

# 青藏高原湖泊沉积研究及其进展

于守兵<sup>1,2</sup>,李世杰<sup>1</sup>,刘吉峰<sup>1,2</sup>

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039)

**摘要:** 青藏高原湖泊沉积研究主要围绕青藏高原隆升和全球变化响应开展的。研究揭示了青藏高原隆升具有整体性、阶段性和后期加速性。中晚更新世以来和末次间冰期-冰期气候演化过程得到重建, 并能够与冰芯和深海氧同位素记录对比; 同时也存在 MIS3阶段强烈暖湿和末次冰盛期冷湿等区域特征; 新仙女木事件在湖泊沉积物也有明显记录。全新世研究表明青藏高原早期暖湿并经历冷事件, 大暖期普遍出现高水位, 后期气候向干冷化方向发展。湖泊沉积环境定量化重建也得到研究。青藏高原湖泊沉积应在高分辨率纹层沉积和环境指标定量分析基础理论方面加强研究。

**关键词:** 青藏高原; 湖泊沉积; 研究进展

**中图分类号:** P941.78

**文献标识码:** A

青藏高原隆升是新生代最重要的地质事件之一, 对大气环流格局和全球气候变化起着极其重要的作用, 直接影响全球物质与能量的输送与平衡, 其形成演化隆升机制以及产生的环境效应研究已经成为国际地学研究的热点<sup>[1,2]</sup>。青藏高原西北部的古里雅冰芯研究重建了末次间冰期以来的氧同位素变化曲线<sup>[3,4]</sup>, 与格陵兰、南极冰芯<sup>[5,6]</sup>和深海岩芯<sup>[7]</sup>所记录的气候整体变化趋势具有很好的一致性。

湖泊沉积具有连续、敏感和分辨率高等优点, 尤其是干旱、半干旱地区的封闭型湖泊沉积, 是环境变迁的忠实记录者。青藏高原湖泊众多且分布广泛, 沉积物记录包括了构造运动、气候变化、流域生态演化等丰富信息; 且地处内陆干旱、半干旱地区, 对气候变化特别是降水变化很敏感; 同时, 受到人类活动直接影响较少。因此青藏高原湖泊沉积研究在高原隆升及其气候环境效应和全球变化研究中起着十分重要的作用, 成为全球变化研究的热点。青藏高原湖泊主要分布在羌塘高原和可可西里地区, 存在以

东经 90°为中心轴线的经向湖泊密集带, 囊括了青藏高原及其腹地的主要湖泊, 约占湖泊总面积的 70% 以上<sup>[8]</sup>。

## 1 近 30 年青藏高原湖泊沉积研究历程

青藏高原湖泊考察起步很早, 但是 20 世纪 80 年代中期以前主要是为寻找矿产资源进行的盐湖研究。80 年代后期围绕青藏高原隆升和全球变化的沉积响应开始湖泊沉积记录研究, 并开展一系列国际合作。

### 1.1 青藏高原湖泊沉积研究重点区域

青藏高原湖泊沉积研究重点区域包括青海湖、西昆仑山-喀喇昆仑山地区、高原东部若尔盖盆地、羌塘高原和藏南地区。青海湖是我国最大的咸水湖, 位于青藏高原东北部, 处于西南、东南季风和西风的交汇带, 一直是研究的热点区域<sup>[9-13]</sup>。西昆仑-喀喇昆仑山地区气候寒冷干燥, 是现代冰川最为

收稿日期 (Received date): 2005-12-20; 改回日期 (Accepted): 2006-04-11。

基金项目 (Foundation item): 国家自然科学基金项目 (批准号: 40471001) 和中国科学院知识创新工程重要项目 (批准号: KZCX2-SW-118)。

[Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40471001) and the Knowledge Innovation Program of CAS (No. KZCX2-SW-118).]

作者简介 (Biography): 于守兵 (1980-), 男 (汉族), 河南许昌人, 硕士研究生, 从事湖泊沉积方向研究。电话: 025-86882075 电子邮件: shbyu@niglas.ac.cn [Yu Shoubing (1980-), male (Han Nationality), master candidate with main research on lacustrine sediments. Tel: 025-86882075. E-mail: shbyu@niglas.ac.cn]

发育和集中的山地之一,湖泊演化与冰川发育密切相关<sup>[14-15]</sup>。若尔盖盆地位于青藏高原东北部,高原的抬升及水系的相应演变,使得该区成为揭示青藏高原隆起过程最重要的地点之一<sup>[16-17]</sup>。羌塘高原是我国湖泊分布最多的地区,集中了西藏最多的湖泊,成为考察研究的重点区域<sup>[18-23]</sup>。藏南地区吉隆盆地沉积研究揭示其形成演化与喜马拉雅山上升的关系<sup>[24]</sup>,沉错、昂仁湖处于喜马拉雅山雨影地区,受西南季风影响较大,近年来成为硅藻、介形类和环境磁学研究的新区域<sup>[25-28]</sup>。

### 1.2 青藏高原湖泊沉积研究重点的变化

青藏高原早期湖泊沉积研究主要是根据野外古湖岸线高程测量、湖盆剖面湖相地层辨识和湖滨沉积岩芯,辅之以<sup>14</sup>C测年等推测湖泊水位变迁过程,揭示湖区气候环境变化<sup>[9-10, 14-15, 18]</sup>。一些湖泊沉积研究结合了孢粉、Ca/Mg等指标,反映湖区气候演化<sup>[19-29]</sup>。随着对青藏高原隆升机制及其环境影响探讨,选择若尔盖和甜水海及错鄂进行深孔钻探,重点研究高原隆升的湖泊沉积响应,揭示一系列重大的构造运动事件<sup>[17, 23, 30-31]</sup>。近些年来,末次间冰期、两万年来、两千年来和近百年来气候研究成为全球变化研究重点,湖泊沉积转向高分辨率、多指标综合研究<sup>[13, 22, 32-35]</sup>,和古环境定量恢复研究<sup>[28, 31, 33, 36, 37]</sup>。

### 1.3 青藏高原湖泊沉积研究方法手段

湖泊沉积岩芯定年由单一的<sup>14</sup>C测年发展到以湖相沉积物的沉积固结模型为依据,以<sup>14</sup>C实测年龄及古地磁地层学磁性事件年代为节点年代获得不同深度的年龄<sup>[23, 38]</sup>;与泥炭纹泥<sup>[39]</sup>、铀系等时线测年<sup>[22, 40]</sup>相结合;并校正成日历年代<sup>[13, 41]</sup>。<sup>210</sup>Pb<sup>137</sup>Cs也用于近百年来沉积的精确定年<sup>[34, 35, 37]</sup>。兹格塘错砂砾堤研究中还用到热释光测年<sup>[42]</sup>。

湖泊沉积研究由早期的沉积相判识发展到对沉积岩芯多指标综合分析。采用的代用指标有粒度、碳酸盐含量、自生碳酸盐氧同位素、有机碳同位素、C/N、硅藻、孢粉、磁化率、氢指数、地球化学元素分析等。数学工具和沉积物理模型运用得到重视,环境代用指标定量化研究也有所突破。

## 2 青藏高原湖泊沉积研究成果

### 2.1 青藏高原隆升的湖泊沉积记录

青藏高原强烈隆升始于3.6 MaB.P.的青藏运动。青藏运动分为A(3.6 MaB.P.), B(2.6 MaB.

