

Applications of Lake Sediment Geochronology in Environmental Sciences

Binyang Jia^{1,2}, Yanhong Wu³, Bi Wu¹

¹College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu

²Chengdu Academy of Environmental Sciences, Chengdu

³Institute of Mountain Hazards and Environment, Ministry of Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Chengdu
Email: sisyang@126.com

Received: Dec. 24th, 2012; revised: Jan. 20th, 2013; accepted: Feb. 4th, 2013

Abstract: Varve dating, radiometric dating using ^{14}C , ^{210}Pb , and ^{137}Cs , and paleomagnetic dating are common techniques used to determine the age of lake sediments. A lot of research has been done throughout the world over the sediment accumulation rates, fluxes, and sequences using such techniques. Researchers are trying to decide how the lakes respond to human activities and climate changes by studying highly defined climate changes and what have happened to lakes in terms of eutrophication characteristics and processes, the sources and accumulations of heavy metals and persistent organic pollutants (POPs). Sediment geochronology offers great prospects for future environmental science studies: 1) uncovering the inter-connections and differences among local and global environmental changes; 2) establishing quantitative mathematical models to measure the relationship between sediment records, climate change factors, and human activities; 3) determining where we are now in the environmental climate change cycle; and 4) effectively predicting the trend of climate environment changes under the influence of human activities.

Keywords: Lake Sediments; Geochronology; Environmental Evolution of Lakes; Climate Change; Human Activity

湖泊沉积物的年代学研究方法在环境科学中的应用

贾滨洋^{1,2}, 吴艳宏³, 伍碧¹

¹四川大学建筑与环境学院, 成都

²成都市环境保护科学研究院, 成都

³中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都

Email: sisyang@126.com

收稿日期: 2012年12月24日; 修回日期: 2013年1月20日; 录用日期: 2013年2月4日

摘要: 湖泊沉积物定年常用纹泥法、 ^{14}C 定年、 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 定年和古地磁法等。目前, 国内外学者以湖泊沉积物定年为基础, 对湖泊沉积速率、沉积通量及沉积物的沉积年代序列进行了大量研究, 并结合多指标分析, 研究了高分辨率的气候演变、不同湖泊的富营养化特征与过程、重金属及 POPs 来源及累积特征, 辨别其对人类活动和气候变化的响应。沉积物年代学在环境科学应用中的主要发展前景包括: 1) 进行区域乃至全球环境变化的联系和对比研究; 2) 建立湖泊沉积记录与气候变化因子和人类活动指标的定量数学模式; 3) 确定现代环境气候变化在变化周期中所处位置; 4) 有效预测人类活动影响下的气候环境演变趋势。

关键词: 湖泊沉积; 年代学; 湖泊环境演变; 气候变化; 人类活动

1. 引言

湖泊沉积物是不同地质、气候、水文条件下各类

碎屑、黏土、矿物及有机质等的综合体, 是湖盆在自然与人类作用下的产物和信息库, 记录着丰富的地球

化学信息和人类活动痕迹,是过去环境变化的良好信息载体。以可靠的年代学为基础,进行湖泊沉积物沉降速率、累积通量等研究,追溯全球或区域环境演变和气候变化信息及其与人类活动的相互作用,区分人类活动和气候变化对湖泊环境的影响,进行区域乃至全球环境变化的联系和对比,获得区域和全球环境变化的内在联系,为湖泊环境整治和生态修复提供科学依据。沉积物年代学继 1912 年瑞典人吉尔(DeGeer)首次提出纹泥冰川测年^[1]以来得到了迅猛发展,目前已成为一门独立的学科^[2]。

湖泊环境变化主要受三个方面的驱动作用机制的影响:地质构造、气候和人类活动。构造驱动可能更多地表现在长时间湖泊环境的变化;气候驱动是无时不在地发挥着影响,即可与构造运动组合表现在长时间尺度($10^6\sim 10^4$ 年)的变化,也可以与人类活动组合体现在较短尺度($10^2\sim 10^1$ 年)的环境波动。气候变化和人类活动对环境的影响是当今环境科学的热点研究内容。随着沉积物定年技术的发展和在环境科学中的应用,建立起相对完善的湖泊沉积年代序列和湖泊环境演变序列,这让充分了解湖泊环境发展历史、了解当今环境所处相位、掌握湖泊演变过程成为可能。

在本文中,“BP”代表“在现今之前”的缩写,

“ka”代表“千年”,“Ma”代表“百万年”。

2. 湖泊沉积年代学的常用研究方法

较为常用的湖泊沉积物年代学研究方法主要有纹泥定年、 ^{14}C 定年、 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 定年及古地磁定年等等(表 1),不同的定年方法适用于不同的时间尺度(图 1)。

2.1. 纹泥定年

该法是通过由上而下计算纹泥粗细相间的层次而测定沉积年代,常与 ^{14}C 测年等结果对比,以校正其它测年法的结果^[3]。纹泥的应用主要集中于纹泥计年、纹泥厚度变化和纹泥沉积物分析三个方面,其中纹泥年代学是一切应用的基础,是高分辨率研究近代全球环境变化的重要手段。通过纹泥年代学等综合研究建立精确的年龄时间标尺,并追溯区域季节性驱动力对生物学、地球化学、沉积学的影响,获得高分辨率的古环境变化记录^[4]、极端事件如洪水^[5]、火山喷发^[6]等的发生年代。

2.2. ^{14}C 定年

^{14}C 定年是通过测定样品中 ^{14}C 浓度以确定沉积

Table 1. The contrast of several dating methods
表 1. 几种定年方法对比

定年方法	原理	优点	缺点
纹泥定年	在地质学记录中,有韵律的沉积物沉积所形成的细沙、泥沙或黏土纹层常常以层偶形式存在,相对粗的糙纹层与较为细致的层带由于不同的年份呈规律性交替变化,被称为纹层。纹层作为一种定年手段,可以数出年代间隔,建立一个浮动的年代序列 ^[5] 。	对冰川的季节变化记录详尽,亦可反映湖中沉积和生物量的季节变化 ^[3,4] 。	受外部扰动大,局部部位的因素可以导致不准确的年龄估计,而且也会很难建立起各纹泥序列间的联系(交叉定年) ^[5] 。
^{14}C 定年	^{14}C 是C的放射性同位素,平均寿命有8270年左右。生物体在活体性可吸收一定量的 ^{14}C ,生物死亡后,吸收碳的过程中止,但有机组织中 ^{14}C 的衰变仍在继续,这就是放射性碳的“计时功能” ^[20] 。	精确度高,在距今5.5 ka尺度上仅有 ± 50 年的标准偏差 ^[21] 。	“老碳”或“年轻碳”混入 ^[22] 、碳库效应 ^[23] 以及硬水效应 ^[24] 等,严重影响 ^{14}C 年代结果的精确性和可靠性。
^{210}Pb 和 ^{137}Cs 定年	^{210}Pb 定年技术是以该核素(自然产生)随沉积物深度增加而逐渐衰变作为依据。 ^{137}Cs 是人工核实验的产物,最主要的来源是20世纪50年代初开始的大气层核实验,1963年左右是核武器试验的高峰;1986年切尔诺贝利核电站核泄漏事件,所释放出来的大量放射性微粒和气态残骸,迄今仍能在北半球的海洋、湖泊底泥中检测出来 ^[11] 。	^{210}Pb 和 ^{137}Cs 两种方法相互补充,有可能较好的重建近200年来湖泊沉积物的年代序列 ^[12] 。	由于风浪、生物、人为清淤等干扰,使得建立沉积物时间序列非常困难和复杂 ^[25] 。
古地磁定年	湖泊沉积物中矿物的剩余磁性记录着沉积物形成时地球磁场的极性特征。基于保存于岩石和沉积物中地球磁场的变化,利用等值地层标志定年 ^[13] 。	在地磁定年方法通常用来确定沉积地层的上下关系,对照地太强极性年表,可建立起较长时间尺度的湖泊沉积年代序列 ^[7] 。	鉴别短期的极性事件极为困难。由于古地磁标志不能稳定地区分背景“噪声” ^[26] ,古地磁定年法误差大。

