

湖泊沉积研究的历史进展与展望*

沈 吉

(中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

摘 要: 回顾了国际和国内湖泊沉积研究历史, 论述了国际古湖泊学研究的两大方向以及主要研究内容, 对中国 20 世纪 50 年代以来的湖泊沉积研究进行了综述. 针对目前湖泊沉积研究领域的薄弱环节, 提出加强湖泊沉积环境指标的基础理论研究, 提高时间分辨率, 关注人类活动对湖泊环境的影响, 开展湖泊沉积界面过程与机理研究, 以及进一步加强区域和全球对比等建议与展望.

关键词: 湖泊沉积; 历史进展; 展望

Progress and prospect of palaeolimnology research in China

SHEN Ji

(State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

Abstract: Historical developments of palaeolimnology study abroad as well as in China are reviewed. Two aspects in international palaeolimnology studies were expatiated. The author summarizes the progress of palaeolimnology study since 1950s. To make further progress in palaeolimnology studies, it was also suggested to make efforts in the basic study of lacustrine indexes, improve time-scale resolution, consider human impact on lake environment, carry out the study of water-sediment interface and establish regional archives for environment change and correlate them with global records.

Keywords: Palaeolimnology research; historical progress; prospect

湖泊是陆地水圈的重要组成部分, 与大气圈、生物圈和岩石圈有着不可分割的密切关系, 是各圈层相互作用的连接点. 作为一个相对独立的体系, 湖泊经历了较长的地质历史, 其连续的沉积和沉积物中保存的丰富信息, 加上较高的沉积速率, 使湖相地层可提供区域环境、气候和事件的高分辨率连续记录, 从而成为全球气候环境变化研究的重要载体^[1]. 其次, 湖泊沉积研究还具有重要的经济价值, 湖泊沉积中赋存有多种矿产资源, 例如石油、天然气、煤、泥炭、蒸发盐类矿产和沉积铀矿等^[2].

现代湖泊沉积研究表明, 在陆相沉积体系中, 湖泊尽管在形态、大小、成因和发育阶段上有着很大差异, 但是它们的沉积作用都是在天然封闭或半封闭的贮水盆地中发生的, 故有别于其他陆相环境的沉积特点. 陆源碎屑沉积是湖泊沉积的主要类型, 其物质输移主要通过河流搬运作用, 入湖后的沉积过程受湖泊环境系统控制, 包括水下地形、水动力条件、水生植被、湖水性质和湖泊分层状况等. 湖盆中物理沉积和化学沉淀是湖泊沉积的主要形式, 在暖湿地区的浅水湖泊中, 生物也积极参与了沉积作用, 甚至成为加速湖泊充填和消亡的重要因素. 湖泊沉积是湖泊物理、化学、生物作用的综合产物, 它是通过大气、水、沉积界面的物质和能量交换进行的, 在这个过程中, 可能某些环境因素起着主导作用, 但是在很多情况下, 它们往往是相互作用和共同影响的^[3].

1 国际湖泊沉积研究历史

湖泊沉积研究始于 19 世纪末叶, 最初的研究主要在美国西部两个更新世洪积湖盆, 以 1885 年 Russel

* 国家杰出青年科学基金(40625007)资助. 2008-09-09 收稿; 2008-12-16 收修改稿. 沈吉, 男, 1963 年生, 博士, 研究员; E-mail: jishen@niglas.ac.cn.

对内华达州西部更新世 Lahontan 湖, 和 1890 年 Gilbert 对犹他州大盐湖前身更新世 Bonneville 湖的成果发表作为标志. 到 20 世纪 20 年代, 湖泊沉积研究又有了新的进展, 1920 年 Nipkow 用简单的玻璃管采样器在苏黎世湖采集了第一筒岩芯, 并分析了沉积物的内部特征; 1932 年 Heim 详细地记录和描述了瑞士主要湖泊(苏黎世湖、卢塞恩湖、侏格湖等)在历史时期一些灾变事件中所引起的再沉积作用. 50 年代湖泊沉积研究得到了较大发展, Kullenberg 1952 年第一次从苏黎世湖取得了长 8.5m 的岩芯, 并进行了较系统的化学和孢粉分析, 揭示了冰后期以来湖泊演化历史和营养条件的改变, 这一工作预示湖泊沉积研究在采样技术和研究内容上孕育着一次大的变革. 接着 Hutchinson 发表了他的名著《论湖泊学》, 对湖泊学的内容进行了较全面的论述, 其中对湖泊的成因分类相当详尽, 并有精细的描述, 该书至今仍有重要的参考价值^[4]. 美国绿河页岩的古湖泊研究在陆相生油和古环境重建两方面都具有特殊意义, 这套始新世中、晚期地层号称是全球最大非海相碳酸盐沉积^[5]. 尽管形成绿河组地层的湖泊究竟是季节性干涸的浅湖^[6], 还是水体分层的深湖^[7]一直存在争议, 但它确实为非海相含油盆地的古湖泊研究奠定了基础. 70 年代后期以来, 古湖泊学在国际地学界备受重视. 国际古湖泊学研究有两大方向: 其一是以古气候演变及其趋势预测和环境保护为目标, 基本在湖泊沉积的晚第四纪地层中进行; 其二是以盆地构造、油气形成和地质演化为重点, 主要在构造湖泊的中新生代地层中展开^[8].