P.), C(1.7 MaB.P.)3幕;昆黄运动(1.2~0.6 MaB.P.)使青藏高原大面积进入冰冻圈;共和运动(0.15 MaB.P.至今)使高原达到现在高度<sup>[1]</sup>。这些强烈构造隆升事件在吉隆盆地、错鄂、若尔盖盆地和甜水海深钻中均有反映。

吉隆盆地沉积剖面揭示喜马拉雅山在7.0~6.5 MaB.P.、4.3~3.4 MaB.P.处于隆升阶段;湖相沉积自生方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 记录5.7 MaB.P.和4.3 MaB.P.发生两次突然降温事件<sup>[24]</sup>。

2.6 MaB.P.全球气候开始变冷,并引起一系列重大变化,青藏高原湖相沉积物记录也有反映。吉隆盆地湖相沉积自生方解石 $\delta^{18}\text{O}$ 记录了2.5 MaB.P.一次气温降低的突变事件,草本花粉大量出现<sup>[24]</sup>。错鄂深钻显示错鄂湖盆形成于2.8 MaB.P.青藏运动B幕整体隆升的差异升降,季风的增强使高原中部降水增加,2.6 MaB.P.积水成湖,孢粉组合指示气候转为冷湿<sup>[23]</sup>。

2.0~1.7 MaB.P.吉隆盆地周围山地强烈上升,错鄂深钻显示高原内部在2.0~0.8 MaB.P.处于最稳定时期<sup>[23, 24]</sup>。0.8 MaB.P.昆黄运动时期吉隆盆地周围山地再次强烈上升,错鄂湖消失,若尔盖RM孔沉积速率加快、沉积粒级增粗<sup>[17, 23, 24]</sup>。

0.15 MaB.P.共和运动时期若尔盖RM孔沉积速率突然增大,甜水海古湖形成,错鄂钻孔各指标变化均揭示青藏高原再次发生强烈的构造隆升运动<sup>[17, 23, 30]</sup>。

青藏高原周围及中部的这些湖泊沉积深钻记录了2.6 MaB.P.、1.7 MaB.P.、0.8 MaB.P.和0.15 MaB.P.左右的构造事件,揭示了青藏高原隆升具有整体性、阶段性和后期加速的特征。若尔盖盆地360 kaB.P.的加速隆升和错鄂盆地自0.78 MaB.P.沉积间断后于0.35 MaB.P.重新接受沉积揭示的这次构造运动报道较少。

### 2.2 中晚更新世以来气候演化特征

目前为止,揭示青藏高原中晚更新世以来气候演化特征的湖泊沉积深钻主要有三处。若尔盖盆地RM孔和RH孔分别揭示900 kaB.P.和875 kaB.P.以来的构造-环境过程及气候变化;RM孔重建200 kaB.P.以来的古温度曲线<sup>[16, 36, 43]</sup>。错鄂深钻显示中晚更新世以来0.78~0.35 MaB.P.出现沉积间断,反映了0.35 MaB.P.以来的沉积环境特征<sup>[23]</sup>。高原西北部甜水海钻孔根据铁元素变化建立了230 ka来的气候定量曲线<sup>[31]</sup>。

900~ 800 kaB. P. 错鄂孔地球化学指标及孢粉组合指示为温凉偏湿的气候; 若尔盖盆地泥炭发育程度高, 并与泥、粉泥或粉砂层组成沉积旋回<sup>[17]</sup>。高原气候总体较湿, 东部若尔盖地区呈现暖湿、冷干组合。

800~ 480 kaB. P. 若尔盖地区泥炭发育程度变差, 碳酸盐含量增加并出现纯碳酸盐沉积, 气候组合变为冷湿、暖干, 并以冷湿为主, 这与黄土-古土壤的冷干-暖湿型气候形成鲜明对比<sup>[17 38]</sup>。在此期间青藏高原发育最大规模冰川, 气候冷湿, 而黄土高原为冷干环境并堆积厚层黄土<sup>[16]</sup>。

480~ 160 kaB. P. 若尔盖盆地沉积旋回厚度剧增, 泥炭不发育, 代之以碎屑沉积, 尤其是 360 kaB. P. 以后更为明显, 气候明显冷干<sup>[17]</sup>。错鄂自 350 kaB. P. 重新接受一套以砾、砾质砂为主的粗碎屑沉积, 环境指标指示为冷湿<sup>[23]</sup>。甜水海铁元素记录 229~ 150 kaB. P. 气候温干, 沉积环境以氧化环境为主<sup>[31]</sup>。高原气候随着一次快速隆升进一步变冷。

150 kaB. P. 共和运动以来错鄂地球化学指标与孢粉组合和甜水海铁元素记录都指示气候再次变冷变干<sup>[23 31]</sup>。若尔盖沉积岩性变化剧烈, 出现冷干、暖湿的组合特征, 有效湿度明显增加<sup>[17]</sup>。这与地处高原东部, 受季风活动影响较强有关。

三处深钻共同揭示青藏高原中晚更新世以来的气候演化受到构造隆升和地球轨道参数双重影响, 在约 800 kaB. P.、360 kaB. P. 和 150 kaB. P. 沉积环境和区域气候均发生重大变化, 并在整体上随着高原的隆升趋于冷干。800 kaB. P. 全球气候发生转型, 即中更新世革命, 全球冰期旋回由 40 ka向 100 ka转变<sup>[44]</sup>, 青藏高原气候转为冷湿。480 kaB. P. 高原本身又存在一次明显的气候转型事件, 其主要标志是气候趋干, 出现 100 ka准周期波动; 之前周期复杂, 受构造作用影响较大<sup>[17 38]</sup>。

### 2 3 末次间冰期-冰期循环气候特征

青藏高原东部若尔盖和西昆仑山甜水海钻孔都完整地覆盖末次间冰期-冰期循环, 并能与冰芯和深海氧同位素阶段对比, 揭示青藏高原气候变化具有全球意义, 但也存在区域差异。

