

The Progress and a Perspective on the Climate-Environmental Changes and Lacustrine Records of Last 2000 Years

Wenjing Li, Fengqin Chang*

Key Laboratory of Plateau Lake Ecology and Globe Change, Yunnan Provincial Key Laboratory of Plateau Geography Process and Environment Changes, College of Tourism and Geography Science, Yunnan Normal University, Kunming

Email: liwenjing512@126.com, * fqchang@niglas.ac.cn

Received: May 15th, 2014; revised: Jun. 14th, 2014; accepted: Jun. 22nd, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The climate changes during last 2000 yrs are one of the main topics drawing the attentions of scientists all around the world, as it connects to the climatic data obtained by the scientific equipment, contains the information produced by the human activities, and is also the key point to explore natural processes of the climatic changes. Generally speaking, three aspects of the progress have been made by the Chinese scientists during last years, which include firstly the calculation of the temperature and precipitations using historical data and documents, and then is the climatic proxies drawn by geochemical, especially the organic geochemical data. And lastly, the climate simulations, especially in the aspect of the precipitation changes under the scenario forced by both natural factors and human impacts. Among the studies on the climate changes during last 2000 years, lacustrine sediments have the priority of irreplaceability since they are widely distributed, their accumulation processes are continuously, and they also contain rich information related with the climate-environmental changes. Anyhow, there are not many studies on the lacustrine sediments and there are few proxies obtained from lake deposits that definitely represent either temperature or precipitation. There are many problems to be faced and overcome on obtaining the sediments with high resolution, establishment of the highly accuracy and reliability chronologies, defining the independent climatic proxies. We believe we must put our efforts on the following four aspects: firstly, we must concentrate on the accurate datings; secondly, we have to focus on the comprehensive studies of the climatic proxies and independent temperature and/or precipitation proxies; thirdly, we must enforce regional correlations of the high resolution records; and last but not least, we must make great effort on the exploration of new technology and methods, new concepts and new proxies.

*通讯作者。

Keywords

Climate Changes during Last 2000 Years, Lacustrine Sediments, Climate Reconstruction, Climate Modeling

过去2ka湖泊沉积记录及所揭示的气候环境变化研究进展

李文静, 常凤琴*

云南师范大学旅游与地理科学学院高原湖泊生态与全球变化重点实验室, 高原地理过程与环境云南省重点实验室, 昆明

Email: liwenjing512@126.com, *fgchang@niglas.ac.cn

收稿日期: 2014年5月15日; 修回日期: 2014年6月14日; 录用日期: 2014年6月22日

摘要

过去2000年的气候变化是全球变化研究关注的核心内容之一,是连接过去百年器测数据、鉴别人类活动对气候变化影响、探讨气候自然变化过程的关键。整体而言,我国学者在2000年以来高分辨率气候重建方面取得如下三个方面的进展,即历史文献资料气候信号的数字化、湖泊沉积地球化学温标的探讨和气候模拟,特别是对自然过程和人类影响下降水变化机理的模拟研究,使得我国在探讨过去降水重建与模拟研究方面出现了突破性的进展。在对过去2000年气候环境变化的研究中,湖泊沉积物分布范围广泛、记录连续、信息丰富等自身的优势使其在研究过去气候变化上具有不可替代的地位。本文在择要综述对过去2000年气候环境研究进展的基础上,对我国湖泊沉积古气候重建研究进展及存在问题、可能突破途径进行综述。整体而言,我国湖泊沉积记录的近2ka以来的气候变化研究数量有限,能够确切代表过去气候、特别是温度和/或降水历史的成果并不多,在两千年以来湖泊沉积记录的高分辨率、高精度定年,气候因子与湖泊沉积记录指标之间定量转换函数的建立以及古气候、古环境重建中有效指标的选择上还存在一些难度。在今后的湖泊沉积研究上需要做到几个方面:1) 注重湖泊沉积的高精度定年;2) 加强多环境指标的综合研究与气候因子与环境指标之间的定量转换函数研究;3) 加强高分辨率环境演化的时空对比研究;4) 加强多学科交叉研究、特别是新技术、新方法、新概念和新指标的引入和探索。