晚第四纪古湖泊学研究最多的是欧美末次冰期形成的大小湖泊, 探讨的问题从集水盆地的气候变迁到湖水本身的演化、富营养化, 它们在当今世界古湖泊学文献中占多数, 早年的教材和近年的一些文集往往都是讨论晚第四纪古湖泊学的^[9-11]. 1967 年开始举办的国际古湖泊学术讨论会一直在欧洲举行; 1988 年创刊每年两卷六期的 *Journal of Paleolimnology* 在北美主编西欧出版, 重点都在晚第四纪. 一些重要的古湖泊学研究计划也在欧美实施, 如 1980 年许靖华教授主持的瑞士苏黎世湖钻探计划“Zübo 80”, 随后开展的“近代湖泊酸化古生态研究(PLEADS)”计划等; 其它地区规模较大的研究工作有“澳洲干旱区盐湖(SLEADS)”等. 这些以晚第四纪、甚至全新世湖泊沉积为对象的研究在学术思想和研究方法上对于后期的全球变化研究有重要贡献.

与含油气盆地直接相关的是构造湖泊的沉积学研究, 其中首先是非洲的裂谷湖泊. 法、德、英、美等国的地质工作者对非洲裂谷湖泊的构造、沉积、环境变迁与生物群演化等方面开展了深入研究, 80 年代初期, 拟定了“古老湖泊的气候、演化与地球动力学研究计划”(CEGAL), 准备对非洲裂谷湖泊像深海钻探那样开展湖泊钻探. 作为先期工作, 用 NYANJA 号船在东非湖泊完成了大量地震测线, 同时进行浅钻和分析, 其目的方面在于了解裂谷盆地的构造特征和东非人类出现的环境背景, 另一方面也了解构造湖盆形成油气的可能与特征. 随后进行的国际贝加尔湖研究计划, 也包含有类似的目的. 这些工作在后期的含油盆地研究中, 如美洲东部中生代早期的一系列 Nework 湖盆得以运用^[12].

欧洲从 20 世纪 80 年代后期开展了玛珥湖的研究, 包括 GEOMAARS(1986-1989 年)和 EUROMAARS(1990-1993 年)等研究计划, 旨在获取以年甚至于季节为时间尺度的高分辨率古气候记录. 长而连续的湖泊沉积物年纹层序列为理解末次冰消期以来的气候变化特征和动力学机制提供了难得的条件^[13], 根据欧洲、北美和日本等地区年纹层发育的湖泊沉积物的研究结果, 相继建立了多个长时间序列的纹层年代学时间标尺, 其中德国 Holzmaar 玛珥湖拥有欧洲大陆上目前最长的纹层年代, 可完整地恢复 23220 年以来的历史^[14]; 而根据日本 Suigetsu 湖建立的过去 45000 年的纹层年代学时间标尺是目前为止获得的世界上最长的湖泊年纹层记录^[15]. 高精度的纹层年代为气候突变事件研究提供了重要依据, 例如 Brauer 等^[16]根据德国 Meerfelder 玛珥湖的纹层年代, 获得 Younger Dryas 开始时间为 12680aBP, 结束时间为 11590aBP, 持续的时间长度为 1025-1090 年; Zolitschka 等^[17]根据 Holzmaar 玛珥湖的沉积学证据和纹层年代, 确定了作为区域标志层的德国 Ulmener Maar Tephra(UMT)的喷发年龄为 10895±170 纹层年. 湖泊沉积物年纹层还可用于重建大气 ^{14}C 浓度变化历史, 并为区域古地磁场长期变化主曲线(Master curve)的重建提供依据. 如 Hajdas 等^[18]研究了瑞士 Soppensee 湖和德国 Holzmaar 玛珥湖记录的 ^{14}C 浓度变化, 获得了约 13000 年以来的 ^{14}C 校正曲线; Ojala 和 Saarinen 根据芬兰中部 Nautajarvi 湖沉积物年纹层建立了过去大约 10000 年来的古地磁场长期变化曲线, 大大增加了其作为区域古地磁场参考曲线的可靠性^[19].

