014)04-0669-08

青藏高原纳木错湖近 150 年来气候变化的湖泊沉积记录^①

李 清^{1,2} 康世昌² 张强弓² 黄 杰² 郭军明² 王 康² 王建力¹ (1.西南大学地理科学学院 重庆 400715;2.中国科学院青藏高原环境变化与地表过程重点实验室 北京 100085)

摘 要 高海拔地区的纳木错湖是研究过去气候环境变化的理想场所。本文结合附近气象站点实测数据与纳木错浅湖芯的研究结果,筛选出适用的气候环境代用指标,并对当地过去近 150 年来的气候变化记录进行重建。其结果显示,19 世纪 50 年代至 20 世纪,以偏暖湿为主;20 世纪初至 20 世纪 50 年代,该阶段气候总体上呈现出冷干特点,并从 20 世纪 20 年代左右逐渐向暖湿气候过渡;20 世纪中叶至 2005 年,这期间气候有一定波动,但整体上以气温上升为主要趋势,在降水略减的情况下湖泊并未出现萎缩,表明气温升高可能导致冰川消融加快从而对入湖径流有一定补给作用。

关键词 青藏高原 纳木错 湖泊沉积 气候变化

第一作者简介 李 清 女 1981 年出生 博士 讲师 古环境和古气候变化 E-mail:liq1013@ swu.edu.cn

通讯作者 康世昌 男 研究员 E-mail: shichang.kang@itpcas.ac.cn

中图分类号 P512.2 文献标识码 A

湖泊是连接大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的纽 带,湖泊沉积物对环境的记录具有连续性、全面性和 高分辨率的特点,是研究过去环境变化的重要手段之 一[1]。青藏高原湖泊众多,是地球上海拔最高、数量 最多、面积最大的高原湖泊群[2],而高原封闭半封闭 湖泊是气候和环境演化的敏感指示器,在恢复和重塑 各种时间尺度(千年、百年、十年)的气候和环境演化 序列上,具有其他自然历史记录无法替代的优势。近 年来,利用青藏高原湖泊沉积记录研究古气候环境的 演变正在迅速发展,研究范围涉及高原的大部分地 区,主要包括青海湖[3~7],高原东部若尔盖盆地[8-10], 西昆仑山—喀喇昆仑山地区[11~15], 羌塘高原[16~18]及 藏南地区[19~25]等。但由于高原面积广大且气候影响 因素复杂,使得高原面上不同区域之间的气候变化特 征不尽相同。而高原南部地区主要受西南季风的影 响与其他地区的气候特点差异较大,并且高原南部由 于海拔较高,气候环境恶劣,采样困难等因素的制约, 其研究的深度和广度远不如高原其他地区,因此对高 原南部地区湖泊沉积记录的古气候变化研究具有重 要意义。

从现有的研究看来,受制于沉积物采样精度与定年数据的分辨率和可靠性,过去青藏高原湖泊沉积记录的研究主要以中长时间尺度的研究为主,注重重大

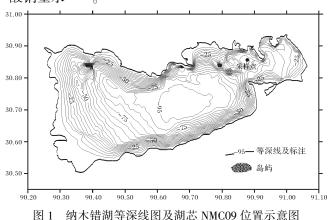
气候变化事件和阶段的气候环境特征的重建和分析^[26],而短时间尺度高分辨的研究相对不足。近年来随着²¹⁰Pb,¹³⁷Cs 测年技术在湖泊沉积记录中的应用和发展^[27~30],高分辨率的湖泊沉积(特别是近几百年来)研究也开始得以突破^[31~34]。为此,本研究根据青藏高原中南部纳木错湖泊沉积记录,通过沉积物精确定年和环境代用指标的分析,重建研究区过去几百年来气候环境变化,弥补了高原南部地区短时间尺度气候变化序列的缺乏,对拓展青藏高原地区过去气候环境变化研究具有重要的科学价值。

1 研究区概况

纳木错湖(30°30′~30°56′N,90°16′~91°03′E)位于青藏高原中南部,属于藏北南羌塘高原湖盆区,目前为封闭湖盆^[2,20]。纳木错是喜马拉雅构造运动拗陷而成,湖面海拔4718m,东西长78.16km,南北宽24.19km,面积为1961.15km²,已测到的最大水深为95m^[35](图1)。整个流域面积10600km²,补给系数5.53^[36],湖水主要依赖地表径流和湖面降水补给,总计有超过60条河流汇入湖泊^[37],这些河流大部分位于湖泊的西部和南部,而主要入湖河流为波曲、昂曲、测曲等。其南部是念青唐古拉山脉,平均海拔约5500m,众多现代冰川发育且普遍面积较小,