关键词

近2ka以来气候变化, 湖泊沉积, 气候重建, 气候模拟

1. 过去 2000 年气候变化研究的意义

过去 2000 年以来气候变化历史包括了以北欧地区最为典型几个特征时期,如公元 200~800(或 900) 年的黑暗时代冷期(Dark Age Cold Period, DACP)、公元 800(或 900)~1300 年的中世纪温暖期(Medieval Warm Period, MWP)、公元 1300~1850 年左右的小冰期(Little Ice Age, LIA)和自工业革命以来的快速增温期(Current Warming Period, CWP 或 Present Warming Period, PWP)。这段时期也是人类社会快速变动和发展

的时期并可以划分为农耕时期、工业革命时期和现代城市时期。由于这个时期的气候变化不仅代表了千年尺度的变化、百年尺度上的自然变化过程和历史时期在人类活动影响下大气物理状态和化学组成及地表过程变化的反馈与耦合的气候响应，也包含了自工业化革命以来特别是大气 CO₂ 浓度变化引起温室气体效应导致全球大幅度增温过程，是认识全球变化关键时期，对目前温室效应的全球增温可能引发的气候灾变具有重要的预警意义。

距今 2ka 以来气候环境的恢复与重建是衔接地质记录和器测、历史文献资料，探讨人地关系及其相互作用和变化机理，进而预测未来人类生存环境变化、减少环境灾害、促进人类与自然协调共存与持续发展的重要“时间窗”，作为一个十分复杂但不可回避的科学问题一直是过去全球变化研究的重要时段之一并受到全世界相关科学家的高度重视[1]-[3]；同时，由于人类活动的影响，自工业化革命以来全球温度持续震荡快速升高，其升高的幅度和速度在某些地区已经超过了 10,000 年以来的水平，这不仅对人类生存与发展造成了现实的冲击与影响，而且成为科学家(及科学研究)与政治家(政府与国际组织)直接联系的桥梁与角力工[4]。因此，全球近期气候变化及其原因的讨论，已经不是一个纯粹的科学问题，随着全球化政治与经济过程的加强而且成为一个“国际政治科学问题”，也是政府和管理部门制定政策与发展规划必须考虑和涉及的问题并与国家安全，如国家能源安全、水资源安全、粮食安全、环境安全等和国家利益与冲突直接相关。

从现实方面来讲，全球温度的快速升高已经造成和严重的环境后果。研究结果表明，随着全球温度持续升高，在年际尺度上已经导致了全球气候事件如极端高温/低温、极端降水/气象干旱事件的频发，而且有强度越来越大、幅度增加、频率日益增高的趋势；在十年 - 百年尺度上，全球温度阶梯式的升高不但导致生物多样性的快速变化、致命性传染疾病的大面积传播与扩散，而且引起冰川融化，导致海平面上升[5] [6]，很可能使得 2030 年时亚太地区海平面上升 16 厘米，而 2070 年时将会上升多达 50 厘米。到 2070 年，亚洲太平洋地区将会有数以百万计的人失去家园，中国、印度、孟加拉国、越南和一些太平洋岛屿国家和地区面临最为严重的威胁，受影响的地区将会超过 50 万平方公里，上百万人将面临无家可归的危险。

研究表明人类社会的动荡与政权的更迭、民族之间的冲突与战争起因、人口的迁移与灾害的发生频率和范围、社会的和谐稳定与进步无不与气候环境相关[7] [8]。从这个意义上讲，深入的研究地域广泛、地形复杂而变化幅度大、气候环境多变而极端、植被多样性强、人口与经济发展不平衡的中国大陆地区 2000 年以来气候环境变化过程、认识不同地区变化特点和未来趋势，对于当地经济与社会可持续发展是十分重要的，也对建立和谐、繁荣、进步社会有重要的参考价值。

在气候变化过程及机理研究和未来气候变化趋势分析中，气候模拟不仅是认识其特征和变化及原因的关键，也是检验气候模拟可信度的重要和必要步骤。不仅如此，这也是在全球变化背景下研究研究区域气候环境系统变化情景、通过对自然因素的分析 and 人类活动影响的研究，进行气候环境变化过程的重建与模拟，实现认识近代气候变化规律、进而预测未来气候变化趋势的唯一科学途径。