2 中国湖泊沉积研究进展

我国湖泊沉积研究始于20世纪20年代,20-40年代我国科学家开展了太湖、洞庭湖、鄱阳湖、滇池及兴凯湖的水文测验,进行了部分湖泊(如洪泽湖、太湖)的形态测量^[20]。在湖泊地质地貌方面,考察了青海湖的自然地理与地质,也调查过罗布泊^[21-22]。中国科学院于1957年11月召开湖泊科学工作座谈会,决定开展湖泊研究工作,随后中国科学院地理研究所于1958年6月在南京成立湖泊研究室。

20世纪50年代后期以来,对青海湖、察尔汗、茶卡、大柴旦等高原咸水湖^[23-24],太湖、鄱阳湖、巢湖、洞庭湖^[25-28]等长江中下游淡水湖,和云南抚仙湖、滇池、洱海^[29-30]等断陷湖泊进行了综合调查,其中包括湖泊沉积和湖泊演化的内容。由此,从湖盆成因到集水域气候记录,从湖盆三角洲到湖泊浊流等做出了一批研究成果。80年代开始,随着全球变化研究热潮的兴起,湖泊沉积研究日渐广泛。如:柴达木盆地察尔汗盐湖沉积特征与古气候演化^[31]、青海湖冰后期以来古气候波动模式^[32]、内蒙岱海末次冰期以来的环境变迁^[33]、新疆巴里坤湖全新世环境演变^[34]等晚第四纪湖泊研究,为湖泊沉积与环境演化提供了十分宝贵的资料。该领域研究还采用了新的技术和方法,如:稳定同位素^[32]、环境磁学^[35]等。同时,针对油气勘探的国家需求,对陆相含油盆地、中生代湖相地层和湖泊沉积的岩相古地理等开展研究,探索了含油区湖相油源岩的形成^[36-37]、断陷盆地的演变过程等^[30]。

80年代末至90年代以来,湖泊沉积研究得到了蓬勃发展。在全球变化和国际大陆钻探计划的影响和倡导下,我国先后在不同地貌阶梯上实施了湖泊钻探:如青藏高原东北缘若尔盖古湖^[38](1995年,310m)、高原中部错鄂^[39](1999年,197m)、西南季风区云南鹤庆古湖^[40](2002年,737m)、内陆干旱区罗布泊(2003年,800m)、青海湖国际钻探(2005年,1000m)等,由此获得了百万年以来长时间尺度湖泊环境演化和古气候变化的信息,揭示了青藏高原隆升的环境效应,以及不同地貌阶梯响应的差异。同时,以古季风理论为指导,开展了以晚第四纪为主的环境演变研究:最初集中在季风过渡带,如:内蒙岱海、青海湖、黄旗海等^[41-44];然后向季风盛行区和西北干旱区扩展,包括:西南季风区位于云贵高原的云南洱海、滇池、星云湖^[45-48],贵州草海、红枫湖^[49-50];东南季风区位于长江中下游的太湖、巢湖、鄱阳湖、固城湖、龙感湖、南四湖等^[51-57]。西北干旱区的湖泊包括新疆艾比湖、博斯腾湖、巴里坤湖等^[58-60]。该方面的研究指示了季风区、过渡区、西风区的环境演化过程存在明显的差异。值得注意的是,距今8-6ka在三个地区都呈现水热条件的最佳组合,6ka的古气候模拟也表明受季风影响的范围扩大;相反距今4ka以后,由于夏季风的急剧退缩,季风区和过渡区表现出明显趋干,而西风区却呈现有效湿度增加趋势。在末次盛冰期时,三个地区都表现出湖泊干涸,被河流沉积取代的特点。该时期青藏高原湖泊沉积的研究也得到了进一步加强,包括兹格塘错、沉错、普莫雍错^[61-63]等。在国际合作带动下,我国玛珥湖的研究也在东北和华南展开,如:四海龙湾、湖光岩^[64-65]等。就全国范围的晚第四纪湖泊环境研究而言,氧同位素三阶段(MIS3)的环境是引人关注的,国际上也将其作为专题加以研究。继腾格里大湖提出之后^[66],最近又报导了河套大湖^[67],青藏高原该期的湖泊扩张也多有论述^[68],甚至认为是一个泛湖期。最近青海湖的深入研究,没有发现该时期存在高湖面的直接证据,黄土高原的黄土记录也未反映出湿润环境的特点,因此,三阶段的气候环境格局有其复杂性,有待深入探讨。在上述研究工作基础上,建立了晚第四纪中国古湖泊数据库,并运用古气候模拟方法,探讨大气环流格局与水汽输送途径,揭示不同地质历史时期古气候变化的动力学机制^[69]。