①国家自然科学基金项目(批准号:41001113, 41225002,41171398)、中央高校基金(编号:XDJK2012B004)与博士基金科研(编号:SWU111058)联合资助

冰川融水流经短距离的山前地带呈辫梳状直接注入湖泊^[38]。北侧和西北侧为高原内部起伏平缓的低山丘陵区,平均海拔约为 5 000 m^[21]。出露的基岩主要是前中生界变质岩、石灰岩、花岗岩和中新生界火山岩等^[39]。湖区属半湿润向半干旱过渡型气候,区域植被类型属于高寒草原和荒漠草原^[40]。湖水微咸偏碱,矿化度为 1.6~1.8 g/L,pH 值为 9.4~9.5,属重碳酸钠型水^[2,41]。



(据王君波,2009)
Fig.1 The isobath of Nam Co Lake and location of NMC09 Core

2 材料与方法

2.1 样品采集及定年

本研究于 2009 年 5 月利用活塞采样器在纳木错湖获取一支长度约为 20 cm 的浅湖芯 NMC09 孔样品。湖芯采样点位于纳木错湖中部靠东北岸(图 1),水深约 60 m,湖盆底部坡度较缓。以黄色的粉砂和黏土为主。现场以 0.5 cm 间隔进行分样,共获得样品 40 个,保存于塑封袋内运回实验室冷藏。

为了高精度地从湖泊沉积物中提取环境信息,首先需要精确地测定沉积物的时序特征,从而建立湖泊沉积物所记录的过去环境信息的年谱关系。本孔采用²¹⁰Pb方法测定其沉积速率,湖泊沉积物年代测定在中国科学院青藏高原研究所环境变化与地表过程重点实验室完成,所用分析仪器为美国EG&G Ortec公司生产的高纯锗伽马谱仪(HPGe, ORTEC-GWL),每个样品测量时间为40000 s,测量之前将样品置于封闭容器中进行两周以上的放射性平衡。

2.2 环境代用指标

粒度分析用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer 2000 型激光粒度仪完成,测量之前对样品进行去除有机质及碳酸盐胶结的处理,仪器重复测量误差小于

3%;总有机碳(TOC)和无机碳(IC)分析利用日本岛津公司 Shimadzu TOC-VCPH 测量,分析误差小于3%;微量元素含量利用美国 Thermo-Elemental 公司的 X-7型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定,仪器的相对标准偏差(RSD)/小于3%,实际分析误差(含前处理环节)一般小于5%,以上测试在中国科学院青藏高原研究环境变化与地表过程重点实验室完成。

3 结果分析

3.1 沉积物定年

本文对岩芯 NMC09 孔进行²¹⁰ Pb 精确测年,其结果显示过剩²¹⁰ Pb 比活度(²¹⁰ Pbex)随深度的变化呈现出明显的指数衰减趋势,至 15 cm 深度以下,²¹⁰ Pb 总强度和²²⁶ Ra 强度平衡,过剩²¹⁰ Pb 趋于零,不再具有定年意义。而利用²¹⁰ Pbex 强度衰变规律计算沉积物年龄一般有 2 种模型^[42,43], CRS (Constant Rate of ²¹⁰ Pb Supply,恒定补给速率)和 CIC (Constant Initial Concentration,恒定初始浓度)两种模式,其中 CRS 模型由于考虑了沉积物的压实作用而受到广泛使用。因此,本文利用 CRS 模型计算 NMC09 孔湖芯上部 15 cm左右的沉积时段约为 1850~2005 年,共计 155年,平均沉积速率约为 0.12 cm/a。

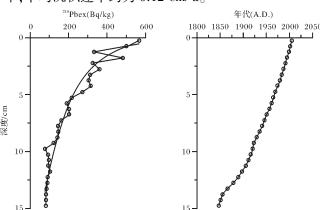


图 2 纳木错 NMC09 湖芯²¹⁰Pbex(a)和年代(b)—深度图 Fig.2 Variations of ²¹⁰Pbex and sedimentation rate in NMC09 Core of Nam Co Lake

3.2 总有机碳含量和粒度

3.2.1 结果分析

纳木错 NMC09 孔的总有机碳含量(TOC,%)总体偏低(≤3%),以距顶部 10 cm 左右为临界点,在此之下的 TOC 呈缓慢下降趋势,而上半部则表现出明显的抬升趋势(图3)。粒度主要由粉砂(4~64μm)