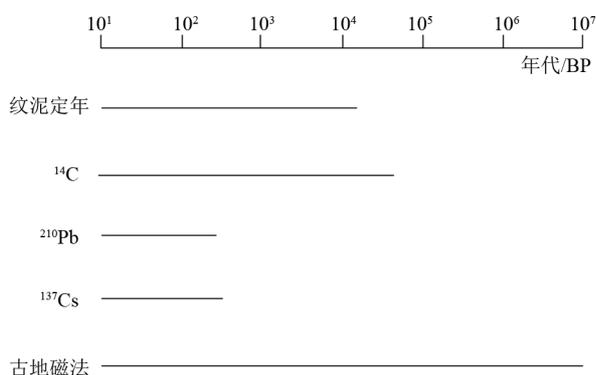


Figure 1. The temporal scale applying to different dating method
图 1. 不同定年方法适用的时间尺度示意图

年代, 适用于距今 300~5 Wa 含碳物质的定年, 直接采用沉积物有机质 ^{14}C 测年易受“碳库”效应的影响^[7], 以沉积物中提取的高纯孢粉替代普通有机质测定可以消除这一效应^[8], 从而提高定年精度, 并已成功应用于干旱区湖泊的沉积定年^[9]。

2.3. ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 定年

^{210}Pb (半衰期 22.26 年)定年是根据 ^{210}Pb 的半衰期采用适当经验模式计算沉积物的年龄, 包括 CRS(恒定补给速率)和 CIC(恒定初始浓度)两种模式^[10], CIC 模式假定 ^{210}Pb 的输入通量和沉积物堆积速率恒定, 由 Pennington 等^[11]在对 Blelham 湖的沉积物测年中首次得到证实, $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 含量明显受物源影响, 沉积物增加会导致 $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ 增加^[12]; CRS 模式基于 ^{210}Pb 输入通量恒定, 而沉积物堆积速率可能发生改变的情况。适用于距今 100~200 a 的近代湖泊沉积物的定年。 ^{137}Cs (半衰期 30.2 年)定年是基于放射性核素在湖泊和海洋沉积物记录中的层位对比, 其中 1963 年被广泛用作沉积物计年时标, 适合于距今 30~40 a 湖泊沉积物的定年。 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 计年的前提是它们进入沉积相后, 不再受外界扰动, 严格按自身的衰变规律随时间放射性衰变^[13], 而不发生其他形式的迁移。事实上表层沉积物的混合, 风浪等物理扰动, 地质运动, 火山喷发, 人类活动等都会影响沉积物的迁移, 而且由于缺乏全球范围内系统的研究资料, 准确对比不同湖泊区域间的特征和差异, 研究环境因素的影响存在一定困难^[14]。为了降低 ^{137}Cs 和 ^{210}Pb 计年时物理扰动、人类活动和选择计年时标主观性引起的误差, 近年来, 出现了以 $^{239+240}\text{Pu}$ 作为湖泊沉积物计年时标, 通

过 $^{239+240}\text{Pu}$ 比活度及 $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ 原子比率测定, 提高 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 测年结果准确性的新方向^[15,16]。

2.4. 古地磁定年

古地磁法^[17]是根据沉积物中矿物的剩余磁性特征和地磁极性年表来确定沉积年代的方法。地球磁场的强度和方向呈现不规则变化: 极性倒转、极性漂移和长期变化。通过湖泊沉积物测试的地磁特征, 对照地磁极性年表, 可建立起较长时间尺度的湖泊沉积年代序列。通常用古地磁法来确定沉积地层的上下层关系, 当古地磁场序列和其他定年方法获得的标准曲线校准时, 便可获得沉积岩心的数值年龄。

几种测年方法相互印证^[18]使湖泊年代学研究趋于定量化、精确化, 简便化和快速化^[19]。

3. 湖泊沉积物年代学在气候变化研究中的应用

在过去全球变化的各类记录中, 湖泊沉积记录具有不可替代的优势, 是恢复古气候的有效途径之一^[27]。如沉积物中出现粉砂粒, 代表水位的上升, 可能对应潮湿的气候模式, 沉积序列中出现树根, 可能指示了干旱气候条件下, 水位下降, 沼泽干涸, 陆生植物生长^[28]。需要特别指出的是, 气候系统是一个复杂的系统, 为了真实再现古气候变化, 需要将大气、海洋、海冰、陆地以及系统其他介质的模式进行耦合。为了还原不同的时间尺度和空间尺度, 应采用多种方法定量重建湖泊沉积指标序列, 以为古气候、古环境的变化过程提供大量史实, 同时也为验证古气候模拟结果提供强有力的证据。

3.1. 国内研究现状

我国较为系统的晚第四纪湖泊沉积与气候、环境演变研究包括我国青藏高原、季风边缘区、季风区及东北地区。研究发现, 湖泊环境对气候变化响应具有明显的区域特征, 西北干旱区湖泊温度变化经历了三个阶段: 全新世早期(10 ka BP)气温升高, 全新世中期温度达到最高, 气候暖湿; 全新世中后期, 呈现下降趋势^[29-31]。中东部季风区高湖面变化的穿时性, 与全球气候变化背景下的季风降水带的迁移有关^[32], 如韩伟光等^[33]通过 ^{14}C 测年、湖泊沉积物的粒度和磁化率

研究,并结合树木年轮同位素含量揭示 500 cal a BP 以来巢湖流域降水变化经历了少-多-少-多的周期变化。季风湿润区云南洱海^[34,35]、滇池^[36]、程海^[37]、纳帕海^[38]、点苍山湖泊^[39]、寻甸仙人洞^[40]、江川星云湖^[41]和通海杞麓湖^[42]等地的湖泊沉积年代学研究和化学记录研究显示云南气候变化的主要特征为冷湿与暖干交替出现。季风边缘区青海湖沉积岩芯 ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 年代分析和有机碳研究结果显示^[43,44],青海湖千年来的气候组合类型为冷湿与暖干交替,湖区经历了 5 次冷湿期和 5 个暖干期。A.D.1050~1160 a 的气候组合特征为冷湿;A.D.1160~1290 a 有一个明显的暖期;A.D.1290~1470 a 波动较大,但总体以温干湿为主;A.D.1470~1870 a 出现 5 次有规律的转换,包括被 2 次暖阶间隔的 3 次冷阶;A.D.1870~2000 a,除 A.D.1920~1960 a 气温略有回落外,呈现持续上升趋势,湖水位下降。金章东等^[45]利用沉积物 ²¹⁰Pb 定年研究沉积年代和沉积速率,恢复了岱海近 400 a 来以小冰期为特征的、具有 100 a 准周期的气候波动历史。