2. 过去 2000 气候变化研究进展及问题

过去 2000 年以来的气候变化，特别是温度和降水变化历史的重建国际上已经做了大量的研究工作，其中以 Mann 等[9]的研究最为代表并引发了全球广泛的讨论；在我国许多学者利用史料对中国东部各地的冷暖(温度)、干湿(降水)变化进行了重建[10]-[16]，利用树轮[17]-[19]、冰芯[20]-[23]、石笋[24] [25]、沉积[26]-[35]孢粉和珊瑚[36]-[38]等自然证据对中国东北和华北北部、西北和青藏高原及东南沿海地区过去气候变化进行了研究。通过综合多种代用指标，重建了覆盖全国范围的过去 1000[39]和 2000 年温度变化序列[40]，同时也利用气候模式对中国过去 1000 年的气候变化进行了模拟[41]并对全球温度变化的速

率进行了分析[42]。从 Yang 等[40]综合的湖泊沉积、树木年轮、冰芯、文献资料记录的古气候代用指标获得的我国区域面积加权温度曲线可以看出, 2ka 来的主要冷期出现在 240~600, 1400~1920 AD; 暖期为 0~240, 600~1400 以及 1920AD~现在, 暖期内部存在十年至百年尺度次一级的气候波动。最近一个新的进展时 Yang 等[43]利用我国青藏高原东北部树轮记录经过一系列的数学处理, 得出了过去 3500 年降水曲线, 但另一方面也使得该地区树轮数据温度 - 降水信号的解译更加复杂化。葛全胜等根据历史文献重建了我国东部地区过去 2000 年温度的距平变化和降水变化序列[44], 指出秦汉以来中国温度变化经历了两汉(公元前 200~公元 180 年)、隋唐(541~810 年)、宋元(931~1320 年)及 20 世纪 4 个暖期和魏晋南北朝(181~540 年)、晚唐(811~930 年)及明清(1321~1920 年) 3 个冷期, 其中宋元暖期与北半球存在的中世纪暖期(MWP)基本对应, 而魏晋南北朝和明清冷期分别与黑暗时代冷期(DACP)和小冰期(LIA)相当; 13~15 世纪为气候由干向湿发展的转折点, 且中国西部在 1500 年以前降水变率较小; 在温暖气候背景下, 北旱南涝是中国东部主要的降水空间格局。这是我国从历史文献记录探讨过去 2000 年以来温度与降水变化及其区域特征最具代表性的进展之一。

我国学者利用地球化学, 特别是有机地化指标对湖泊沉积进行了多方面的探讨和研究[45]-[51], 不但对湖泊沉积中稳定同位素、正构烷烃与气候环境的关系进行了研究[45] [46], 而且通过湖泊现代沉积长链支链饱和和烷烃的分析建立了温标[47]-[50], 并对过去 2500 年的温度变化进行了重建[51], 极大的促进了对湖泊沉积独立温标的探讨。

在气候模拟方面, Liu 等[52]利用 ECHO-G 模式对过去 1000 年以来温度和降水变化进行了模拟, 其结果发现当太阳辐射增大时, 赤道太平洋温度梯度会随之增大。但在 CO₂ 温室气体效应作用下赤道太平洋温度梯度反而会减小, 特别是在赤道陆地地区。这一发现解释了尽管人类活动导致温室气体增加使得全球大于中世纪高温期(MWP), 但降水却小于中世纪高温期的原因, 进而辨认出温室气体导致全球变暖与太阳辐射增加引起全球增温所伴随的降水效应的差别。这一发现, 极大地提高了人们对自然和人类影响下全球变化过程及结果变异性的认识。

但是, 不同地区、不同研究者得出的结论却常常存在差异和矛盾。例如 Kaufman 等[53]根据北半球 60 度以北高纬地区冰心、湖泊记录和树轮重建的温度曲线与 Moberg 等[54]依据树轮资料利用数学方法处理所获北半球重建温度之间存在一定差别(图 1)。再如, 2005 年美国自然科学基金委员会(NSF)实施了 ARCSS2Kyr 计划, 对北极圈内过去 2000 年气候进行重建。这个计划到 2008 年发展成为 IGBP-PAGES 的极地过去 2000 年气候计划(Arctic2k), 该研究对极地地区 23 条记录进行了分析, 其中包括了 12 条湖泊记录[53]。在这 12 条湖泊记录中有 7 条记录显示过去 2000 年北极地区气温表现为不存在现代升温的持续下降趋势, 有 5 条记录显示了现代升温的情形, 但问题的关键是其中有两个相距不远的湖泊记录, 即 Alaska 的 Hallet Lake 和 Iceberg Lake 中的 Iceberg Lake 记录具有现代升温现象而 Hallet Lake 则没有出现现代升温或升温不明显(图 2)。不仅如此, 根据历史文献重建的我国东部近 2000 年以来的温度变化趋势与重建的全球温度变化在变化细节、变化幅度方面存在明显差异, 也在以 $\delta^{18}\text{O}$ 代表季风强度的石笋记录中[55] 既存在高温期季风强度增大, 如 MWP 和 CWP 时期, 也出现在所谓黑暗时代冷期(DACP)季风强度极大的现象。