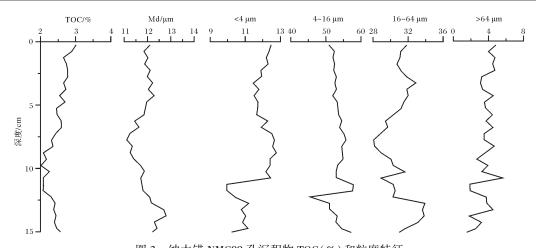


图 3 纳木错 NMC09 孔沉积物 TOC(%)和粒度特征

Fig.3 The grain size and TOC(%) of NMC09 Core in Nam Co Lake

组成,细颗粒($4\sim16~\mu m$)约占 50%以上,在整个细颗粒剖面中颗粒含量在 11~cm 左右有一定波动,而以上则变化较为平稳,且细粒物质($<16~\mu m$)在 11~cm 处出现陡增现象,至 13.5~cm 左右黏粒含量为剖面峰值(图 3)。相应地,粗颗粒含量在剖面中部(7.75~cm)含量偏低,平均粒径(M_Z)偏细。而 7.75~cm 以上平均粒径开始变粗,对应粗颗粒($16\sim64~\mu m$)物质含量的增加,其中在 4.25~cm 层位出现小峰值点,随后则略有降低。大于 $64~\mu m$ 的粗颗粒在整个剖面中含量变化没有明显的升高或降低趋势,在 10~cm 以下波动较大,而以上则较为平缓。

3.2.2 环境指示意义

总有机碳含量(TOC)反映了湖泊沉积物中有机 碳的含量,代表湖泊生产力的大小和流域内植被的发 育状况,尽管受到内源、外源和沉积后分解等因素的 影响,依然是恢复湖泊古气候波动的重要指标之 一[44]。作为处于寒冷气候区的湖泊来说,气温应是 影响生物生长的主导因素,有机碳的含量一定程度上 可以反映气温的变化,即沉积物中总有机碳高值对应 暖期,低值对应冷期[4]。对于湖泊沉积物而言,粒度 的环境指示意义较为复杂,在不同的时间尺度内、不 同的湖区环境、不同的湖泊补给条件以及不同的气候 条件下沉积物粒度受制于不同的影响因素。对于一 个钻孔点来讲,湖泊沉积物粒度大小与流域物质来源 和河流搬运能力有关,并间接地指示流域径流补给情 况^[45]。NMC09 孔位置距湖东北岸较近,但水深较大 (60 m),湖底坡降较大,入湖碎屑物质经短途搬运即 可到达钻孔点,其沉积物粒度的变化可以反映入湖河 流水动力条件和水量变化,因此粒度的变化间接反映

湖泊补给状况(如降水量、冰雪融水等),即粒度的增大反映降水量的增加或气温升高而造成的冰融水的增加。

为了进一步明确 TOC 和粒度在该区域的气候和环境意义,本文选择与邻近的气象站资料建立对应关系进行验证。纳木错湖处于青藏高原中南部,最为邻近的气象站点为班戈和当雄气象站,其中班戈县与纳木错同处羌塘高原地区,气候特征较为接近,因此本研究选取班戈气象站观测资料来进行对比。气温和降水是最主要的气候要素,因此将沉积环境序列TOC 值与班戈气象站近50 年的年均温资料进行对比发现,代表冷暖变化的 TOC 指标与气温变化的相关性较好,两者整体上都呈现出一致的递增趋势,而且年均温值分别在1963,1983 年和1997 年出现三次明显的骤降(图4),TOC值也相应减小,与气温变化呈

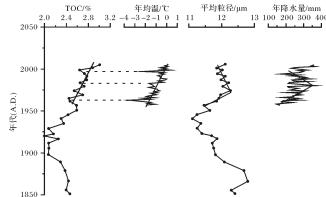


图 4 纳木错 NMC09 孔 TOC 和平均粒度特征与班戈 气象站气温及降水变化对比(1957~2005 年)

Fig.4 Comparison of TOC and medium grain size of NMC09 Core and air temperature, precipitation in Banga station (from 1957 to 2005)

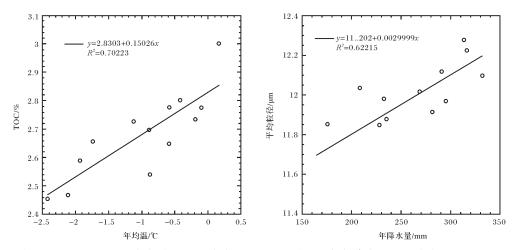


图 5 纳木错 NMC09 孔 TOC 与年均温的相关关系(左)和平均粒径与年降水量的相关关系(1957~2005 年) Fig.5 The correlation of TOC values of NMC09 Core and average annual temperature(left), and the correlation of medium grain size of NMC09 Core and annual precipitation(right), (from 1957 to 2005)