3.2. 国外研究现状

国外高分辨率湖泊沉积研究主要集中于具有纹层沉积的湖泊,以纹泥计年、纹泥厚度变化、纹泥中硅藻、孢粉、地球化学等各指标的环境指示意义研究为主。对大量湖泊^[46-49]进行了晚更新世以来的古气候重建。如 Umut Barış Ülgen 等^[50]对土耳其西北部 Iznik 湖沉积物的孢粉 ¹⁴C 定年、地球化学和磁化率研究,提供了该区域过去 4700 a 的气候变化趋势和事件记录,并重建了湖区干湿变化和湖水位变化,湖的沉积序列显示气候的快速变化导致湿润期被干旱期中断,4.2~3.3 cal ka BP 强烈的干旱使湖水位显著降低,同时湖泊沉积记录显示罗马温暖期、黑暗时代冷期、中世纪温暖期和小冰期的存在。气候变化能够影响湖泊流域内的植被类型和生长状况、侵蚀和风化强度,从而改变湖泊沉积物的性质,引起磁性矿物组分的变化,通过对湖泊沉积物磁性特征的研究,可深入细致的研究湖区的气候变化。如 Oldfield 等^[7]通过对美国华盛顿州 Battleground 湖的研究,认为磁化率高反映气候寒冷,而磁化率低则反映气候相对温暖。

Mario Morellón 等^[51]根据 ²¹⁰Pb 和 ¹³⁷Cs 定年提供的沉积时间序列、元素和同位素地球化学研究重建了

西班牙东北 karstic 湖中世纪暖期(MWP),小冰期(LIA)和工业时代的环境气候变化。中世纪时期(1150~1300 AD)湖水位较浅,滨海盐碱化,区域发展落后;小冰期(1300~1850 AD)湖水位较高,水体含盐量下降,十九世纪湖泊水位达到最高,与该区域农业活动扩大趋势有关,20 世纪开始由于人类活动的压力减小和温暖的气候条件,使湖泊水位下降。借助湖泊纹层沉积计年、硅藻丰度及纹层厚度研究发现,加拿大地区过去 150 a 夏季平均温度呈现逐渐变暖趋势,与 Devon 岛冰帽夏季融水量变化趋势基本相同^[52-54]。Haltia-Hovi 等^[55]在 Lehmilampi 湖精确沉积纹泥计年及纹泥层厚度计量的基础上,对芬兰东部地区过去 2000 a 的气候变化的详细研究揭示该地区存在明显的中世纪暖期(MWP 事件)(A.D.1060~1280 a)和小冰期事件(LIA 事件)(A.D.1300~1860 a)。根据沉积纹泥计年、纹泥层中的花粉组合和丰度与当地平均温度及降水之间的关系发现美国明尼苏达州中西部地区存在明显的 MWP 事件(A.D.1116~1504 a)、LIA 事件(A.D.1505~1876 a)及 20 世纪的高温期(A.D.1877~2002 a)^[56]。同时, M.F.Quamar 等^[57]以纹泥年代学为基础,重建了印度 Nitaya 湖区 12,700~7150 a BP 间,气候干冷,季风降雨减少;7150~4657 a BP 间季风降雨增加,气候以温暖中湿为主;4657~2807 a BP 季风降雨较弱,气候温暖干燥;2807~1125 a BP 间,区域季风降雨增加,气候以暖湿为主;1125 a BP 至今,气候以温暖半湿润为主。

4. 在人类活动对环境驱动作用方面的应用

人类活动的驱动是近代地质的范畴,但是其作用强度在局部地区已经超过自然驱动力。全新世以来的环境演变受气候变化和人类活动的双重影响,其中人类活动所占的比重随人类活动加剧显著增强,如何认识环境演化过程中人类活动的影响并建立识别人类活动的指标,一直是目前环境学研究中的重点和热点。

4.1. 在沉积通量研究方面的应用

沉积通量是单位时间内单位面积上形成的堆积物质量,是判断沉积物来源变化最直接的指标之一,且湖泊沉积物的累积通量往往与人类活动、水土侵蚀

流失速率有关,通过研究湖泊沉积通量的变化,能够帮助我们认识湖泊沉积环境演化过程及其稳定性。湖泊沉积定年是提供准确的沉积速率和沉积通量的可靠方法,在获取精确湖泊沉积物沉积通量的基础上,可以获得各元素的沉积通量,根据营养元素间的相关关系、营养元素与来自母岩或土壤母质的常量元素 Al、Fe 等的相关关系,有效区分出人为因素造成累积通量的变化^[58,59]。已有的研究显示湖泊沉积物的累积通量与降雨,森林砍伐和土地开垦等引起的水土流失和排水量增加及环境保护措施等人类活动显著相关,如龙感湖区域人类活动引起的磷、有机碳和氮的累积通量分别为 151.0~889.4 mg/m²·a, 4.3~149.0 g/m²·a 和 0.5~18.6 g/m²·a^[60]。太湖梅梁湾近百年来沉积物的沉积通量均低于 300 mg/(cm²·a),只在近十几年来才明显增加,1993 a 以来 TP 含量由 0.05 mg/L 迅速增加到 0.1 mg/L 以上;上游夹浦区域近百年来沉积通量持续增加,1984 a 达 495 mg/(cm²·a),之后一直保持在 490 mg/(cm²·a)左右;下游草型化胥口湾湖区,1887~1965 a,沉积物的沉积通量呈阶梯状增加,1965 年后又快速下降^[61]。太白湖 1900~1920、1928、1937~1942、1953~1954 a 由于夏季降雨量偏多沉积通量较高,1958~1970 a,太白湖区域围垦使入湖泥沙量增加及湖泊面积减少,沉积通量较高,1983~1993 a 耕作的快速发展导致水土流失加重,沉积通量增加^[62]。东平湖过去 2000 a 以来,由于湖区经济活动增强,沉积通量逐年上升^[63]。东北西部乌兰泡沼泽 1819~1928 年,由于大规模开垦,水土流失严重,沉积速率逐步上升;1928~1977 年,该地区的土地资源严重破坏,土地沙漠化发展迅速,导致水土流失严重,沉积速率较高,其中 1951~1967 年由于采用一系列土地沙漠化治理办法,沉积速率相对较低;1977~1987 年沉积速率迅速下降且处于低值段;1987 年至今沉积速率又呈现上升趋势^[64]。英格兰北部在约 5000 a BP 由于砍伐森林导致流域土壤剥蚀增加,湖泊沉积速率明显增加^[65]。如在苏格兰西北部阿伯丁 Braeroddach 湖,约 5390 a BP,放牧活动导致沉积速率增加了三倍,现代农业活动时期(370 ± 250 a BP),湖泊沉积通量明显增加。密歇根南部 Frains 湖区在 1820 a 前,年平均沉积通量为 9 t/km²,森林砍伐和土地耕作使沉积通量增加了 30%~80%。坦桑尼亚中部 Haubi 湖 1835~1902 年沉积速率仅为 0.9~1.6

cm/a, 1902~1907 年,由于后期降雨增多,流域侵蚀加强,导致湖泊沉积速率增加至约 6 cm/a, 1907~1972 年间,由于流域侵蚀加强及政府出台的土地保护政策的共同作用,沉积速率出现锯齿状波动^[66]。