#### 2 3 1 整体特征

青藏高原末次间冰期起讫时间, 若尔盖盆地 RM 孔古温度定量研究揭示为 140~ 80 kaB. P., 甜水海地区为距今 150~ 74 ka<sup>[31]</sup>; 末次间冰期总体气候较湿, 若尔盖盆地为暖湿冷干组合, 甜水海地区以

温湿为主, 后期转冷湿<sup>[31 32 36]</sup>。

若尔盖钻孔记录末次间冰期早期 5 e 并不连续, 存在两个冷干亚阶段, 并出现快速变冷事件; 5 e 最暖但 5 a 水热配置最佳<sup>[32 43]</sup>。但甜水海孢粉记录 5 e 为晚第四纪最温暖湿润期<sup>[48]</sup>。甜水海钻孔的 5 d 阶段是 230 ka 来最低温度时期<sup>[31]</sup>, 而 RM 孔中 5 d 阶段虽然温度下降幅度很大, 但仍高于末次盛冰期时温度<sup>[32]</sup>。

末次冰期开始于 80 kaB. P., 早期为凉湿, 真正冷干始于 68 kaB. P.; 82~ 10 kaB. P. 对应一个完整的冰期, 共 7 次暖期和 5 次冷期, 其中冷期对应 H6~ H2<sup>[32 36]</sup>。甜水海记录 74 ka 进入末次冰期, 约 25 ka 为末次冰期最盛期; 早期气候冷湿, 之后出现多种波动模式<sup>[31]</sup>。

### 2 3 2 青藏高原 MIS3 阶段后期气候特征与青藏高原大湖期

受岁差周期控制太阳辐射在 MIS3 阶段后期 30~ 40 kaB. P. 为高辐射阶段, 青藏高原发生特强夏季风事件, 气候异常湿润<sup>[45]</sup>; 该时期青藏高原普遍发育统一的古大湖<sup>[46]</sup>。青海湖 30~ 40 kaBP 出现高湖面, 模拟降水量为  $645 \pm 5$  mm, 高出现在 280 mm<sup>[47]</sup>。甜水海钻孔显示 3 阶段后期 35~ 33 kaB. P. 温暖湿润, 高原季风可深入到西昆仑山地区, 使得甜水海地区湖泊连成一体<sup>[30]</sup>。西藏安多地区错那湖和兹格塘错在 35 kaB. P. 两湖相连, 水位较高<sup>[18]</sup>。RM 孔显示在 30 kaB. P. 出现湿润峰<sup>[32]</sup>。纳木错研究则显示在 3 阶段出现大湖期, 但湖泊多次出现大湖期, 最高湖面时期则在 5 e 阶段; 是 3 阶段还是 5 阶段更湿润还得进一步深入研究<sup>[22]</sup>。

### 2 3 3 末次盛冰期湖侵事件

西昆仑山地区湖泊古岸线和沉积记录末次盛冰期早期出现冷湿环境, 28~ 22 kaB. P. 明显扩张<sup>[15 30 48]</sup>。西藏安多地区错那湖和兹格塘错在 20~ 17 kaB. P. 期间湖面升高<sup>[18]</sup>。苟弄错湖岸阶地显示在 22~ 18 kaB. P. 出现大水期<sup>[49]</sup>。该时期纳木错湖面也高出现在<sup>[22]</sup>。

这次高湖面不但青藏高原湖泊有记录, 我国西部地区和中亚及地中海地区均出现高湖面, 并与印度中南部和中西伯利亚低湖面成反差<sup>[50 51]</sup>。冰期时西风带的强盛和位置南迁与欧亚大陆大幅度降温造成蒸发能力减弱是我国西部地区形成冷湿气候的重要原因<sup>[51 52]</sup>。

### 2 3 4 新仙女木事件

湖泊沉积具有高分辨率特点,能清晰地记录一些气候突变事件。新仙女木事件时期,青藏高原急剧降温,在很多湖泊沉积中都有记录。青海湖 12.9~12.1 cal kaB.P. 环境出现恶化<sup>[13]</sup>;班公错和松木西错 11.5~11 kaB.P. 出现严酷、恶劣的气候环境条件<sup>[53,54]</sup>;若尔盖高原泥炭记录 13~11.1 cal kaB.P. 为寒冷期<sup>[39,41]</sup>;色林错 10.8~10 kaB.P. 出现干冷事件<sup>[19]</sup>;苟弄错 11.5~10.4 kaB.P. 为新仙女木期<sup>[55]</sup>;昂仁湖 11.095~9.97 kaBP 经历寒冷期<sup>[25]</sup>。湖泊沉积记录新仙女木事件发生时间较为一致,与世界各地记录是可以比较的,具有全球意义。

## 2.4 全新世气候特征

地球偏心率的周期性变化,使北半球 18 ka 以来夏季太阳辐射在 11~10 kaB.P. 达到最大,并诱发 9~6 kaB.P. 强盛的季风环流,使得全新世早、中期出现温湿气候<sup>[56]</sup>。青藏高原湖泊在该时期再次普遍出现高水位。全新世气候不稳定,并检测出一系列突变事件:9 000~8 000 cal aB.P., 6 000~5 000 cal aB.P., 4 200~3 800 cal aB.P., 3 500~2 500 cal aB.P., 1 200~1 000 cal aB.P. 和 600~150 cal aB.P.<sup>[57]</sup>。这些突变事件在青藏高原湖泊沉积记录中有一定的反映。

全新世气候呈现准周期震荡特征,若尔盖高原泥炭记录检测出 1 463 a 的准周期<sup>[41]</sup>,与 Bond 的北大西洋浮冰事件的 1 450 a 周期,还有加拿大西部降水事件、季风有关的干湿轮回较为近似。

### 2.4.1 全新世早期温湿气候及冷事件

青藏高原湖泊沉积记录显示全新世初期气温迅速上升,气候温湿但很不稳定,出现冷事件。青海湖 12.1 cal kaB.P. 升温进入全新世,早期温度和降水迅速增加<sup>[13]</sup>;喀喇昆仑山地区湖泊 10 kaB.P. 气候迅速转暖<sup>[54]</sup>;松木西错在全新世早期出现比现在更为温湿的气候<sup>[53]</sup>;青藏高原北部和西部沉积剖面孢粉分析揭示 10~8 kaB.P. 气候由干冷转向冷湿<sup>[58]</sup>;若尔盖高原泥炭记录 11.12~11.0 cal kaB.P. 全新世暖湿期到来<sup>[39,41]</sup>;色林错早期降水增加,9.2~8.4 kaB.P. 出现稳定高湖面<sup>[19]</sup>;苟弄错 10.4 kaB.P. 进入冰后期,10~8 kaB.P. 出现高水位<sup>[49,59]</sup>。