现较好的正相关关系(R^2 =0.70,图 5)。同时也体现出 1910~1960 年的 50 年间气温升高的特点,与中国物候现象也是一致的^[46]。平均粒度是沉积物粒度分布中最主要的参数之一,而代表径流量大小的粒度指标与降水量的有一定相关性,表明采样点处沉积水动力条件很大程度上是受大气降水补给的影响,它们均反映出了 20 世纪 50 年代末期至 70 年代初期的湿润程度不断增强以及 90 年代中后期以来的干旱状况(图 4),气候变化的这种记录在中国东部地区的文献与器测资料记载中也有反映。通过相关性分析也发现(图 5),平均粒径与班戈气象站年均降水量同样呈现出正相关关系(R^2 =0.62)。因此,上述选取的气候代用指标在本地区气候环境恢复研究中具有明确的指示意义。

湖泊沉积物中元素含量的变化受很多环境因素的影响,对环境变化的响应较为复杂,部分元素比值常被作为环境变化的代用指标。Sr/Ba 的变化是基于它们的溶解能力与水体体积的关系,干旱地区的水体中,Sr 在水中较强的溶解力决定其有较大的浓度变幅,而 Ba²+的浓度却较强地依赖于环境状况的改变,水体体积减小常常引起 SO¾ 浓度升高,导致 Ba²+与 SO¾ 结合形成 BaSO₄絮凝沉淀的机率增大,水中游离的 Ba²+成分降低,结果造成沉积物中的 Sr/Ba 升高[11]。因此 Sr/Ba 的高值代表湖泊收缩,水体体积减小;反之当水体体积扩大时,Sr/Ba 值降低。

3.3 近 150 年来纳木错湖区气候变化特征及对比 根据纳木错湖沉积湖芯的沉积年代序列,综合分

析 TOC、粒度及地球化学元素比值等多项环境代用指标,将该湖区近 150 年来的气候变化过程大致分为以下几个阶段(图 6):

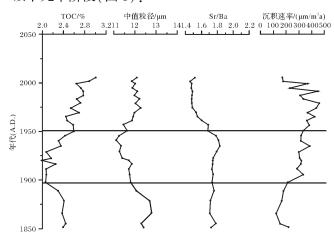


图 6 纳木错 NMC09 孔多种代用指标的对比分析 Fig.6 Comparison of multi proxies in NMC09 Core

(1) A.D. 1850~1900:该时段内 TOC 含量相对偏高,平均含量在 2.26%左右,且呈现明显的持续降低趋势,在 1900 年左右达到本时段的最低值 2.08%,表明该阶段总体气温偏暖但开始出现温度降低趋势。而中值粒径的变化与 TOC 略有不同,1850~1900 年间出现粒径增大趋势,并在 1870 年左右达到最大值,代表该时期内降水量有所增加或是气候温暖使得冰川融水增多,随后呈现的持续降低与 TOC 变化相似,表明气温和降水量都同步下降,植被发育较差,气候持续进入较为干冷的时期。而该时段内的 Sr/Ba 比

值变化平稳,没有明显指示气候干湿变化的迹象,指示湖泊水体体积并没发生太大改变,说明气候变化的幅度对地球化学元素比值的影响不大。而该阶段沉积速率总体上比较缓慢,可能是由于下部沉积物固结压实作用而造成的,而其表现出的略有增长趋势可能反映了地表径流增大导致携带的物质也随之增多。虽然该阶段内地球化学元素变化趋势与 TOC、粒度变化有所不同,该时期气候总的来说以偏暖湿为主,并表现出向冷干气候转化的特征。