4.2. 在湖泊营养演变研究方面的应用

以湖泊沉积物定年为基础可以获得准确年代下湖泊有机碳、氮及磷的累积速率,研究湖泊营养演变历史^[67,68]、湖泊环境演变对人类活动的方式和强度响应的敏感性^[69-74]。已有包括藻型湖泊巢湖、草藻结合的太湖、草型湖泊洪湖和龙感湖^[75-80]、洪泽湖^[81]、东湖及云南滇池等^[82,83]湖泊的营养演变研究:草型湖中有机质增加比藻型湖迅速,人类活动的方式及强度(如围垦、农业活动方式及农药使用等)、森林砍伐、湿地破坏、土壤侵蚀、污染排放以及水利工程建设和底泥营养元素释放是造成湖泊富营养化的主要原因^[84,85],浅水湖泊沉积物释放的营养物质,尤其是磷,有时远高于外源输入量^[86]。如龙感湖 20 世纪上半叶人类活动相对较弱,20 世纪 70 年代以来化肥的大量使用、对湖周滩地的改造导致湿地植被破坏和湿地功能减弱,助长了入湖物质的增加,湖泊营养相对富集,水体发生富营养化,同时龙感湖草型湖的特点,使湖泊沉积环境易于呈氧化环境,生物和地球化学作用,削弱了人类活动累积营养盐的变化幅度,而使沉积中营养盐呈平稳上升趋势^[87-89]。太湖、太白湖营养本底较高,湖泊水体对营养变化缓冲能力较弱,1651 年以来流域人类活动(主要为养殖业和农业)逐渐增强导致沉积物营养盐含量升高,湖泊发生富营养化,1690~1800 年达最大,1800~1862 年又逐渐减小^[90-92]。东湖湖泊营养演化呈现四个阶段^[93]:(1900~1966 AD)人类活动影响较弱,湖泊处于贫营养阶段;(1966~1983 AD)中期人类活动影响增强,处于中营养阶段;(1983~1989 AD)由于污水排放对湖泊环境产生巨大冲击,湖泊水体富营养化速度加快,湖泊原有生态系统结构发生改变,高等水生植物及对水体污染敏感的水生动物消失或大量减少;(1989 AD~至今)处于超富营养化阶段。东非乌干达 Wandakara 湖区域人类活动始于公元 1000 a,并在这段时间导致 Wandakara 湖的湖泽生物学(包括富营养化)永久性改变,人类活动对 Wandakara 湖地球化学的影响比气候变化的影响大^[94]。墨西哥中部

Maar 湖区农业活动始于 5700 cal a BP, 在约 2400 cal a BP 加剧, 晚全新世日益增强的人类干扰掩盖了气候变化对环境的干扰^[95]。14 世纪初, 法国 Pavin 湖区域林地变为耕地, 1350~1475 AD 间, 由于战争和 1348 年的黑死病使人口下降和耕地闲置, 耕地又恢复为林地, 湖泊营养物含量减少^[96]。由于人类活动中化肥使用增加、密集的农业活动、灌溉网络的变化, 使输入阿尔巴尼亚 Butrint 湖泊的淡水大量减少, 湖与附近 Ionian 海的海水交流加强, 湖周围人类居住规模扩大和排水量增多, 导致地下水消耗和污染物增多, 营养物交汇湖盆, 湖泊开始出现富营养化和盐渍化趋势, 由于富营养化导致湖泊缺氧, 严重影响了湖泊的生物多样性和生态系统^[97]。

4.3. 在重金属元素累积判识研究方面的应用

湖泊沉积物长时间接纳并蓄积了大量重金属元素, 通过调查沉积物中重金属元素含量及形态赋存特征, 阐明典型重金属分布规律, 准确评价重金属污染的生态风险, 揭示湖泊沉积物中重金属污染的主要来源, 为湖泊重金属污染的风险管理和污染治理提供理论依据和决策支持。20 世纪 80 年代以来, 通过湖泊沉积物定年和重金属元素分析, 对我国不同地理区域湖泊近百年来重金属在沉积物中时间、空间分布特征以及可能的来源进行了研究, 涉及的重金属元素包括 Fe、Mn、Hg、Cd、Zn、Cu、Cr、As、Ni、Se、Co、Ni 等, 并积累了丰富的数据, 已开展研究较多的包括太湖流域、巢湖、龙感湖、洪泽湖、滇池等^[98-102]。研究发现重金属污染最严重的是滇池, As、Cr、Pb、Zn 在这些湖泊中最高。太白湖和巢湖的污染自 1965 年以来一直加剧, 巢湖重金属污染具有显著的空间差异, 南淝河河口重金属人为污染最重, 其次是柘皋河河口, 派河、白石山河、杭埠河等河口表层沉积物中重金属元素人为污染程度较弱, 西部湖心区 1980 年以来人为污染贡献量显著增加^[103]。龙感湖和太湖东洑和西洑沉积物中人类活动导致 Hg 的累积通量呈现明显上升趋势, 在表层波动下降^[16]。太湖 20 世纪 70 年代末以来随着人为污染加重, Cu、Mn、Ni、Pb 和 Zn 等元素总量及有效结合态含量升高, 重金属的累积主要受人类活动的影响^[104,105], 湖北系列湖泊的研究发现重金属主要来源于城市工业活动^[106]。洪泽湖下游

1953 年修建三河闸水利工程, 使部分重金属重新溶出, 加上流域重金属污染, 1952 年后各元素含量开始小幅度上升, Pb、Zn、As 等元素均出现明显的累积峰值; 1990~2001 年间, 大规模城乡开发活动使环境污染加剧, 重金属元素呈现逐渐增加趋势, Hg 和 Cd 显著上升^[107]。国外湖泊沉积物重金属元素分析显示, 沉积物中 Pb 主要来源于含铅汽油和煤炭消耗量增加, Zn、Cd、Cu 的累积主要来源于工业污染及污水的直接排放^[108-111], 如 1980 年使用无铅汽油后, 美国加州南部的 Santa Barbara 海盆沉积物中的 Pb 显著下降, 欧洲煤炭消耗增加导致 Constance 湖沉积物中重金属累积增加。19 世纪早期, 工业化的发展和人口增长使瑞士 Zurich 湖重金属累积增加, 1960 年由于污水处理厂的使用 and 环境保护政策的颁布, 沉积物中铜、锌、镉大幅下降^[112]。Erie 湖 Cd、Cu、Pb、Zn 的平均累积通量分别为 0.4 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$, 12 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$, 12 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$ 和 36 $\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$, 主要来自污水排放^[113]。