全新世早期气候很不稳定,湖泊沉积记录普遍出现冷的波动事件。青海湖最冷期出现在 9.4 cal kaB.P.<sup>[13]</sup>;松木希错在 8 kaB.P. 出现冷波动<sup>[53]</sup>;若尔盖 8.9 cal kaB.P. 显著降温<sup>[41]</sup>;喀喇昆仑山地区湖泊约 9 kaB.P. 经历一次冷的波动<sup>[54]</sup>;洞错 8.47

~8.17 aBP 显著降温的气候事件<sup>[21]</sup>。此次冷事件对应于李世杰等提出的发生于 8.5~8 kaB.P. 的全新世第一次冰进<sup>[60]</sup>。而国际上普遍关注的 8 cal kaB.P. 事件<sup>[61]</sup>则基本没有反映。

### 2.4.2 全新世大暖期气候特征及湖泊高水位现象

青海湖全新世大暖期开始于 8.4 cal kaB.P., 至 7.4 cal kaB.P. 达到暖湿组合的鼎盛期,5.8 cal kaB.P. 结束,模拟降水量为 595±15 mm,比现在高 235 mm<sup>[13,47]</sup>;若尔盖高原泥炭记录早全新世 5.0 cal kaB.P. 以前气候温和湿润<sup>[41]</sup>,根据泥炭沉积速率划分的大暖期为 9.5~2 kaB.P.<sup>[39]</sup>;若尔盖黑河牧场 DC 剖面孢粉记录 9~3 kaB.P. 为全新世大暖期,7 kaB.P. 达到鼎盛期<sup>[62]</sup>;喀喇昆仑山地区湖泊 7.5~6 kaB.P. 气候相对湿润,湖面上升<sup>[54]</sup>;色林错 7~4.8 kaB.P. 为高湖面时期,6.5 kaB.P. 为最高湖面,8.4~5.5 kaB.P. 为最大降水和高温期<sup>[19]</sup>;苟弄错 8~5.5 kaB.P. 为全新世最温暖时期,6~5 kaB.P. 出现高水位<sup>[49,59]</sup>;兹格塘错和错鄂古湖泊砂砾堤反映 9.0~6.0 kaB.P. 存在高湖面<sup>[42]</sup>;纳木错沉积显示 8.4 kaB.P. 以来区域森林植被明显扩张,标志全新世大暖期到来<sup>[22]</sup>。

欧亚大陆湖泊研究表明,印度、青藏高原、蒙古和东西伯利亚地区的湖泊在全新世相当一致地显示了高湖面,反映了东亚季风的扩展、季风雨和对流雨的增加<sup>[63]</sup>。青藏高原东部若尔盖全新世大暖期开始早于其他地区,持续时间也较长;藏南地区开始时间次之。这说明高原夏季风的增强在东、南缘开始较早,中部和北部较晚。尽管如此,全新世大暖期的鼎盛期则较一致,普遍出现在 7~6 kaB.P.。此外,全新世最大降水、高温时期和高湖面时期可能不同步出现<sup>[19]</sup>。

### 2.4.3 全新世新冰期颤动及晚期的冷干化

青藏高原湖泊沉积记录 5 kaB.P. 前后气候开始强烈波动,向冷干化方向发展,出现所谓的新冰期颤动。青海湖 5.8 cal kaB.P. 以来气候由温凉偏湿向冷干化发展,4.5 cal kaB.P. 左右气候总体向冷干化方向发展,全新世晚期 2.06 cal kaB.P. 以来气候以冷干为特征<sup>[10,11,13,29]</sup>;西昆仑山地区湖泊记录 5.5 kaB.P. 以来气候恶化,向干旱化发展<sup>[53,54,58]</sup>;若尔盖泥炭记录 5.0 cal kaB.P. 将全新世分为早期的温和湿润和晚期的干冷<sup>[41]</sup>;色林错 4.2 kaB.P. 以来干旱,湖面波动下降<sup>[19]</sup>;苟弄错 5.5 kaB.P. 以后气候向干旱化方向发展<sup>[59]</sup>;纳木错 4.2 kaB.P. 以来湖面

下降<sup>[22]</sup>。

与全新世大暖期开始时间相反,晚期的冷干化在高原西部和中部最早开始,南部和东部开始较晚。这可能与夏季风从西部和中部最先撤退有关。

而在全新世晚期青藏高原湖泊水位也出现短暂的回升,青海湖南岸哈拉力剖面距今 2 8~2 kaB. P. 形成古土壤, 1.3 kaB. P. 发育现代土壤层<sup>[10]</sup>, 一级阶地是 2~1 kaB. P. 高湖面的产物<sup>[11]</sup>; 苟弄错 3~2.2 kaB. P.、1.5~0.8 kaB. P. 出现高水位<sup>[49]</sup>; 错鄂 2.2 kaB. P. 湖面高出现代 2~4 m<sup>[42]</sup>。这可能同中国东部 2.1~1.7 kaB. P. 暖湿期相对应, 古里雅冰芯记录该时期为高温湿润期<sup>[64]</sup>。

### 2.5 两千年来气候高分辨率研究

两千年来气候高分辨率研究对预测未来短期气候变化有很好的指导意义,但是青藏高原湖泊沉积关于该方面的研究还较缺乏。

青海湖和苟鲁错沉积记录显示,近千年来气候演替类型为冷湿与暖干的组合特征<sup>[34, 65~67]</sup>; 藏南沉错硅藻恢复的古盐度显示在 10 a 尺度上的暖湿、冷干组合特点<sup>[28]</sup>。青海湖、苟鲁错和藏南沉错沉积记录揭示了中世纪暖期和小冰期的存在; 青海湖和苟鲁错记录了小冰期的三次冷湿期, 西昆仑山红山湖也记录了 19 世纪下半叶的冷湿<sup>[25, 34, 35, 67]</sup>。

20 世纪以来气候开始变暖<sup>[34, 37]</sup>。20 世纪次级波动可分为 1922~1960 年的冷干、暖湿波动, 1960 以来的强烈暖干化以及 70 年代中期到 80 年代末期的短暂冷湿过程; 90 年代以来, 暖干趋势更为强烈<sup>[35, 68]</sup>。