- (2) A.D. 1900~1950:TOC 含量偏低但后期开始 出现迅速上升的趋势,平均值为 2.23%,而中值粒径 值同样处于整个阶段的谷底,均值为 11.50 µm 左右, 与 TOC 变化比较类似,暗示该时段内水热同步的气 候特征,只是 TOC 含量的最低值出现于 1920 年左 右,而粒度的低值稍有滞后,出现在1940年左右。该 阶段气温和降水虽然整体上较低,但已开始表现出气 候回暖趋势。Sr/Ba 值变化在 1920 年之前保持稳 定,而之后略有偏高,暗示水体体积稍有萎缩,与该阶 段内粒度低值所指示的环境意义基本吻合。而沉积 速率的略微偏高则表明沉积物质增多可能是由于气 候回暖引起冰川融化而带来了大量细颗粒物质在此 沉积。综合来讲,该时期内气候总体处于一个较为干 冷的时期,但气温开始反弹,降水变化略有滞后,1920 ~1940年左右为气候变化的转折点,意味着小冰期的 结束,气候由干冷向暖湿开始转变。
- (3) A.D. 1950~2005: TOC 含量和中值粒径值在 该时期内存在一定的波动,TOC 值表现为震荡上升 趋势,TOC 含量均值在 2.69%左右,处于整个时段的 最高值时期,表明气温急剧增加的过程与全球变暖的 大背景一致。而中值粒径也迅速增加至 1980 年左右 的持续震荡,然后略有偏低趋势,其均值为 11.97 μm 左右,指示该地区80年代之前降水充沛,而后期粒度 指标指示的水动力变化显示地表流水略有减弱,但相 对(2)阶段而言,降水量仍有所增加。因此该时段内 气候已进入一个相对暖湿的时期,但气温的增加趋势 比降水更为强烈。Sr/Ba 值与中值粒径呈反向变化, 先降低随后趋于平缓,表明湖区水体体积先增加并一 直保持较高水位,与近30年来遥感及水文资料所反 映的纳木错湖泊水量增加情况基本一致[26]。沉积速 率在该时段内最大,表现出冰消期开始地表流水开始 活跃的特征,入湖径流携带大量的物质沉积,约在80 年代左右达到峰值,随后有一定程度的降低,波动较 为剧烈。据班戈气象站近 50 年来的资料显示,气温

变化呈波动上升趋势,而降水变化较为复杂,在 1980~1995 年之间降水量有所下降,但湖面并没有出现萎缩状态,极有可能是气温升高导致冰川消融加快并对人湖径流进行补给,目前已有大量实测资料显示全球变暖背景下冰川融水增加是引起近年来纳木错湖面迅速扩张的主要原因^[26]。因此以上各环境指标的组合都反映了该时期气候处于气温上升,但降水量保持基本稳定的暖湿阶段,与现代器测资料记录的信息基本相符。

4 小结

本文利用高原中南部纳木错湖所获取的浅湖芯 样品 NMC09 孔,在210 Pb 精确定年和多种指标综合分 析的基础上,结合邻近台站的气象资料,明确湖芯中 各种代用指标在当地的气候指示意义,进而重建过去 短时间尺度青藏高原中南部高分辨率气候和环境变 化历史。纳木错湖泊沉积物中 TOC、粒度和地球化 学元素比值所获得的信息综合反映了湖区近 150 年 来气候干湿冷暖交替和湖面升降的特点,尤其是 1920 年以来,TOC 值一直递增至最大值,尽管其间也 有冷波动,总体上表现出小冰期结束后气候一直趋于 相对变暖的趋势。湖面高度在1950年之前保持相对 稳定状态,而随后 Sr/Ba 比值开始降低,表明有水流 不断注入湖区使得湖面不断上升,形成近150年来的 最高湖面,而在此期间湖区内降水并没有增多反而略 有降低,暗示气温上升可能导致冰川消融加快使得湖 水加深,与现代器测资料记录的信息基本吻合。

参考文献(References)

- 1 吉磊. 中国过去 2000 年湖泊沉积记录的高分辨率研究:现状与问题[J]. 地球科学进展,1995,10(2):169-175[Ji Lei. High-resolution study on lacustrine sedimentary records for past 2000 years in China: Developments and problems [J]. Advances in Earth Science, 1995, 10 (2):169-175]
- 2 王苏明,窦鸿身. 中国湖泊志[M]. 北京: 科学出版社,1998[Wang Suming, Dou Hongshen. Chinese Lakes[M]. Beijing: Science Press, 1998]
- 3 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):地球科学,2004,34(6):582-589[Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto Ryo, et al. A high-resolution climatic change since the Late Glacial Age inferred from multiproxy of sediments in Qinghai Lake [J]. Science China(Seri. D): Earth Sciences, 2004, 34(6):582-589]
- 4 刘兴起,王苏民,沈吉. 青海湖 QH-2000 钻孔沉积物粒度组成的古 气候古环境意义[J]. 湖泊科学,2003,15(2):112-117[Liu Xingqi,