电站和重工业生产经常释放一些浓度很高的磁颗粒物, 这些磁颗粒物富含不同比例的磁铁矿和赤铁矿。湖泊沉积物和泥炭中, 磁学被用来重建因发电厂固体燃料的燃烧、钢铁工业和非金属冶炼等造成的大气颗粒沉降历史。一些地区的研究表明, 磁性矿物的沉降同工业史具有很好的一致性, 这表明磁学记录是一个重金属污染、颗粒物污染和湖水酸化历史的良好指标。英国 Newton Mere 湖是一个冰川作用形成的封闭小湖, 湖区没有径流, 近期的湖泊沉积物为富含有机质的腐殖质黑泥。Oldfield 的研究表明^[114], 距今 70 年以前, 来自流域三叠纪碎屑物中的赤铁矿成分较高, 而距今 70 年以后, 现代大气沉降磁性颗粒输入增多。黏性磁性颗粒一般在土壤或流域土壤来源的物质中较多, 而在工业生产或源于家庭生活化石燃料燃烧产生的颗粒物中, 则很少发现有黏性磁颗粒。这一变化表明近 70 年来, 化石燃料燃烧产生的颗粒物通过大气沉降到 Newton Mere 湖沉降量的增多。

4.4. 在湖泊持久性有机物累积研究方面的应用

进入水体的持久性有机污染物(POPs)大部分被悬浮颗粒物吸附, 并迅速进入沉积环境, 同时大部分 POPs 还会通过水/沉积物界面的迁移转化作用重新进入水体, 在气-水-生物-沉积物等多介质环境生物体系

中迁移、转化和暴露,最终对人和动植的生存繁衍和可持续发展构成重大威胁,湖泊沉积年代学应用于 POPs 累积研究,是追溯 POPs 来源、种类、累积年代及评估这些物质的含量是否可能造成环境威胁和是否对周围生物和微生物造成立即或者潜在的毒性威胁的基础。我国对水体沉积物中 POPs 积累特征及其与人类活动的关系的研究主要集中在工农业较发达地区的湖泊,研究显示沉积物中的 POPs 主要来自石油、木材和煤燃烧、湖周工业污水排放及水上交通运输^[115-117],如太湖沉积物中的多环芳烃(PAHs)来自石油、木材和煤燃烧,贡湖沉积物中 PCBs 的浓度为 1.3922~7.0516 ng/g,主要来自电力设备中的绝缘油或浸渍油和望虞河的输入^[118]。辽河沉积物中总 PAHs 平均浓度为 285.5 ng/g,大辽河沉积物中总 PAHs 平均浓度为 2238 ng/g,辽河表层沉积物 PCDD/Fs 总含量为 13.75~485.5 ng/kg,总毒性当量浓度为 0.174~14.888 ng/kg^[119]。英国 Esthwaite Water 湖泊沉积物中 PAHs 从 1820 年开始持续增加,在 1950~1970 年间达到最大为 2954 ng/(cm²·a),之后稳定下降^[120],而西格陵兰七个湖泊沉积物 PCBs 研究显示该区域 PCBs 最有可能来源于远程输送^[121],加拿大北部六个湖区和加拿大不列颠哥伦比亚北部湖泊沉积物中 POPs 的追溯发现,沉积物中的 POPs 主要是 DDT,在人口稠密区 DDT 的累积始于 1950 年,偏远湖区则始于 1970 年,主要来源于区域活动^[122]。

5. 湖泊沉积物年代学在环境科学应用中的发展趋势

湖泊沉积物年代学研究将继续向提高分析测试精度、减少样品用量和建立高精度时间序列和区域化系统研究等方面发展,更加重视各种放射性核素测年方法的综合应用及多种定年方法所得结果的对比研究,取不同种类样品进行对比测年研究,建立高精度时间序列。在取样、分析测试技术方面将得到进一步发展,引入准确性和精密性更高的先进测试仪器和方法,综合多种定年技术,通过所得结果的相互验证提高定年结果的准确性和精密性,缩小年龄跨度,提高与历史记录资料的吻合度。加速器质谱法(Accelerator mass spectrometry, AMS 测年)是其中的代表,其应用前景非常好,应用范围也十分广范。AMS 测年法相较

于传统放射性碳素测年法有两大优势,一是在大部分实验室中仅需极少量样品便可以测年,一般需要 1 mg 或更少的有机碳,而在大多数使用传统测年方法的实验室中,通常需要 5~10 g 的样品;第二,AMS 法更节省时间,其实际样品测定时间仅为数小时,而传统的放射性碳素测年法需数日。因此典型的 AMS 实验室每年可以进行超过 1000 个样品的测定。

在环境科学应用方面将向着加强不同区域和类型的湖泊之间的对比研究,湖泊沉积中保存的环境指标受湖盆的地貌形态、流域地表覆盖状况、流域地质背景、湖内生态系统、补给水特征、人类活动等因素的综合影响,区分哪些是局部的哪些是区域性的环境变化信息。建立区域乃至全球更完整的高分辨气候变化时间序列,加强环境对气候变化和人为干扰响应的敏感性研究。加强湖泊年代学在湖泊营养累积、重金属、持久性有机污染物累积特征、来源及其与人类活动关系研究中的应用,为湖泊污染治理及预防二次污染提供理论基础。拓宽年代学的应用范围,根据湖泊沉积物累积通量变化、元素化学分析及历史记录的人类活动事件,建立湖泊沉积记录的湖泊环境演变与气候变化因子和人类活动指标的定量数学模式,并结合历史记录资料,确定现代环境气候变化在变化周期中所处的位置,有效预测人类活动影响下的环境发展趋势,推广有利因素,防治不利因素,防患于未然。

参考文献 (References)

- [1] T. Nakagawa, H. Kitagawa, Y. Yasuda, et al. Asynchronous climate changes in the North Atlantic and Japan during the last Termination. *Science*, 2003, 299: 688-691.
- [2] 王瑜, 周丽红. 从同位素年代学到构造年代学[J]. *地质通报*, 2008, 7(12): 2017-2019.
- [3] A. F. Lotter, M. Sturm and B. Wehrli. Varve formation since 1885 and high-resolution varve analyses in hypertrophic Baldegsee (Switzerland). *Aquatic Sciences*, 1997, 59: 304-325.
- [4] A. E. K. Ojala, M. Saarnisto and F. Snowball. Climate and environmental reconstructions from Scandinavian varved lake sediments. *Pages News*, 2003, 11(2-3): 10-12.
- [5] I. Reid, L. Frostick. Late Pleistocene rhyhmitic sedimentation at the margin of the Dead Sea trough: A guide to paleo food frequency. In: J. McManus, R. W. Duck, Eds., *Geomorphology and Sedimentology of Lakes and Reservoirs*. Hoboken: John Wiley & Sons, 1993: 259-273.
- [6] F. Oldfield, P. R. J. Crooks, D. D. Harkness, et al. AMS radiocarbon dating of organic fractions from varved lake sediments: An empirical test of reliability. *Journal of Paleolimnology*, 1997, 18: 87-91.
- [7] 张家富, 周力平等. 湖泊沉积物的 ¹⁴C 和光释光测年——以固城湖为例[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(4): 522-526.
- [8] H. C. Zhang, Q. Z. Ming, G. L. Lei, et al. Dilemma of dating on