## 3 青藏高原湖泊沉积研究展望

### 3.1 开展高分辨率湖泊纹层研究

湖泊纹层是提供高分辨率环境信息的良好载体。沉积物组分随着陆源输入、化学条件和生物活动时空变异的周期变化和免遭破坏的沉积环境是纹层形成的必要条件。而半混合型湖泊是保存纹层的理想场所, 目前发现兹格塘错是一典型的半混合湖泊, 发育良好的纹层沉积<sup>[20]</sup>。纹层的计数能够提供精确的年代信息, 是建立高分辨率湖泊演化标准参照曲线重要手段之一。同时纹层厚度变化及其物质组成分析能够很好揭示湖泊沉积环境的变迁。

### 3.2 加强环境代用指标定量研究

青藏高原湖泊沉积环境代用指标定量研究起

步较早<sup>[12]</sup>。定量化研究可分为两类, 一是建立物理演化模型, 得出函数关系重建古环境, 如若尔盖古湖 200 ka 以来的古温度计算<sup>[36]</sup>; 另一种是根据已有资料进行统计分析得到相关的转换函数, 进行指标定量化研究<sup>[28, 31, 37]</sup>。湖泊沉积过程复杂, 各种指标之间关系复杂, 应该加强对沉积的物理、化学和生物过程的研究, 建立环境代用指标的综合作用理论, 为定量化研究提供坚实的基础。

### 3.3 数学工具运用

数理工具在湖泊沉积研究中得到重视, 如波谱分析<sup>[38, 41]</sup>、气候突变事件诊断的 M-K 法和 t 检验法<sup>[49]</sup>。数学模型在湖泊沉积和演化研究<sup>[19, 49]</sup>、定年<sup>[38]</sup>、湖水降水和蒸发估算<sup>[47, 70]</sup>等得到应用。数学工具和模型的建立与运用有助于对代用指标的定量分析和加深对其蕴含的规律揭示。

## 参考文献 (References)

- [1] Li Jijun, Fang Xiaomin, Pan Baotian, *et al.* Late Cenozoic intensive uplift of Qinghai-Xizang Plateau and its impacts on environments in surrounding area [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 381~391 [李吉均, 方小敏, 潘保田, 等. 新生代晚期青藏高原强烈隆起及其对周边环境的影响 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(5): 381~391]
- [2] ShiYafeng, Li Jijun, Li Bingyuan, *et al.* Uplift of the Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau and East Asia environmental change during Late Cenozoic [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1999, 54(1): 10~20 [施雅风, 李吉均, 李炳元, 等. 晚新生代青藏高原的隆升与东亚环境变化 [J]. 地理学报, 1999, 54(1): 10~20]
- [3] Thompson L G, Yao T D, Davies M E, *et al.* Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science*, 1997, 276: 1821~1825
- [4] Yao Tandong, Thompson L G, ShiYafeng, *et al.* Climate variation since the last interglaciation recorded in the Guliya ice core [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 40(6): 662~668 [姚檀栋, Thompson L G, 施雅风, 等. 古里雅冰芯中末次间冰期以来气候变化记录研究 [J]. 中国科学 (D 辑), 1997, 27(5): 447~452]
- [5] Dansgaard W, Johnsen S J, Clausen H B, *et al.* Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record [J]. *Nature*, 1993, 364: 218~220
- [6] Jouzel J, Lorius C, Petit J R, *et al.* Vostok ice core: A continuous isotope temperature record over the last climatic cycle (160,000 years) [J]. *Nature*, 1987, 329: 403~408
- [7] Martinson D G, Pisias N G, Hays J D, *et al.* Age dating and the orbital theory of the ice ages: development of a high-resolution 0~300,000 years [J]. *Quaternary Research*, 1987, 27: 1~29
- [8] Hu Dongsheng. Lake survey in Kekexili Region [J]. *Journal of Salt Lake Science*, 1994, 2(3): 17~21 [胡东生. 可可西里地区湖泊概况 [J]. 盐湖研究, 1994, 2(3): 17~21]
- [9] Yuan Baoyin, Chen Kezao, Bowler J M, *et al.* The formation and e-