在开展湖泊环境自然演化及其古气候记录研究的同时,人们日益认识到人类活动对湖泊环境的影响及其在湖泊沉积中的记录。对北京昆明湖沉积岩芯的高分辨率研究发现,八国列强火烧圆明园的事件在湖泊沉积记录中表现为相应时段岩芯中出现大量碳屑^[70];山东南四湖沉积岩芯记录了黄河泛滥和河道变迁的历史^[71];云南滇池现代湖泊沉积反映了该湖富营养化和重金属污染的过程^[72]。由此,近年来湖泊沉积作为流域污染历史和水体富营养化记录载体的研究蓬勃展开,该领域研究将湖泊沉积记录与现代湖泊过程相结合,通过湖泊(尤其是大型浅水湖泊)沉积-再悬浮-再沉积过程中营养盐和污染物的迁移转化^[73]、界面理化特征及其对沉积环境的控制^[74]、生物和微生物的影响^[75]等,揭示湖泊水体的自然富营养化和人为富营养化过程^[76],以及流域-湖泊污染的历史^[77],探讨人类活动驱动下的湖泊环境响应。

3 湖泊沉积研究展望

尽管湖泊沉积研究在油气资源开发、全球环境演变以及流域污染历史等领域发挥了重大作用,但随着研究工作的深入,湖泊沉积研究也呈现出若干不足与问题,这些问题包括:环境指标的多解性、时间分辨率、人类活动的影响、沉积界面效应、区域响应差异等.为此,本文对湖泊沉积研究展望提出如下刍议:

3.1 加强湖泊沉积环境指标的基础理论研究,探索环境指标与气候要素之间的定量关系

现有湖泊沉积多种环境指标研究发现,不同指标指示的环境意义十分复杂,单项指标或多或少都带有混合信息.如湖泊沉积物中粗颗粒成分既反映气候干旱期湖泊萎缩,又可反映气候湿润期增强的地表径流携带大量粗颗粒物入湖^[78].为此,现阶段应在加强湖泊现代过程研究的基础上,深入理解指标的物理意义,努力构建指标与环境要素的定量关系,力求在气候要素的定量重建方面取得突破.如在流域范围内建立地表花粉-功能性植被-气候要素相关模型,定量解译湖泊沉积岩芯中孢粉指标反映的湖区气候特征;对湖泊中微体生物进行实验培养,建立其壳体微量元素与湖水盐度之间的定量关系,通过湖泊沉积岩芯中微体生物壳体的微量元素(如介形类壳体 Sr/Ca、Mg/Ca 等比值)定量重建湖水古盐度;利用生物标记化合物 U^{37k} 定量重建湖泊古温度等.在古环境定量重建方法研究中引入数理统计方法,如采用典型对应分析(CCA)获取环境变量的重要性及其方差排序等.

3.2 提高时间分辨率解决沉积岩芯的“碳库效应”

目前对长时间尺度湖泊沉积岩芯的定年通常采用古地磁方法,短时间尺度的湖泊沉积岩芯采用 ^{14}C 定年,对于更短时间内的湖泊近代沉积则采用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 沉积速率计算方法.湖泊沉积岩芯定年中使用频率最高的 ^{14}C 方法,由于岩芯的“碳库效应”常存在测不准现象^[79].现有研究发现,湖泊沉积岩芯的“碳库效应”主要来自两方面^[80]: 其一是硬水效应,即湖水中溶解无机碳(DIC)和大气 CO_2 之间的 ^{14}C 交换不能达到平衡状态,湖泊自生有机质和自生碳酸盐(其碳的来源主要是湖水 DIC)的初始 ^{14}C 比度较同时期大气 ^{14}C 放射性比度偏低,导致其年龄偏老;其二是流域碳库效应,即湖泊沉积物中外源碎屑碳酸盐受湖区基岩和流域搬运碳酸盐老碳的影响.为此,对湖泊沉积岩芯采用 ^{14}C 定年时,应尽量采用陆源有机残体样品,在研究中将 ^{14}C 年龄转换为日历年龄时选用海洋纹泥校正曲线而不是树轮校正曲线,因为大气 CO_2 浓度的波动对海洋碳库的影响较小.对于采用 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 方法计算沉积速率,建议使用冷冻取芯方法,提高样品的分辨率,同时采用沉积通量计算方法,剔除沉积速率变化对定年的影响.多种测年方法(U系测年、释光测年、火山灰定年等)的校核也是解决碳库效应的途径之一.

3.3 关注人类活动对湖泊环境的影响,提取湖泊沉积记录的流域事件信息

历史时期湖泊沉积记录了人与自然相互作用的演变过程,基于湖泊沉积记录的连续性,可弥补历史记载的不足.然而,湖泊沉积记录的是自然演变和人类活动的混合信息,如何从环境指标中识别人类活动的信息,区分自然演变和人类活动影响的分量,是湖泊沉积研究的重要方向之一.较长期以来主要关注人类活动与湖泊环境变化的关系,充其量只能定性判识人类影响的强弱,难以定量区分人类影响的分量.最近的研究表明,要分辨出人与自然各自的影响量,首先要分别建立定量表述人类活动的指标序列(人口、耕地等)、自然变化序列(温度、降水等)和湖泊环境定量变化序列,将三者进行统计分析,由此区分自然演变和人类活动的分量.