- lacustrine deposits in a hyper arid inland basin of NW China. *Radiocarbon*, 2006, 48(2): 219-226.
- [9] 郑同明, 赵家驹等. 巴里坤湖孢粉浓缩物 ^{14}C 测年可行性研究[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(1): 83-86.
- [10] P. G. Appleby, F. Oldfield. Application of ^{210}Pb to sedimentation studies. In: I. M. vanovich, R. S. Harmon, Eds., *Uranium-Series Disequilibrium: Application to Earth, Marine and Environmental Sciences*, Oxford University Press, 1992: 731-778.
- [11] W. Pennington, R. S. Cambray, J. D. Eakins, et al. Radio nuclide dating of the recent sediments of Bleham Tarn. *Freshwater Biology*, 1976, 6: 317-333.
- [12] 王小林, 姚书春, 薛滨. 江苏固城湖近代沉积 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 计年及其环境意义[J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(4): 21-25.
- [13] 万国江. 现代沉积的 ^{210}Pb 记年[J]. *第四纪研究*, 1997, 3: 230-239.
- [14] F. Thevenon, N. D. Graham, M. Chiaradia, et al. Local to regional scale industrial heavy metal pollution recorded in sediments of large freshwater lakes in central Europe (lakes Geneva and Lucerne) over the last centuries. *Science of the Total Environment*, 2011, 412-413: 239-247.
- [15] J. Zheng, H. Q. Liao, F. C. Wu, et al. Vertical distributions of $^{239+240}\text{Pu}$ activity and $^{240}\text{Pu}/^{239}\text{Pu}$ atom ratio in sediment core of Lake Chenghai, SW China. *Journal of Radio Analytical and Nuclear Chemistry*, 2008, 275(1): 37-42.
- [16] 万国江, 吴丰昌, J. Zheng 等. $^{239+240}\text{Pu}$ 作为湖泊沉积物计年时标: 以云南程海为例[J]. *环境科学学报*, 2011, 3(5): 979-985.
- [17] R. Lovlie. Paleomagnetic stratigraphy: A correlate on method. *Quaternary International*, 1989, 1: 129-149.
- [18] 王永红, 沈焕庭. 河口海岸环境沉积速率研究方法[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2002, 22(2): 115-120.
- [19] J. C. Ritchie, J. R. Mchenry. Application of radioactive fallout cesium-137 for measuring soil erosion and sediment accumulation rates and patterns: A review. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19: 215-237.
- [20] W. F. Libby. *Radiocarbon dating*. Chicago: University of Chicago Press, 1952.
- [21] R. L. Otlet, G. Huxtable and D. C. W. Sanderson. The development of practical systems for ^{14}C measurements of small samples using miniature counters. *Radiocarbon*, 1986, 28: 603-614.
- [22] B. Wohlfarth, et al. The Swedish time sclera potential calibration tool for the radiocarbon time scale during the Late Weichselian. *Radiocarbon*, 1995, 37: 347-360.
- [23] I. Olsson. *Radiocarbon dating*. In: B. E. Berglund, Ed., *Handbook of Holocene Palaeoecology and Palaeohydrology*. New York: John Wiley, 1986: 273-312.
- [24] M. Stiller, et al. Calibration of lacustrine sediment ages using the relationship between ^{14}C levels in lake waters and in the atmosphere: The case of Lake Kinneret. *Radiocarbon*. 2001, 43: 821-830.
- [25] 郝海健, 吴艳宏, 刘恩峰等. 长江中下游不同湖泊沉积物中重金属污染物的累积及其潜在生态风险评价[J]. *湖泊科学*, 2010, 22(5): 675-683.
- [26] R. Thomsen. Palaeomagnetic dating. In: P. L. smart, P. D. Frances, Eds., *Quaternary Dating Methods: A User's Guide, Technical Guide 4*. Cambridge: Quaternary Research Association, 1991: 177-198.
- [27] R. Battarbee. Palaeolimnological approaches to climate change, with special regard to biological record. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1-5): 107-124.
- [28] P. Foss. The distribution and formation of Irish Peatlands. In: C. O'Connell, Ed., *The IPCC Guide to Irish Peatlands*. Ireland: Irish Peatland Conservation Council, 1987: 5-12.
- [29] 周杰, 沈吉. 西部地区生态环境演变过程研究[M]. 北京: 环境科学出版社, 2007.
- [30] 陈建徽, 陈发虎, 张恩楼等. 摇蚊亚化石记录的苏干湖近千年来盐度变化研究[J]. *第四纪研究*, 2008, 28(2): 338-344.
- [31] 靳立亚, 陈发虎, 朱艳. 西北干旱区湖泊沉积记录反映的全新世气候波动周期性变化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2004, 24(2): 101-108.
- [32] 吴锡浩, 安芷正, 王苏民等. 中国全新世气候适宜期东亚夏季季风时空变迁[J]. *第四纪研究*, 1994, 1: 24-37.
- [33] 韩伟光, 王心源, 吴立. 公元 1450 年以来巢湖湖泊沉积物与区域和全球气候变化对比研究[J]. *科技信息*, 2010, 15: 23-24.
- [34] 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): 297-302.
- [35] 周静, 王苏民, 吕静. 洱海地区一万多年以来气候环境演化的湖泊沉积记录[J]. *湖泊科学*, 2003, 15(2): 104-111.
- [36] 吴艳宏, 吴瑞鑫, 薛滨等. 13 KaBP 以来滇池地区古环境演化[J]. *湖泊科学*, 1998, 10(2): 8-9.
- [37] 陈敬安, 万国江, 黄荣贵. 程海近代气候变化的化学记录[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2000, 20(1): 39-42.
- [38] 殷勇, 方念乔, 胡超涌等. 云南中甸纳帕海古环境演化的有机碳同位素记录[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(4): 289-295.
- [39] 李建强, 崔之久, 易朝露等. 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.
- [40] 张会领. 云南寻甸地区最近八千年气候环境变迁[J]. *中国岩溶*, 2004, 23(4): 293-298.
- [41] T. J. Whitmore, M. Brenner and X. L. Song. Environmental implications of the late quaternary diatom history from Xingyun Hu, Yunnan Province, China. *Memoirs of the California Academy of Science*, 1994, 17: 525-538.
- [42] D. A. Hodell, M. Brenner, S. L. Kanfoush, et al. Paleoclimate of Southwestern China for the past 50,000 yr. inferred from Lake Sediment Records. *Quaternary Research*, 1999, 52: 369-380.
- [43] 沈吉, 张恩楼, 夏威夷. 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.
- [44] 汪勇, 沈吉, 吴健等. 湖泊沉积物 ^{14}C 年龄应校核校正初探——以青海湖为例[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(5): 504-508.
- [45] 金章东, 王苏民, 沈吉等. 内陆湖泊流域的化学风化及气候变化——以内蒙古岱海为例[J]. *地质论评*, 2001, 47(1): 42-46.
- [46] C. Mayr, M. Fey, T. Haberzettl, et al. Palaeo environmental changes in southern Patagonia during the last millennium recorded in lake sediments from Laguna Azul. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2005, 228(3-4): 203-227.
- [47] S. M. B. Oliveiraa, S. E. M. G. Saia, L. C. Ruiz, et al. Lacustrine sediments provide geochemical evidence of environmental change during the last millennium in southeastern Brazil. *Chemic der Erde Geochemistry*, 2009, 69(4): 395-405.
- [48] W. M. Last, J. P. Smol. *Tracking environmental change using lake sediments, volume 1: Basin analysis, coring, and chronological techniques*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001: 171-196.
- [49] N. Horvatincic, A. Suckow. Radiocarbon towards a deeper Understanding of how carbonate isotopes (^{14}C , ^{13}C , ^{18}O) reflect environmental changes: A study with recent ^{210}Pb -dated sediments of the Plitvice Lakes, Croatia. *Radiocarbon*, 2008, 50(2): 233-253.
- [50] U. B. Ülgen, S. O. Franz, D. Biltekin, et al. Climatic and environmental evolution of Lake Iznik (NW Turkey) over the last ~4700 years. *Quaternary International*, 2012, 274: 88-101.
- [51] M. Morellón, B. Valero-Garcés, P. González-Sampériz, et al. Climate changes and human activities recorded in the sediments of Lake Estanya (NE Spain) during the Medieval Warm Period and Little Ice Age. *Journal of Paleolimnology*, 2011, 46(3): 423-452.
- [52] K. Gajewski, P. B. Hamilton and R. McNeely. A high resolution proxy-climate record from an arctic lake with annually laminated sediments on Devon Island, Nunavut, Canada. *Earth and Environment Science*, 1997, 17(2): 215-225.
- [53] K. A. Huguen, J. T. Overpeck and R. F. Anderson. Recent warming in a 500-year palaeo temperature record from varved sediments, Upper Soper Lake, Baffin Island, Canada. *The Holocene*, 2000, 10(1): 9-19.