- Wang Sumin, Shen Ji. The grain size of the core QH-2000 in Qinghai Lake and its implication for paleoclimate and paleoenvironment [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(2): 112-117
- 5 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):32-37[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):32-37]
- 6 卢凤艳,安芷生. 青海湖表层沉积物介形虫丰度及其壳体氧同位素的气候环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质,2010,30(5):119-128[Lu Fengyan, An Zhishen. Climatic and environmental significance of ostracod abundance and their shell oxygen isotope from lake Qinghai surface sediments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2010, 30(5):119-128]
- 7 Andrew C G, Hendersona, Jonathan A H, et al. Palaeolimnological evidence for environmental change over the past millennium from Lake Qinghai sediments: A review and future research prospective [J]. Quaternary International, 2009, 194(1/2): 134-147
- 8 蒲阳,张虎才,王永莉,等. 青藏高原冰蚀湖沉积物正构烷烃记录的 气候和环境变化信息: 以希门错为例[J]. 科学通报, 2011, 56 (14):1132-1139[Pu Yang, Zhang Hucai, Wang Yongli, et al. Climatic and environmental implications from n-alkanes in glacially eroded lake sediments in Tibetan Plateau: An example from Ximen Co. [J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(14): 1132-1139]
- 9 Yang P, Nace T, Meyers P A, et al. Paleoclimate changes of the last 1000 yr on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau recorded by elemental, isotopic, and molecular organic matter proxies in sediment from glacial Lake Ximencuo[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2013, 379/380; 39-53
- 10 Dietze E, Wünnemann B, Hartmann K, et al. Early to mid-Holocene lake high-stand sediments at Lake Donggi Cona, northeastern Tibetan Plateau, China [J]. Quaternary Research, 2013, 79(3): 325-336
- 11 朱立平,陈玲,李炳元,等. 西昆仑山南红山湖沉积反映的过去 150 年湖区环境变化[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2001,31 (7):601-607[Zhu Liping, Chen Ling, Li Bingyuan, et al. Environmental changes reflected by the lake sediments of the South Hongshan Lake, Northwest Tibet[J]. Science China(Seri. D): Earth Sciences, 2001, 31(7): 601-607]
- 12 Fontes J Ch, Gasse F, Gilbert E. Holocene environmental changes in Lake Bangong Basin (Western Tibet). Part 1: Chronology and stable isotopes of carbonates of a Holocene lacustrine core [J]. Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology, 1996, 120(1/2): 25-47
- 13 Gasse F, Arnold M, Fontes J Ch, *et al.* A 13000-year climate record from western Tibet [J]. Nature, 1991, 353; 742-745
- 14 Van Campo E, Gasse F. Pollen- and diatom-inferred climatic and hydrological changes in Sumxi Co Basin(Western Tibet) since 13000 yr B.P.[J]. Quaternary Research, 1993, 39(3): 300-313
- Wang R L, Scarpitta S C, Zhang S C, et al. Later Pleistocene/Holocene climate conditions of Qinghai-Xizhang Plateau(Tibet) based on carbon and oxygen stable isotopes of Zabuye Lake sediments [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2002, 203(1): 461-477

16 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[Gu Zhaoyan, Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, *et al.* Lacustrine authigenic deposition record of environment and the sediment recordfrom Siling Co, Xizang(Tibet), China[J]. Quaternary Sciences, 1994, 2:162-174]