当前我国湖泊的环境问题突出表现为湖泊富营养化和底泥复合污染.富营养化治理需要了解湖泊的营养本底,利用湖泊沉积重建湖泊的准自然营养本底,以及营养水平不断升高的过程可为富营养湖泊提供不同阶段治理的目标.其次,对湖泊底泥中污染物类型和蓄积历史的研究,有助于发现和正确评价湖泊污染源的变化,从而为湖泊污染治理提供科学依据.上述研究是针对国家需求湖泊沉积亟待发展的领域.

3.4 开展动力条件下湖泊沉积的界面研究,探索环境指标的埋藏特征

湖泊水-沉积物界面过程研究较长期以来主要在深水湖泊的静态释放条件下展开,大型浅水湖泊由于界面的不稳定性,研究难度很大.现有研究发现,在风浪搅动条件下,沉积物-水界面发生着许多重要的物理、化学和生物过程,是控制和调节湖泊水体和沉积物之间物质输送和能量交换的主要场所.从沉

积物表层向下 15cm 是环境梯度(pH、Eh、溶解氧等)变化最大的部位,该深度不同层位的环境特征控制着沉积物中矿物成分、元素价态和生物种群(包括微生物)的组成.研究发现,沉积物-水界面的 Fe-Mn 循环受界面季节性缺氧环境的影响,并伴随微量金属元素的再迁移,Fe-Mn 循环的中断记载了湖泊环境经历剧烈变化的信息^[81];界面营养物质的平衡主要由沉积物和孔隙水中溶解组分参与,界面内发生的物理和生物作用可影响沉积物在水平和垂向上的分布,如进入沉积物中的磷,一部分可能矿化形成稳定矿物而被永久埋藏,另一部分可能被活化并通过间隙水再次迁移到水体中,被生物吸收利用而进入湖泊生态系统的物质循环^[82].湖水-沉积物体系的碳循环研究认为,湖泊中植物光合-吸收作用与有机质降解是控制含碳物质碳同位素组成的决定因素^[83].其次,环境指标在经历界面过程后保存于一定深度的沉积物中,界面过程对环境指标产生多大影响是定量重建古环境必须考虑的问题.如沉积物中的硅藻,由于其保存度受多种因素影响,不是所有的硅藻种类都可以在湖泊沉积中有保留,如果忽略一些没有保存在沉积物中的优势硅藻种属,必然影响古环境的重建.据目前对硅藻埋藏学的研究发现,不同种类的硅藻死亡后沉入水底并经历界面过程后,损失率差异较大,揭示不同种类硅藻的损失率并校正环境重建模型,是提高古环境重建准确度的必要前提.湖泊水-沉积物界面过程的研究不仅关系到对现代环境机理的认识,对古环境的认识也具有重要意义.

3.5 进一步加强中国第四纪湖泊数据库建设,推动古气候动力学研究

通过湖岸地貌、湖泊沉积和生物地层等地学证据恢复的湖泊水位记录,区域湖泊水位的变化可以客观反映大气降水和有效湿度.国际湖泊数据库研究始于 20 世纪 70 年代后期,依据不同区域多个湖泊水位的同步变化,建立区域乃至全球性古湖泊数据库,有可能提供全球变化的信息.全球古湖泊数据库已成功应用于恢复晚第四纪以来的气候和大气环流系统的时空变化,并为检验评价和改进大气环流模型提供了科学依据^[84].中国湖泊水位数据库(CLLDB)的研究处于起步阶段,中国湖泊众多,分布广泛,有关湖泊的第四纪研究为建立湖泊水位数据库提供了基础.中国第四纪湖泊水位数据库的研究可为重建东亚季风环流和季风时空变迁提供地质证据,湖泊沉积记录的古植被信息可为古大气环流模拟提供大陆下垫面边界条件,为评价和改进古气候模型提供科学依据.其次,选择晚第四纪典型时段,进行古气候模拟,并运用区域湖泊水位资料,对模拟结果进行比较与验证,可揭示大气环流格局与水汽输送途径,对不同区域气候特点进行动力学阐述.

3.6 继续开展不同气候区高分辨率环境演化记录的对比研究,揭示全球变化的区域响应差异

虽然 20 世纪 80 年代后期以来,在广大地学工作者的努力下,建立了我国不同气候区多个湖泊环境演化的时间序列,但由于分辨率不一致,且当时采用的环境指标也不尽相同,给环境演化序列的比较和空间分异规律的研究带来较大困难.此外,就单个湖泊而言,其流域的空间范围一般较有限,湖泊沉积记录的环境变化信息在一定程度上带有地域性.为此,在继续开展不同气候区高分辨率环境演化研究的同时,应结合全球与区域气候模型,并与其它地质记录(如:黄土、冰芯、树轮、历史记载等)进行比较研究,通过综合对比分析,区分全球性、区域性和地方性的环境变化信息,结合模拟结果,揭示全球环境变化的时空特征,给予气候动力学的机理阐释.