- [54] S. F. Lamoureux, R. Gilbert. A 750-yr record of autumn snowfall and temperature variability and winter storminess recorded in the varved sediments of Bear Lake, Devon Island, Arctic Canada. *Quaternary Research*, 2004, 61(2): 134-147.
- [55] E. Haltia-Hovi, T. Saarinen and M. Kukkonen. A 2000-year record of solar forcing on varved lake sediment in eastern Finland. *Quaternary Science Reviews*, 2007, 26(5-6): 678-689.
- [56] J.-M. St. Jacques, B. F. Cumming and J. P. Smol. A 900-year pollen inferred temperature and effective moisture record from varved Lake Mina, west-central Minnesota, USA. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27: 781-796.
- [57] M. F. Quamar, M. S. Chauhan. Late quaternary vegetation, climate as well as lake-level changes and human occupation from Nitaya area in Hoshangabad District, Southwestern Madhya Pradesh (India), based on pollen evidence. *Quaternary International*, 2012, 263(14): 104-113.
- [58] C. Ruiz-Fernández, C. Hillaire-Marcel, B. Ghaleb, et al. Recent sedimentary history anthropogenic impacts on the Culiacan River Estuary, Northwestern Mexico: Geochemical evidence from organic matter and nutrients. *Environmental Pollution*, 2002, 118(3): 365-377.
- [59] M. Aloupi, M. O. Angelidis. Geochemistry of natural and anthropogenic metals in the coastal sediments of the island of Lesbos, Aegean Sea. *Environmental Pollution*, 2001, 113(2): 211-219.
- [60] 吴艳宏, 王苏民. 龙感湖沉积物中人类活动导致的营养盐累积通量估算[J]. *第四纪研究*, 2006, 26(5): 843-848.
- [61] 朱广伟, 秦伯强, 高光. 太湖现代沉积物中磷的沉积通量及空间差异性[J]. *海洋与湖沼*, 2007, 38(4): 329-335.
- [62] 刘恩峰, 羊向东, 沈吉等. 近百年来湖北太白湖沉积通量变化与流域降水量和人类活动的关系[J]. *湖泊科学*, 2007, 19(4): 407-412.
- [63] 陈影影, 陈诗越, 姚敏. 近百年来东平湖沉积通量变化与环境[J]. 2010, 28(4): 783-789.
- [64] 翟正丽, 王国平, 刘景双. 乌兰泡沼泽的 ^{210}Pb 、 ^{137}Cs 测年与现代沉积速率[J]. *湿地科学*, 2005, 3(4): 269-273.
- [65] F. J. H. Mackereth. Chemical investigation of lake sediments and their interpretation. *Proceedings of the Royal Society of London*, 1965, B161, 295-309.
- [66] M. G. Eriksson, P. Sandgren. Mineral magnetic analyses of sediment cores recording recent soil erosion history in Central Tanzania. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1999, 152: 356-372.
- [67] 姚书春, 薛滨, 夏威岚. 洪湖近 540 年来人类活动的沉积记录[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2004, 3: 154-159.
- [68] 陆敏, 张卫国, 师育新等. 太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2004, 15(3): 213-220.
- [69] L. Wick, G. Lemcke. Evidence of Lateglacial and Holocene climatic change and human impact in eastern Anatolia: High-resolution pollen, charcoal, isotopic and geochemical records from the laminated sediments of Lake Van, Turkey. *The Holocene*, 2003, 13(5): 665-675.
- [70] M. Garçon, C. Chauvel, E. Chapron, et al. Silver and lead in high-altitude lake sediments: Proxies for climate changes and human activities. *Applied Geochemistry*, 2012, 27(3): 760-773.
- [71] A. Currás, L. Zamorab, J. M. Reede, et al. Climate change and human impact in central Spain during Roman times: High-resolution multiproxy analysis of a tufa lake record (Somolinos, 1280 m asl). *Catena*, 2012, 89(1): 31-53.
- [72] 杨洪, 易朝路, 谢平, 邢阳平, 倪乐意. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究[J]. *地球化学*, 2004, 33(5): 507-514.
- [73] J. P. Corella, A. Moreno, M. Morellón, et al. Climate and human impact on a meromictic lake during the last 6000 years (Montcortès Lake, Central Pyrenees, Spain). *Journal of Paleolimnology*, 2011, 46(3): 351-367.
- [74] B. B. Perren, C. Massa, V. Bichet, et al. A paleoecological perspective on 1450 years of human impacts from a lake in southern Greenland. *The Holocene*, 2012, 22(9): 2025-2034.
- [75] 陈芳, 夏卓英, 宋春雷等. 湖北省若干浅水湖泊沉积物有机质与富营养化的关系[J]. *水生生物学报*, 2007, 31(4): 467-471.
- [76] 张路, 范成新, 秦伯强等. 模拟扰动条件下太湖表层沉积物磷行为的研究[J]. *湖泊科学*, 2001, 11(1): 35-42.
- [77] 陆敏, 张卫国, 师育新等. 太湖北部沉积物金属和营养元素的垂向变化及其影响因素[J]. *湖泊科学*, 2004, 15(3): 213-220.
- [78] X. C. Jin, S. R. Wang, Y. Pang, et al. Phosphorus fractions and the effect of pH on the phosphorus release of the sediments from different trophic areas in Taihu Lake, China. *Environmental Pollution*, 2006, 139: 288-295.
- [79] 刘恩峰. 长江中下游典型湖泊沉积物地球化学特征及人类活动响应——以太湖、太白湖为例[D]. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2005.
- [80] 陈萍, 何报寅等. 洪湖人类活动的沉积物记录[J]. *湖泊科学*, 2004, 16(3): 233-237.
- [81] 杨达源, 王云飞. 近 2000 年淮河流域地理环境的变化与洪灾——黄河中游的洪灾与洪泽湖的变化[J]. *湖泊科学*, 1995, 7(1): 1-7.
- [82] 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[J]. *中国科学, D 辑*, 2004: 130-138.
- [83] 陈荣彦, 宋学良, 张世涛等. 滇池 700 年来气候变化与人类活动的湖泊环境响应研究[J]. *盐湖研究*, 2008, 12(6): 7-12.
- [84] 陈诗越, 金章东, 吴艳宏等. 近百年来龙感湖地区湖泊营养化过程[J]. *地球科学与环境学报*, 2004, 26(4): 81-84.
- [85] X. Yuan, N. Xu and Y. Tao. Spatial distribution and eutrophic characteristics of bottom sediments in Taihu Lake. *Resources Survey & Environment*, 2003, 24(1): 20-28.
- [86] M. Sondergaard, J. P. Jensen and E. Jeppesen. Retention and internal loading of phosphorus in shallow, eutrophic lakes. *Sci World*, 2001, 1: 427-442.
- [87] 陈诗越, 于兴修, 吴爱琴. 长江中下游湖泊富营养化过程的湖泊沉积记录[J]. *生态环境*, 2005, 14(4): 526-529.
- [88] 吴艳宏, 刘恩峰, 邴海健等. 人类活动影响下的长江中游龙感湖近代湖泊沉积年代序列[J]. *中国科学: 地球科学*, 2010, 40(6): 751-757.
- [89] 薛滨, 姚书春, 王苏民. 长江中下游不同类型湖泊沉积物营养盐蓄积变化过程及其原因分析[J]. *第四纪研究*, 2007, 27(1): 122-127.
- [90] 赵萱, 成杰民, 鲁成秀. 不同生态类型富营养化湖泊沉积物中有机质赋存形态[J]. *环境化学*, 2012, 31(3): 302-307.
- [91] 金相灿, 王圣瑞, 庞燕. 太湖沉积物磷形态及 pH 值对磷释放的影响[J]. *中国环境科学*, 2004, 24(6): 707-711.
- [92] 邓建才, 陈桥, 翟水晶等. 太湖水体中氮、磷空间分布特征及环境效应[J]. *环境科学*, 2008, 29(12): 3382-2286.
- [93] 顾延生, 李雪艳, 邱海鸥等. 100 年来东湖富营养化发生的沉积学记录[J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 35-40.
- [94] J. M. Russell, S. J. McCoy, D. Verschuren, et al. Human impacts, climate change, and aquatic ecosystem response during the past 2000 yr at Lake Wandakara, Uganda. *Quaternary Research*, 2009, 72(3): 315-324.
- [95] J. Park, R. Byrne, H. Böhnell, et al. Holocene climate change and human impact, central Mexico: A record based on Maar Lake pollen and sediment chemistry. *Quaternary Science Reviews*, 2010, 29(5-6): 618-632.
- [96] M. Stebich, C. Brückmann, T. Kulbe, et al. Vegetation history, human impact and climate change during the last 700 years recorded in annually laminated sediments of Lac Pavin. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 2005, 133(1-2): 115-133.
- [97] D. Ariztegui, F. S. Anselmetti, J.-M. Robbiani, et al. Natural and human-induced environmental change in southern Albania for the last 300 years: Constraints from the Lake Butrint sedimentary record. *Global and Planetary Change*, 2010, 71(3-4): 183-192.
- [98] 李鸣, 刘琪璟. 鄱阳湖水体和底泥重金属污染特征与评价[J]. *南昌大学学报: 自然科学版*, 2010, 34(5): 486-489.