- volution of the Qinghai Lake [J]. *Quaternary Sciences*, 1990, 3: 233~243 [袁宝印, 陈克造, Bowler JM, 等. 青海湖的形成与演化趋势 [J]. 第四纪研究, 1990, 3: 233~243]
- [10] Chen Fahu, Wang Shilan, Zhang Weixin, *et al*. The loess profile at south bank, climatic information and lake-level fluctuations of Qinghai Lake during the Holocene [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 1991, 11(1): 76~85 [陈发虎, 汪世兰, 张维信, 等. 青海湖南岸全新世黄土剖面、气候信息及湖面升降探讨 [J]. 地理科学, 1991, 11(1): 76~85]
- [11] Wang Sumin, Shi Yafeng. Review and discussion of the Late Quaternary evolution of Qinghai Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1992, 4(3): 1~9 [王苏民, 施雅夫. 晚第四纪青海湖演化研究析视与讨论 [J]. 湖泊科学, 1992, 4(3): 1~9]
- [12] Zhang Pengxi, Zhang Baozhen, Qian Guimin, *et al*. The study of paleoclimatic parameter of Qinghai Lake since Holocene [J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 3: 225~238 [张彭熙, 张保珍, 钱桂敏, 等. 青海湖全新世以来古环境参数的研究 [J]. 第四纪研究, 1994, 3: 225~238]
- [13] Shen Ji, Liu Xingqi, Matsumoto R, *et al*. Paleoclimate evolution reflected by high-resolution multi-proxies in Qinghai Lake since postglacial [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(6): 582~589 [沈吉, 刘兴起, Matsumoto R, 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, 2004, 34(6): 582~589]
- [14] Li Bingyuan, Zhang Qingsong, Wang Fubao. Evolution of the lakes in the Karakoram-West Kunlun Mountains [J]. *Quaternary Sciences*, 1991, 1: 64~71 [李炳元, 张青松, 王富葆. 喀喇崑崙山—西昆仑山区的湖泊演化 [J]. 第四纪研究, 1991, 1: 64~71]
- [15] Li Shijie, Zheng Benxing, Jiao Keqin. Lakes in the western Kunlun Mountain areas [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(1): 37~44 [李世杰, 郑本兴, 焦克勤. 西昆仑山区湖泊初探 [J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(1): 37~44]
- [16] Wang Sumin, Xue Bin. Environmental evolution of Zoige Basin since 900 ka B.P. and comparison study with Loess Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1997, 40(3): 329~336 [王苏民, 薛滨. 中更新世以来若尔盖盆地环境演化与黄土高原比较研究 [J]. 中国科学, D 辑, 1996, 26(4): 323~328]
- [17] Xue Bin, Wang Sumin, Xia Weilan, *et al*. The uplifting and environmental change of Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau in the past 0.9 Ma inferred from core RM of Zoige Basin [J]. *Science in China (Series D)*, 1998, 41(2): 165~170 [薛滨, 王苏民, 夏威夷, 等. 若尔盖 RM 孔揭示的青藏高原 900kaBP 以来的隆升与环境变化 [J]. 中国科学 (D 辑), 1997, 27(6): 543~547]
- [18] Shen Yongping, Xu Daming. Fluctuations of lakes and their environments since Last Glaciation in Amdo area Tibet [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1994, 16(2): 173~180 [沈永平, 徐道明. 西藏安多的湖泊 (错那湖和兹格塘错) 变化与环境 [J]. 冰川冻土, 1994, 16(2): 173~180]
- [19] Gu Zhaoyan, Liu Jiaqi, Yuan Baoyin, *et al*. Lacustrine authigenic deposition expressive of environment and the sediment core from Siling Co. Xizang (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]
- [20] Li Wanchun, Li Shijie, Yin Yu, *et al*. Mercuric in Zige Tangca central Tibetan Plateau—discovery and significance [J]. *Science in China (Series D)*, 2001, 44 (supp): 338~342
- [21] Wei Lejun, Zheng Mianping, Cai Keqin, *et al*. Early-middle Holocene paleoclimate record from saline lake sediments in Tontsa Tibet [J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences Beijing)*, 2002, 9(1): 129~135 [魏乐军, 郑绵平, 蔡克勤, 等. 西藏洞错全新世早中期盐湖沉积的古气候记录 [J]. 地学前缘, 2002, 9(1): 129~135]
- [22] Zhao Xiaojiao, Zhu Dagang, Yan Fuhua, *et al*. Climatic change and lake-level variation of Nan Co. Xizang since the last interglacial stage [J]. *Quaternary Sciences*, 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]
- [23] Shen Ji, Lu Houyuan, Wang Sumin, *et al*. Environmental evolution and its response to tectonic events revealed by Cuoe Core at the center of Tibetan Plateau since 2.8 Ma B.P. [J]. *Science in China (Series D)*, 2004, 34(4): 359~366 [沈吉, 吕厚远, 王苏民, 等. 错鄂孔深钻揭示的青藏高原中部 2.8 Ma B.P. 以来环境演化及其对构造事件响应 [J]. 中国科学 D 辑, 2004, 34(4): 359~366]
- [24] Wang Fubao, Li Shengfeng, Shen Xuhui, *et al*. Formation, evolution and environmental changes of the Gyirong Basin and uplift of the Himalaya [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, 39(4): 401~409 [王富葆, 李升峰, 申旭辉, 等. 吉隆盆地的形成演化、环境变迁与喜马拉雅山隆起 [J]. 中国科学 D 辑, 1996, 26(4): 329~335]
- [25] Li Shengfeng, Zhang Jianxin, Zhang Zhaogan, *et al*. Application of new diatom index in reconstruction of Holocene environmental changes in Angren Lake southern Xizang (Tibet) [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 2001, 40(1): 143~152 [李升峰, 张建新, 张兆干, 等. 化石硅藻新指标在西藏昂仁湖环境演变中的应用 [J]. 古生物学报, 2001, 40(1): 143~152]
- [26] Zhu Liping, Chen Ling, Zhang Pingzhong, *et al*. Cold/warm fluctuations of the last 1300 years reflected by environmental in the Chen Co area southern Tibet [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 520~527 [朱立平, 陈玲, 张平中, 等. 环境磁学反映的藏南沉错地区 1300 年来冷暖变化 [J]. 第四纪研究, 2001, 21(6): 520~527]
- [27] Li Yuanfang, Zhu Liping, Li Bingyuan. Environmental changes and ostracoda in the Chen Co Lake of southern Tibet in recent 1400 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(4): 413~421 [李元芳, 朱立平, 李炳元. 藏南沉错地区近 1400 年来的介形类与环境变化 [J]. 地理学报, 2002, 57(4): 413~421]
- [28] Yang Xiangdong, Wang Sumin, Kamenk C, *et al*. Diatom compositions in the core from Chen Co Lake at southern Tibet and quantitative reconstruction of paleotemperature of lake water [J]. *Science in China (Series D)*, 2003, 33(2): 163~169 [羊向东, 王苏民, Kamenk 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, 2003, 33(2): 163~169]
- [29] Du Naiqiu, Kong Zhaochen, Shan Fashou. A preliminary investi-