致 谢: 王苏民研究员阅读全文,并提出了宝贵的意见,在此深表感谢!

4 参考文献

- [1] 王苏民,张振克.中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展.科学通报,1999,44(6): 579-587.
- [2] Pu P, Tu QY, Wang SM. Progress of limnology in China. *Chin J Oceanol Limnol*, 1991, 9(3): 193-206.
- [3] 霍坎松 L, 杨 松 M 著.郑光膺译.湖泊沉积学原理.北京:科学出版社,1992.
- [4] Hutchinson GE. A treatise on limnology. I .geography, physics and chemistry. New York: John Wiley & Sons, 1957.
- [5] Bradley WH. Paleolimnology. In: Fred DG ed. Limnology in North America. New York: John Wiley & Sons, 1963: 371-392.
- [6] Surdam RC, Wolfbauer CA. Green River Formation, Wyoming: a playa-lake complex. *Bull Geol Soc Amer*, 1975, 86: 335-345.
- [7] Desborough GA. A biogenic-chemical stratified lake model for the origin of oil shale of the Green River Formation: an alternative to the playa-lake model. *Bull Geol Soc Amer*, 1978, 89: 961-971.
- [8] 汪品先,陈嘉树,刘传联等.古湖泊学译文集.北京:海洋出版社,1991.
- [9] Reeves CC Jr. Introduction to paleolimnology. Elsevier, 1968: 210.