- [99] 向勇, 缪启龙, 丰江帆. 太湖底泥中重金属污染及潜在生态危害评价[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(5): 700-705.
- [100] 王素芬, 张惠潼. 南四湖表层底泥重金属污染的风险评价[J]. 山东水利, 2009, 9: 22-24.
- [101] 陈洁, 李升峰. 巢湖表层沉积物中重金属总量及形态分析[J]. 河南科学, 2007, 25(2): 303-307.
- [102] 刘峰, 胡继伟, 秦樊鑫等. 红枫湖沉积物中重金属元素溯源分析的初步探讨[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1871-1879.
- [103] 杜臣昌, 刘恩峰, 羊向东等. 巢湖沉积物重金属富集特征与人为污染评价[J]. 湖泊科学, 2012, 24(1): 59-66.
- [104] 刘恩峰, 沈吉, 刘兴起等. 太湖沉积物重金属和营养盐变化特征及污染历史[J]. 中国科学 D 辑地球科学 2005, 35(增刊 II): 73-80.
- [105] 袁和忠, 沈吉, 刘恩峰. 太湖重金属和营养盐污染特征分析[J]. 环境科学, 2011, 32(3): 649-656.
- [106] 唐阵武, 程家丽, 岳勇. 武汉典型湖泊沉积物中重金属累积特征及其环境风险[J]. 湖泊科学, 2009, 21(1): 61-68.
- [107] 何华春, 许叶华, 杨競红等. 洪泽湖流域沉积物重金属元素的环境记录分析[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 765-774.
- [108] H. Schmidt, C. E. Reimers. The recent history of trace metal accumulation in the Santa Barbara Basin, southern California Borderland. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1991, 33: 485-500.
- [109] G. Müller, G. Grimmer and H. Böhnke. Sedimentary record of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in lake con-stance. *Naturwissenschaften*, 1977, 4(8): 427-431.
- [110] I. Renberg. Concentration and annual accumulation values of history of heavy metal pollution. *Hydrobiologia*, 1986, 143(1): 379-385.
- [111] A. R. Abernathy, G. L. Larson and R. C. Mathews Jr. Heavy metals in the surficial sediments of Fontana Lake, North Carolina. *Water Research*, 1984, 18(3): 351-354.
- [112] H. R. Von Gunten, M. Sturm and R. N. Moser. 200-year record of metals in lake sediments and natural background concentrations. *Environmental Science & Technology*, 1997, 31(8): 2193-2197.
- [113] J. O. Nriagu, A. L. W. Kemp and H. K. T. Wong. Sedimentary record of heavy metal pollution in Lake Erie. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(2): 247-258.
- [114] F. Oldfield. Magnetic measurements of recent sediments from Big Moose Lake. *Adirondack Mountains*, 1983, 103: 37-44.
- [115] 舒卫先, 李世杰. 太湖流域典型湖泊表层沉积物中多环芳烃污染特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1409-1414.
- [116] 刘远. 持久性有机污染物在渤海沉积物中的分布规律与来源解析[D]. 大连海事大学院, 2010.
- [117] 王海, 王春霞, 陈伟等. 武汉东湖表层沉积物有机物污染状况[J]. 环境科学学报, 2002, 22(4): 434-438.
- [118] 姚威风. 持久性有机污染物在贡湖沉积物和水体的分布特征济源解析[D]. 吉林农业大学, 2011.
- [119] 杨敏. 辽河流域沉积物中持久性有机污染物的研究[D]. 中国科学院研究生院, 2006.
- [120] G. Sanders, K. C. Jones and J. Hamilton-Taylor. Concentrations and deposition fluxes of polynuclear aromatic hydrocarbons and heavy metals in the dated sediments of a rural English lake. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1993, 12(9): 1567-1581.
- [121] C. Malmquist, R. Bindler and I. Renberg. Time trends of selected persistent organic pollutants in lake sediments from Greenland. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(19): 4319-4324.
- [122] D. F. K. Rawn, W. L. Lockhart, et al. Historical contamination of Yukon Lake sediments by PCBs and organochlorine pesticides: Influence of local sources and watershed characteristics. *Science of the Total Environment*, 2001, 280(1-3): 17-37.