- gation on the vegetational and climatic changes since 11,000 years in Qinghai Lake—An analysis based on palynology in core QH 85-14C [J]. *Acta Botanica Sinica*, 1989, 31 (10): 803~814 [杜乃秋, 孔昭宸, 山发寿. 青海湖 QH 85-14C 钻孔孢粉分析及其古气候古环境的初步探讨 [J]. 植物学报, 1989, 31(10): 803~814]
- [30] Li Shijie, Ou Rongkang, Zhu Zhaoyu, *et al*. A carbonate content record of late Quaternary climate and environment changes from lacustrine Core T95 in Tianshuihai Lake Basin, northwest Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(2): 58~65 [李世杰, 区荣康, 朱照宇, 等. 24 万年来西昆仑山甜水海湖岩芯碳酸盐含量变化与气候环境演化 [J]. 湖泊科学, 1998, 10(2): 58~65]
- [31] Yu Suhua, Zhu Zhaoyu, Li Bingyuan, *et al*. Preliminary discussion about climate indicated by element Fe recorded in the lacustrine core at Tianshuihai Lake, Tibetan Plateau for the last 230ka years [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1998, 18(3): 63~68 [余素华, 朱照宇, 李炳元, 等. 23 万年以来青藏高原甜水海湖岩心铁元素的气候记录刍议 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(3): 63~68]
- [32] Xue Bin, Wang Sumin, Wu Jinglu, *et al*. Palaeoclimate of northeastern Qinghai-Xizang (Tibetan) Plateau since Last Interglaciation: A case study from Core RM of the Zoige Basin [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1999, 30(3): 327~332 [薛滨, 王苏民, 吴敬禄, 等. 青藏高原东北部末次间冰期以来的古气候——以若尔盖盆地 RM 孔分析为例 [J]. 海洋与湖沼, 1999, 30(3): 327~332]
- [33] Wu Jinglu, Li Shijie, Wang Sumin, *et al*. Modern climatic signals recorded in Xincuo Lake sediments in Zoige Basin, eastern Tibetan Plateau, China [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(4): 291~296 [吴敬禄, 李世杰, 王苏民, 等. 若尔盖盆地地槽湖沉积记录揭示的近代气候与环境 [J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 291~296]
- [34] Shen Ji, Zhang Enbu, Xia Weilan. Records from lake sediments of the Qinghai Lake to mirror climatic and environmental changes of the past about 1000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(6): 508~513 [沈吉, 张恩楼, 夏威岚. 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]
- [35] Zhu Liping, Chen Ling, Li Bingyuan, *et al*. Environmental changes reflected by the lake sediments of the South Hongshan Lake, Northwest Tibet [J]. *Science in China (Series D)*, 2002, 45(5): 430~439 [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, 2001, 31(7): 601~607]
- [36] Wu Jinglu, Wang Sumin, Shi Yafeng, *et al*. Temperature estimation by oxygen-stable record over the past 200ka in Zoige Basin [J]. *Science in China (Series D)*, 2000, 43(6): 577~586 [吴敬禄, 王苏民, 施雅风, 等. 若尔盖盆地 200 ka 以来氧同位素记录的古温度定量研究 [J]. 中国科学 (D 辑), 2000, 30(1): 73~80]
- [37] Wu Yanhong, Wang Sumin, Xia Weilan, *et al*. Quantitative reconstruction of the temperature and precipitation since 1770AD for the Cuoh'e Lake, central Tibetan Plateau [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2003, 23(4): 115~120 [吴艳宏, 王苏民, 夏威岚, 等. 1770 年以来青藏高原错鄂地区古气候定量恢复 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(4): 115~120]
- [38] Wu Jinglu, Wang Sumin. Environmental characteristics showed by  $\delta^{18}\text{O}$  and  $\delta^{13}\text{C}$  of authigenic carbonate in Core RM from Zoige Basin [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1997, 17(4): 63~71 [吴敬禄, 王苏民. 若尔盖盆地 RM 孔自生碳酸盐  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{13}\text{C}$  记录所揭示的环境演化特征 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 1997, 17(4): 63~71]
- [39] Sun Guangyou, Luo Xinzhen, Turner R E. A study on peat deposition chronology of Holocene of Zoige Plateau in the northeast Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Acta Salinientologia Sinica*, 2001, 19(2): 177~182 [孙广友, 罗新正, Turner R E. 青藏东北部若尔盖高原全新世泥炭沉积年代学研究 [J]. 沉积学报, 2001, 19(2): 177~182]
- [40] Zhu Zhaoyu, Gu Debing, Luo Shangde, *et al*. Uranium Series dating on lacustrine sediments from Lake Tianshuihai, Tibetan Plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(2): 163~167 [朱照宇, 顾德隆, 罗尚德, 等. 青藏高原甜水海湖泊沉积物铀系等时线测年 [J]. 科学通报, 2001, 46(2): 163~167]
- [41] Zhou Weijian, Lu Xuefeng, Wu Zhenkun, *et al*. Peat records and radiocarbon AMS dating about climatic change at Zoige Plateau in Holocene [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(12): 1040~1044 [周卫建, 卢雪峰, 武振坤, 等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年 [J]. 科学通报, 2001, 46(12): 1040~1044]
- [42] Jia Yulian, Wang Sumin, Wu Yanhong, *et al*. Preliminary study of lake evolution and precipitation of Zgetangco and Coe basins, central Qinghai-Xizang Plateau since 24 ka B.P. [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(3): 283~294 [贾玉连, 王苏民, 吴艳宏, 等. 24 ka B.P. 以来青藏高原中部湖泊演化及古降水量研究——以兹格塘错和错鄂为例 [J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 283~294]
- [43] Zhang Pingzhong, Wang Xianbin, Chen Jianfa, *et al*. Hydrogen index and  $\delta^{13}\text{C}$  value of lacustrine organic matter in Core RH in Zoige Basin, Tibetan Plateau [J]. *Science in China (Series B)*, 1995, 25(6): 631~638 [张平中, 王先彬, 陈践发, 等. 青藏高原若尔盖盆地 RH 孔沉积有机质的  $\delta^{13}\text{C}$  值和氢指数记录 [J]. 中国科学 (B 辑), 1995, 25(6): 631~638]
- [44] Ding Z L, Yu Z, Rutter N W, *et al*. Towards an orbital time scale for Chinese loess deposits [J]. *Quaternary Science Reviews*, 1994, 13: 39~44
- [45] Shi Yafeng, Liu Xiaodong, Li Bingyuan, *et al*. Extra-strong summer monsoon event at Tibetan Plateau, during 40~30 ka and its correlation with precession period [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1999, 44(14): 1475~1480 [施雅风, 刘晓东, 李炳元, 等. 距今 40~30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系 [J]. 科学通报, 1999, 44(14): 1475~1480]
- [46] Li Bingyuan. The last greatest lakes on the Xizang (Tibetan) Plateau [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(2): 174~182 [李炳元. 青藏高原大湖期 [J]. 地理学报, 2000, 55(2): 174~182]
- [47] Jia Yulian, Shi Yafeng, Fan Yunqi. Water balance of Paleolake Qinghai and its precipitation estimation at three high lake-level stages since 40 kaBP [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2000, 12(3): 182~192 [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): 182~192]
- [48] Liu Guangxiu, Wang Rui, Li Shijie, *et al.* Palynological evidence of ecological environment changes since 240 ka BP for the Tianshu Lake, west Kunlun Mountains [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1998, 20(1): 21~24 [刘光秀, 王睿, 李世杰, 等. 西昆仑山甜水湖 24 万年以来生态环境演化的孢粉学证据 [J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 21~24]
- [49] 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]
- [50] Fang Jinqi. Lake revolution during the past 30 000 years in China and its implication for environmental change [J]. *Quaternary Research*, 1991, 36: 37~60
- [51] Yu Ge, Xue Bin, Wang Sumin, *et al.* Lacustrine records in China during the Last Glacial Maximum and their climatic significance [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, 45(3): 250~255 [于革, 薛滨, 王苏民, 等. 末次盛冰期中国湖泊记录及其气候意义 [J]. 科学通报, 2000, 45(3): 250~255]
- [52] Li Shuanke, Li Shijie. Lake transgression and reasons during Last Glaciation Maximum on the north margin of Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1991, 13(4): 299~306 [李拴科, 李世杰. 青藏高原北缘末次冰期最盛时期的湖侵及其原因 [J]. 冰川冻土, 1991, 13(4): 299~306]
- [53] Gasse F, Amokr M, Fontes J C, *et al.* A 13, 000-year climate record from western Tibet [J]. *Nature*, 1991, 353(24): 742~745
- [54] Li Yuanfang, Zhang Qing-song, Li Bingyuan, *et al.* Ostracod fauna and environmental changes during the past 17 000 years in the western Tibet [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(1): 46~54 [李元芳, 张青松, 李炳元, 等. 青藏高原西北部 17 000 年以来的介形类及环境演变 [J]. 地理学报, 1994, 49(1): 46~54]
- [55] Hu Dongsheng, Zhang Huajing, Li Bingyuan, *et al.* Palaeoclimatic oscillation events of the Dryas period—evidence from the record of lake records of late sediments in the interior of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Acta Geologica Sinica*, 2002, 76(2): 272~278 [胡东生, 张华京, 李炳元, 等. 青藏高原腹地湖泊沉积记录的“仙女木期”古气候颤动事件 [J]. 地质学报, 2002, 76(2): 272~278]
- [56] Kutzbach J E, Street-Perrott F A. Milankovitch forcing of fluctuations in the level of tropical lakes from 18 to 0 kyr BP [J]. *Nature*, 1985, 317: 130~134
- [57] Paul A M, Eelco E R, Stager J C, *et al.* Holocene climate variability [J]. *Quaternary Research*, 2004, 62: 243~255
- [58] Huang Cixuan, Van C E, Li Shuanke. Holocene environmental changes of western and northern Qinghai-Xizang Plateau based on pollen analysis [J]. *Acta Micropaleontologica Sinica*, 1996, 13(4): 423~432 [黄赐璇, 冯·康波·艾利斯, 李拴科. 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]
- [59] Li Bingyuan, Li Yuanfang, Kong Zhaochen, *et al.* 20 000 years environmental changes of the Gonong Co. in Hoh Xil 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近二万年来的环境变化 [J]. 科学通报, 1994, 39(18): 1727~1728]
- [60] Li Shijie, Jiao Keqin. Glaciation variations on the south slope of west Kunlun Mountains since 30 000 years [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1990, 12(4): 311~318 [李世杰, 焦克勤. 3 万年来西昆仑山南坡的冰川变化 [J]. 冰川冻土, 1990, 12(4): 311~318]
- [61] Richard B A, Anna M á. The 8k event—cause and sequence of a major Holocene abrupt climate change [J]. *Quaternary Science Review*, 2005, 24: 1123~1149
- [62] Liu Guangxiu, Shen Yongping, Wang Sumin. The vegetation and climate of Holocene Megathermal in Zoige, northwestern Sichuan, China [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1995, 17(3): 247~249 [刘光秀, 沈永平, 王苏民. 全新世大暖期若尔盖的植被与气候 [J]. 冰川冻土, 1995, 17(3): 247~249]
- [63] Yu Ge, Wang Sumin. Eurasian lake-level records and changes in patterns of atmospheric circulations during the last 20 000 years [J]. *Quaternary Sciences*, 1998, 4: 360~367 [于革, 王苏民. 欧亚大陆湖泊记录和两万年来大气环流变化 [J]. 第四纪研究, 1998, 4: 60~367]
- [64] Shi Yaofeng, Yao Tandong, Yang Bao. Decadal climatic variations recorded in Guliya ice core and comparison with the historical documentary data from east China during the last 2 000 years [J]. *Science in China (Series D)*, 1999, 42 (supp.): 91~100 [施雅风, 姚檀栋, 杨保. 近 2 000 年古里雅冰芯 10 米尺度的气候变化及其与中国东部文献记录的比较 [J]. 中国科学 D 辑, 1999, 29 (增刊 1): 79~86]
- [65] Wang Sumin, Li Jianren. Lacustrine sediments—a effective method to study on historical climate [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1991, 36(1): 54~56 [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]
- [66] Wang Yunfei. Lacustrine carbonate chemical sedimentation and climatic—environmental evolution—a case study of Qinghai Lake and Daihai Lake [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1993, 24(1): 31~36 [王云飞. 青海湖、岱海的湖泊碳酸盐化学沉积与气候环境变化 [J]. 海洋与湖沼, 1993, 24(1): 31~36]
- [67] Li Shijie, Wang Xiaotian, Xia Weikan, *et al.* The little ice age climate fluctuations derived from lake sediments of Goulucuo, Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Quaternary Sciences*, 2004, 24(5): 578~584 [李世杰, 王小天, 夏威岚, 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): 578~584]
- [68] Wang Xiaotian, Li Shijie. Environment changes revealed by modern lake sediment in Couli Co. Tibetan Plateau [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2002, 14(3): 217~222 [王小天, 李世杰. 青藏高原苟鲁错近几十年环境变化的湖泊沉积记录 [J]. 湖泊科学, 2002, 14(3): 217~222]
- [69] Wu Jingli, Wang Sumin. Statistical detection of the organic matter  $\delta^{13}\text{C}$  recorded in Core RH in Zoige Basin [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1997, 9(4): 289~294 [吴敬禄, 王苏民. 若尔盖盆地 RH 孔有机碳同位素序列指示的古气候事件诊断 [J]. 湖泊科学, 1997, 9(4): 289~294]
- [70] Li Wanchun, Li Shijie, Pu Peimin. Estimates of plateau lake evaporation—a case study of Zoige Tangco [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2001, 13(3): 227~232 [李万春, 李世杰, 濮培民. 高原咸水湖