第32卷

- 17 Wu Y H, Lückeb A, Jin Z D, et al. Holocene climate development on the central Tibetan Plateau: A sedimentary record from Cuoe Lake [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 234 (2/3/4): 328-340
- 18 陈诗越,王苏民,吴艳宏. 西藏错鄂湖沉积旋回与古环境变迁[J]. 地球学报,2006,27(4):315-322[Chen Shiyue, Wang Sumin, Wu Yanhong. Sedimentary cycles and paleoenvironmental evolution of the Co Ngoin Lake in Tibetan Plateau since Late Cenozoic [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2006, 27(4):315-322]
- 19 羊向东,王苏民,Kameni C,等. 藏南沉错钻孔硅藻组合与湖水古盐度定量恢复[J]. 中国科学(D辑):地球科学,2003,33(2): 163-169[Yang Xiangdong, Wang Sumin, C. Kamenik, et al. Quantitative research on paleosalinity recovery and diatom assemblage in Lake Chen Co, southern Tibet[J]. Science China(Seri. D): Earth Sciences, 2003, 33(2): 163-169]
- 20 朱大岗,孟宪刚,赵希涛,等.西藏纳木错地区第四纪环境演变 [M]. 北京:地质出版社,2004:1-302 [Zhu Dagang, Meng Xiangang, Zhao Xitao, et al. Quaternary Environmental Evolution in Nam Co, Xizang [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2004: 1-302]
- 21 朱立平,王君波,林晓,等. 西藏纳木错深水湖芯反映的 8.4ka 以来气候环境变化[J]. 第四纪研究,2007,27(4):588-597[Zhu Liping, Wang Junbo, Lin Xiao, et al. Environmental changes reflected by core sediments since 8.4ka in Nam Co, Central Tibet of China[J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(4):588-597]
- 22 王利强,易朝路,Brigitta Schütt,等. 青藏高原纳木错湖阶沉积的发生特征及环境指示意义[J]. 沉积学报,2009,27(3):503-510 [Wang Liqiang, Yi Chaolu, Brigitta Schütt, et al. Genetic characteristics and environmental implications of sedimentary deposits of Lake-Nam Co in Tibetan Plateau[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2009, 27(3):503-510]
- 23 吕新苗,朱立平,Mitsugu N, et al. 西藏南部普莫雍错 19 cal ka BP 以来高分辨率环境记录[J]. 科学通报,2011,56(4):2006-2016 [Lü Xinmiao, Zhu Liping, Mitsugu N, et al. A high-resolution environmental change record since 19 cal ka B.P. in Pumoyum Co, southern Tibet[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(4): 2006-2016]
- 24 Wang J B, Zhu L P, Mitsugu N, et al. Spatial variability and correlation of environmental proxies during the past 18,000 years among multiple cores from Lake Pumoyum Co, Tibet, China[J]. Journal of Paleolimnology, 2009, 42(3): 303-315
- 25 Thomas K, Torsten H, Stefan D, et al. Indian Ocean Summer Monsoon(IOSM)-dynamics within the past 4 ka recorded in the sediments of Lake Nam Co, central Tibetan Plateau (China) [J]. Quaternary Science Reviews, 2012, 39: 73-85
- 26 王君波,朱立平. 青藏高原湖泊沉积与环境演变研究:现状与展望[J]. 地理科学进展,2005,24(5):1-12[Wang Junbo, Zhu Liping.

- Environmental change reflected by lake sediments on Tibetan Plateau: Progress and prospect[J]. Progress in Geography, 2005, 24(5): 1-12]
- 27 Pennington W, Cambray R S, Fisher E M. Observation on lake sediments using fallout ¹³⁷Cs as a tracer[J]. Nature, 1973, 242:324-326
- 28 Benoit G, Rozan T F. ²¹⁰Pb and ¹³⁷Cs dating methods in lakes: a retrospective study[J]. Journal of Paleolimnology, 2001, 25(4):455-465
- 29 万国江. ¹³⁷Cs 及²¹⁰Pbex 方法湖泊沉积计年研究新进展[J]. 地球科学进展,1995,10(2):188-192[Wan Guojiang. Progresses on ¹³⁷Cs and ²¹⁰Pbex dating of lake sediments[J]. Advence in Earth Sciences, 1995, 10(2): 188-192]
- 30 Yang H D, Simon T. Radiometric dating for recent lake sediments on the Tibetan Plateau [J]. Hydrobiologia, 2013, 713(1): 73-86
- 31 Cong Z Y, Kang S C, Gao S P, et al. Historical trends of atmospheric black carbon on Tibetan Plateau as reconstructed from a 150-year lake sediment record[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47 (6): 2579-2586
- 32 Wang X, Yang H D, Gong P, et al. One century sedimentary records of polycyclic aromatic hydrocarbons, mercury and trace elements in the Qinghai Lake, Tibetan Plateau [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(10): 3065-3070
- 33 王君波,朱立平,鞠建廷,等. 西藏普莫雍错不同岩芯环境指标的对比研究及其反映的近 200 年来环境变化[J]. 湖泊科学,2009, 21(6):819-826[Wang Junbo, Zhu Liping, Ju Jianting, et al. Environmental changes reflected by a comparative proxy study among multiple cores from Pumoyum Co, Tibet in the last 200 years[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(6): 819-826]
- 34 王荣, 羊向东, 朱立平. 西藏纳木错过去 200 年来的环境变化[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5):791-798 [Wang Rong, Yang Xiangdong, Zhu Liping. Environmental changes of Namu Co, Xizang during the past 200 Years [J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(5): 791-798]
- 35 朱立平,谢曼平,吴艳红. 西藏纳木错 1971~2004 年湖泊面积变化及其原因的定量分析[J]. 科学通报,2010,55(18):1789-1798 [Zhu Liping, Xie Manping, Wu Yanhong. Quantitative analysis of lake area variations and the influence factors from 1971~2004 in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(18):1789-1798]
- 36 王君波,朱立平,Gerhard Daut,等. 西藏纳木错水深分布及现代湖沼学特征初步分析[J]. 湖泊科学,2009,21(1):128-134[Wang Junbo, Zhu Liping, Daut Gerhard, et al. Bathymetric survey and modern limnological parameters of Nam Co, central Tibet[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(1):128-134]
- 37 王君波,朱立平,鞠建廷,等. 西藏纳木错东部湖水及入湖河流水