- [10] Lerman A. Lakes-chemistry, geology, physics. Springer-Verlag, 1978: 363.
- [11] Haworth EY, Lund JWG. Lake sediments and environmental history. Leicester Univ Press, 1984: 412.
- [12] Gray J. Aspects of freshwater paleoecology and biogeography: introduction. *Palaeo Palaeo Palaeo*, 1988, **62**(1/4): vii-ix.
- [13] Zolitschka B, Negendank JFW. High-resolution records from European Lake. *Quaternary Science Reviews*, 1999, **18**: 885-888.
- [14] Zolitschka B, Brauer A, Negendank JFW *et al.* Annually dated late Weichselian continental paleoclimate record from the Eifel, Germany. *Geology*, 2000, **28**(9): 783-786.
- [15] Nakagsawa T, Kitagawa H, Yasuda Y *et al.* Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the Last Termination. *Science*, 2003, **299**: 688-691.
- [16] Brauer A, Endres C, Günter C *et al.* High resolution sediment and vegetation responses to Younger Dryas climate change in varved lake sediments from Meerfelder Maar, Germany. *Quaternary Science Reviews*, 1999, **18**: 321-329.
- [17] Zolitschka B, Negendank JFW, Lottemoser BG. Sedimentological proof and dating of the Early Holocene volcanic eruption of Ulmener Maar (Vulkaneifel, Germany). *Geologische Rundschau*, 1995, **84**(1): 213-219.
- [18] Hajdas I, Bonani G, Zolitschka B. Radiocarbon dating of varve chronologies: Soppensee and Holzmaar lakes after ten years. *Radiocarbon*, 2000, **42**(3): 349-353.
- [19] Ojala AEK, Saarinen T. Palaeosol variation of the Earth's magnetic field during the last 10000 years based on the annually laminated sediment of Lake Nautajärvi, central Finland. *The Holocene*, 2002, **12**(4): 391-400.
- [20] 李 协. 太湖水洞庭山调查记. 科学, 1926, **11**(12): 1778-1784.
- [21] 陶樊立译. 青海探险. 地质杂志, 1910, **1**(6): 1-7.
- [22] 李长傅译. 罗布泊考. 新亚细亚月刊, 1935, **10**(5): 1-5.
- [23] 中国科学院兰州地质研究所. 青海湖综合考察报告. 北京: 科学出版社, 1979: 270.
- [24] 胡东升著. 察尔汗盐湖研究. 湖南: 湖南师范大学出版社, 2001: 296.
- [25] 孙顺才, 黄猗平. 太湖. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [26] 朱海虹, 张 本著. 鄱阳湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997.
- [27] 屠清瑛, 顾丁锡, 尹澄清等著. 巢湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990.
- [28] 窦鸿身, 姜加虎. 洞庭湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2000.
- [29] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 抚仙湖. 北京: 海洋出版社, 1990: 317.
- [30] 中国科学院南京地理与湖泊研究所. 云南断陷湖泊环境与沉积. 北京: 科学出版社, 1989: 513.
- [31] 陈克照, Bowler JM. 柴达木盆地察尔汗盐湖沉积特征及其古气候演化的初步研究. 中国科学(B辑), 1985, (5): 463-473.
- [32] 张彭熹, 张保珍, 杨文博. 青海湖冰后期以来古气候波动模式的研究. 第四纪研究, 1989, (1): 66-77.
- [33] 王苏民, 吴瑞金, 蒋新禾. 内蒙古岱海末次冰期以来的环境变迁与古气候. 第四纪研究, 1990, (3): 223-232.
- [34] 韩淑堤, 董光荣. 巴里坤湖全新世环境演变的初步研究. 海洋地质与第四纪地质, 1990, **10**(3): 91-98.
- [35] Yu LZ, Oldfield F, Wu Y *et al.* Paleoenvironmental implications of magnetic measurements on sediment core from Kunming Basin, Southwest China. *Journal of Paleolimnology*, 1990, **3**: 95-111.
- [36] 钱 凯, 邓宏文. 西太平洋含油带的湖相沉积与烃类聚集. 石油与天然气地质, 1990, **11**(3): 260-274.
- [37] 邓宏文, 钱 凯. 深湖相泥岩的形成类型和组合演化. 沉积学报, 1990, **8**(3): 1-21.
- [38] 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的比较研究. 中国科学(D辑), 1996, **26**(4): 323-328.
- [39] 沈 吉, 吕厚远, 王苏民等. 错鄂孔深钻揭示的青藏高原中部2.8Ma以来环境演化及其对构造事件响应. 中国科学(D辑), 2004, **34**(4): 359-366.
- [40] 沈 吉, 肖海丰, 王苏民等. 云南鹤庆深钻揭示的区域气候轨道尺度演化. 科学通报, 2007, **52**(10): 1168-1173.
- [41] 沈 吉, Matsumoto R, 王苏民等. 内蒙古岱海古水温定量恢复及其古气候意义. 中国科学(D辑), 2001, **31**(12): 1017-1023.
- [42] Shen J, Liu XQ, Wang SM, Matsumoto R. Palaeoclimatic Changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years. *Quaternary International*, 2005, **136**: 131-140.
- [43] 申洪源, 贾玉琰, 张红梅等. 内蒙古黄旗海湖泊沉积物粒度指示的湖面变化过程. 干旱区地理, 2006, **29**(4): 457-462.
- [44] 孙千里, 周 杰, 彭子成等. 岱海湖泊沉积碳酸盐的高精度铀系测年. 科学通报, 2001, **46**(2): 150-153.
- [45] 沈 吉, 杨丽原, 羊向东等. 全新世以来云南洱海流域气候变化与人类活动的湖泊沉积记录. 中国科学(D辑), 2004, **34**(2): 130-138.
- [46] Sun XJ, Wu Y, Qiao YL. Late Pleistocene and Holocene vegetation history at Kunming, Yunnan Province, southwest China. *Journal of Biogeography*, 1986, **13**: 441-476.
- [47] Whitmore TJ, Brenner M, Song XL. Environmental implication of the late Quaternary diatom history from Xingyun Hu, Yunnan Province, China. *Memoirs of the California Academy of Science*, 1994, **17**: 525-538.
- [48] 宋学良, 吴遇安, 蒋志文等. 云南中部石灰岩地区高原湖泊古湖沼学研究. 昆明: 云南科技出版社, 1994.