## Researches on Lacustrine Sediments in Tibetan Plateau and Their Progress

Shoubing Yu<sup>1, 2</sup>, Shijie Li<sup>1</sup>, Jifeng Liu<sup>1, 2</sup>

( 1 *Nanjing Institute of Geography and Linology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

*2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences Beijing 100039, China )*

**Abstract** Researches on lacustrine sediments in Tibetan Plateau have been mainly focused on the uplift of Tibetan Plateau and their reflection to global change. Fruits achieved till now indicate that the uplift of Tibetan Plateau is characteristic of whole stage acceleration in later period. Climate was reconstructed during middle-late Pleistocene and last interglacial and glacial in accordance with that recorded by oxygen isotope in cores from ice and deep sea. Nevertheless, regional differences such as strong warm-wet during MIS3 and cold-wet during Last Glacial Maximum, are also shown. The Younger Dryas event is clearly reflected by lacustrine sediments. Studies on Holocene indicate warm-humid climate and occurring cooling events during early period, high lake-levels during the megathermal period, and advance toward cold-dry during late period. Quantitative researches on depositing environments have been developed for recent years. More studies should be strengthened on high-resolution varved sediments and basic theories on quantitative analysis of proxy indicators.

**Key words** Tibetan Plateau; lacustrine sediments; research progress