- 化学特征初步研究[J]. 地理科学,2009,29(2):288-293[Wang Junbo, Zhu Liping, Ju Jianting, et al. Water chemistry of Eastern Nam Lake area and in flowing rivers in Tibet[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(2):288-293]
- 38 康世昌,杨永平,朱立平,等. 青藏高原纳木错流域现代环境过程及其变化[M]. 北京:气象出版社,2011:1-409[Kang Shichang, Yang Yongping, Zhu Liping, et al. Modern Environmental Processes and Changes in the Nam Co Basin of the Tibetan Plateau[M]. Beijing: Meteorological Press, 2011: 1-409]
- 39 朱大岗,孟宪刚,赵希涛. 纳木错湖相沉积与藏北高原古大湖[J]. 地球学报,2001,22(2):149-155[Zhu Dagang, Meng Xiangang, Zhao Xitao. Nam Tso lacustrine sediments and the ancient big lake in Northern Tibet Plateau[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2001, 22(2): 149-155]
- 40 吕新苗,康世昌,朱立平,等. 西藏纳木错植物物候及其对气候的响应[J]. 山地学报,2009,27(6):648-654[Lü Xinmiao, Kang Shichang, Zhu Liping, *et al.* Phenology characters of dominant plants in the Nam Co Basin and its response to climate, Tibet[J]. Journal of Mountain Science, 2009, 27(6):648-654]
- 41 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,1984:134-151, 159-168[Guan Zhihua, Chen Chuanyou, Ou Yuxiong, et al. Rivers and Lakes in Tibet[M]. Beijing: Science Press, 1984: 134-151,159-168]
- 42 Appleby P G, Oldfield F. The calculation of lead-210 dates assuming a constant rate of supply of unsupported 210 Pb to the sediment [J]. Catena, 1978, 5(1): 1-8
- 43 万国江. 现代沉积的²¹⁰Pb 计年[J]. 第四纪研究,1997(3):230-239[Wan Guojiang. ²¹⁰Pb dating for recent sedimentation[J]. Quaternary Sciences, 1997(3): 230-239]
- 44 陈敬安, 万国江, 汪福顺, 等. 湖泊现代沉积物碳环境记录研究 [J]. 中国科学(D辑): 地球科学, 2002, 32(1): 73-80 [Chen Jing an, Wan Guojiang, Wang Fushun, et al. Environment records of carbonic in recent lake sediment [J]. Science China (Seri. D): Earth Sciences, 2002, 32(1): 73-80]
- 45 Peng Y J, Xiao J L, Nakamura T, et al. Holocene East Asian mon-soonal precipitation pattern revealed by rain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of North-central China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233 (3/4): 467 479
- 46 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究[J]. 中国科学(A辑), 1973: 168-189 [Zhu Kezhen. A preliminary study on climate change in the past 5000 years in China[J]. Science China(Seri. A), 1973: 168-189]

A 150 Year Climate Change History Reconstructed by Lake Sediment of Nam Co, Tibetan Plateau

(1. School of Geography Science, Southwest University, Chongqing 400715;

2. Key Laboratory of Tibetan Environment Changes and Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085)

Abstract: Nam Co in high-altitude area is the ideal place to study the past climatic and environmental changes. In this paper, we tried to compare the measured lake sediment results of Nam Co with meteorological data in local stations and chose some proxies to reconstruct the climate and environment change record in the past 150 years in this area. The values of TOC, grain size, Sr/Ba and Rb/Sr had clear environment significance and reflected the climate change well. Geochemical multi-proxies of lake core NMC09 showed the final result as follows, the climate was characterized with warm and humid from 1 850~1 900 A.D.. During the period of 1 900~1 950 A.D., it was a cold-wet period, and had transformed to the warm and humid period gradually since 1920s. After the 1950s it had main trend of rising temperature although it had a little climate fluctuations, and the lake did not shrink obviously in spite of reduced precipitation. It suggested that rising temperature could lead to glacier melting accelerated to supply the run-off into Nam Co.

Key words: Tibetan Plateau: Nam Co; lake sediment; climate change