- [49] 林瑞芬, 卫克勤. 草海柱样沉积物有机质的记录及其古气候信息. 地球化学, 2000, **29**(4): 390-395.
- [50] 万国江. 红枫湖沉积物 Cs-137 垂直剖面的计年特征及侵蚀示踪. 科学通报, 1990, **35**(19): 1487-1490.
- [51] 孙顺才, 伍贻范. 太湖形成演化与现代沉积作用. 中国科学(B 辑), 1987, (12): 1322-1326.
- [52] Shen J, Liu EF, Zhu YX *et al.* Distribution and chemical fractionation of heavy metals in recent sediments from Lake Taihu, China. *Hydrobiologia*, 2007, **581**: 141-150.
- [53] 姚书春, 沈 吉. 巢湖沉积柱样中正构烷烃初探. 湖泊科学, 2003, **15**(3): 200-204.
- [54] 吴艳宏, 羊向东, 朱海虹. 鄱阳湖湖口地区 4500 年来孢粉组合及古气候变化. 湖泊科学, 1997, **9**(1): 29-34.
- [55] 沈 吉, 王苏民, 刘松玉等. 固城湖 9.6kaB.P. 发生的一次海侵记录. 科学通报, 1997, **42**(13): 1412-1414.
- [56] 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. 中国科学(D 辑), 2001, **31**(12): 1031-1038.
- [57] 沈 吉, 张恩楼, 张祖陆等. 山东南四湖成湖时代浅析. 湖泊科学, 2001, **12**(1): 91-93.
- [58] 吴敬禄, 沈 吉, 王苏民等. 新疆艾比湖地区湖泊沉积记录的早全新世气候环境特征. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(6): 569-575.
- [59] 韩淑堤, 袁玉江. 新疆巴里坤湖 3.5 万年以来气候变化序列. 地理学报, 1990, **45**(3): 350-362.
- [60] 陈发虎, 吴 薇, 朱 艳等. 阿拉善高原中全新世干旱事件的湖泊记录研究. 科学通报, 2004, **49**(1): 1-9.
- [61] 郑绵平. 晚更新世以来罗布泊盐湖的沉积环境和找钾前景初析. 矿床地质, 1991, **36**(23): 1810-1816.
- [62] 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. 第四纪研究, 2001, (6): 520-527.
- [63] 朱立平, 鞠建庭, 王君波. 湖芯沉积物揭示的末次冰消开始时普莫雍错湖区环境变化. 第四纪研究, 2006, **26**(5): 772-780.
- [64] 刘嘉麒, Negendank JFW, 王文远等. 中国玛珥湖的时空分布与地质特征. 第四纪研究, 2000, **20**(1): 78-86.
- [65] 储国强, 顾兆炎, 许 冰等. 东北四海龙湾玛珥湖沉积物纹层计年与 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 测年. 第四纪研究, 2005, **25**(2): 202-207.
- [66] Zhang HC, Ma YZ, Peng JL *et al.* Palaeolake and palaeoenvironment between 42 and 18 ka BP in Tengger Desert, NW China. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(23): 1946-1956.
- [67] 陈发虎, 范育新, 春 喜等. 晚第四纪“吉兰泰-河套”古大湖的初步研究. 科学通报, 2008, **53**(10): 1207-1219.
- [68] 施雅风, 贾玉连, 于 革等. 40-30kaBP 青藏高原及邻区高温大降水事件的特征、影响及原因探讨. 湖泊科学, 2001, **14**(1): 1-11.
- [69] 于 革, 薛 滨, 刘 健等. 中国湖泊演变与古气候动力学研究. 北京: 气象出版社, 2001: 196.
- [70] 黄成彦. 颐和园昆明湖 3500 余年沉积物研究. 北京: 海洋出版社, 1996.
- [71] 张振克, 王苏民, 沈 吉等. 黄河下游南四湖地区黄河河道变迁的湖泊沉积响应. 湖泊科学, 1999, **11**(3): 231-236.
- [72] 吴瑞金, 项 亮, 钱君龙. 云南滇池近代环境恶化的沉积记录. 中国科学院南京地理与湖泊研究所集刊, 第 13 号. 北京: 科学出版社, 1995: 1-10.
- [73] 秦伯强, 胡维平, 高 光等. 太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式. 科学通报, 2003, **48**(17): 1822-1831.
- [74] 范成新, 张 路, 秦伯强等. 风浪作用下太湖悬浮态颗粒物中磷的动态释放估算. 中国科学(D 辑), 2003, **33**(8): 760-768.
- [75] Wang JJ, Wu YC, Jiang HC *et al.* High beta diversity of bacteria in the shallow terrestrial subsurface. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(10): 2537-2549.
- [76] 羊向东, 沈 吉, 董旭辉等. 长江中下游浅水湖泊历史时期营养态演化及湖泊生态响应. 中国科学(D 辑), 2005, **35**(S2): 45-54.
- [77] Bi XY, Feng XB, Yang YG. Heavy metals in an impacted wetland system: a typical case from southwestern China. *Science of the Total Environment*, 2007, **387**: 257-268.
- [78] 沈 吉, 汪 勇, 羊向东等. 湖泊沉积记录的风沙特征及湖泊演化历史——以陕西红碱淖湖为例. 科学通报, 2006, **51**(1): 87-92.
- [79] Yu SY, Shen J, Steve MC. Modeling the radiocarbon reservoir effect in lacustrine systems. *Radiocarbon*, 2007, **49**(3): 1241-1254.
- [80] 汪 勇, 沈 吉, 吴 健等. 湖泊沉积物 ^{14}C 年龄硬水效应校正初探——以青海湖为例. 湖泊科学, 2007, **19**(5): 504-508.
- [81] 陈振楼, 黄荣贵, 万国江. 红枫湖沉积物-水界面 Fe, Mn 的分布和迁移特征. 科学通报, 1992, **37**(21): 1974-1977.
- [82] Carignan RD, Lean RS. Regeneration of dissolved substances in a seasonally anoxic lake: the importance of processes occurring in the water column and in the sediments. *Limnol Oceanogr*, 1991, **36**(43): 683-707.
- [83] 万国江, 唐德贵, 吴丰昌. 湖泊水-沉积物碳系统研究新进展. 地质地球化学, 1996, (2): 1-4.
- [84] 于 革. 全球晚第四纪湖泊数据库的研究. 湖泊科学, 1997, **9**(3): 193-202.