对于近代气候变化的原因及机理也存在着不同的观点。如 20 世纪增暖的归因问题: 一些学者认为太阳辐射和火山活动是控制 1850 年以前中国区域温度变化的主要因子, 而 1850 年以后, 温室气体浓度的增加对 20 世纪的增暖起着更为重要的作用[41] [56]; 还有部分学者认为 20 世纪前半叶的温度变化仍然归因于太阳辐射和火山活动, 而 20 世纪后 50 年的温度变化则与温室气体浓度的增加有密切关系[57] [58]。争论还在继续之中[59] [60], 问题的关键不仅在于对过去气候变化代用指标的意义及可靠性的认识与理解, 也在于对气候模式的完善与改进[61]。

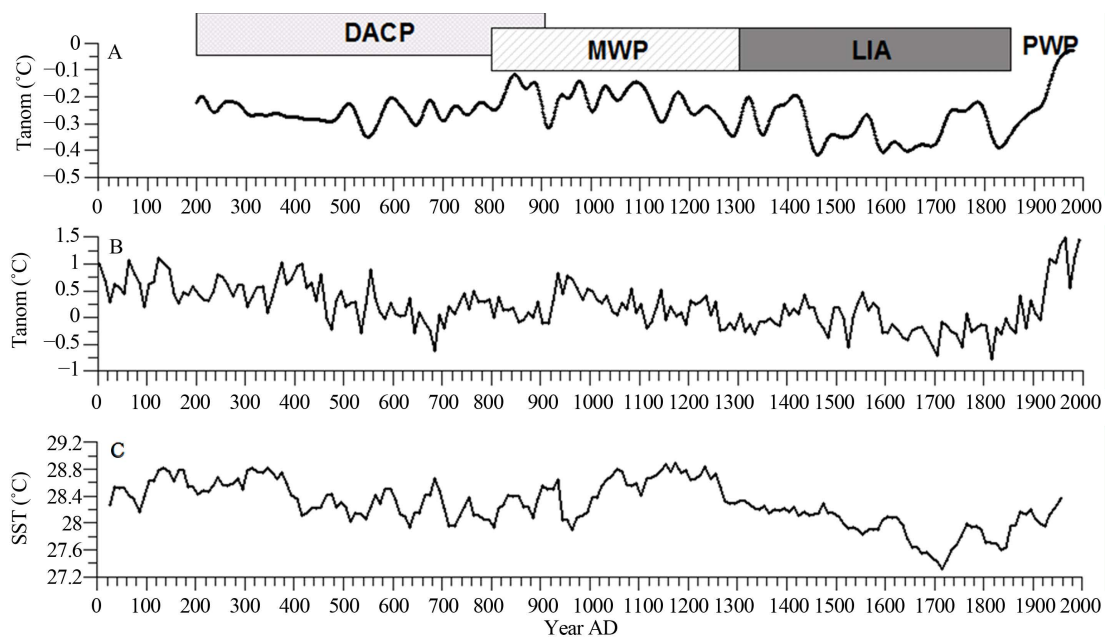


Figure 1. The representative temperature reconstruction during the last 2ka (A. temperature reconstruction of North hemisphere, after Moberg et al., 2005; B. temperature reconstruction in high north latitudes, after Kaufman et al., 2009; C. the SST reconstruction in Indo-Pacific warm pool, after Oppo et al., 2009)

图 1. 北半球过去 2000 年代表性温度重建(A. 北半球温度重建, 据 Moberg et al., 2005; B. 北半球高纬地区温度重建, 据 Kaufman et al., 2009; C. 印度 - 太平洋暖池, 据 Oppo et al., 2009)

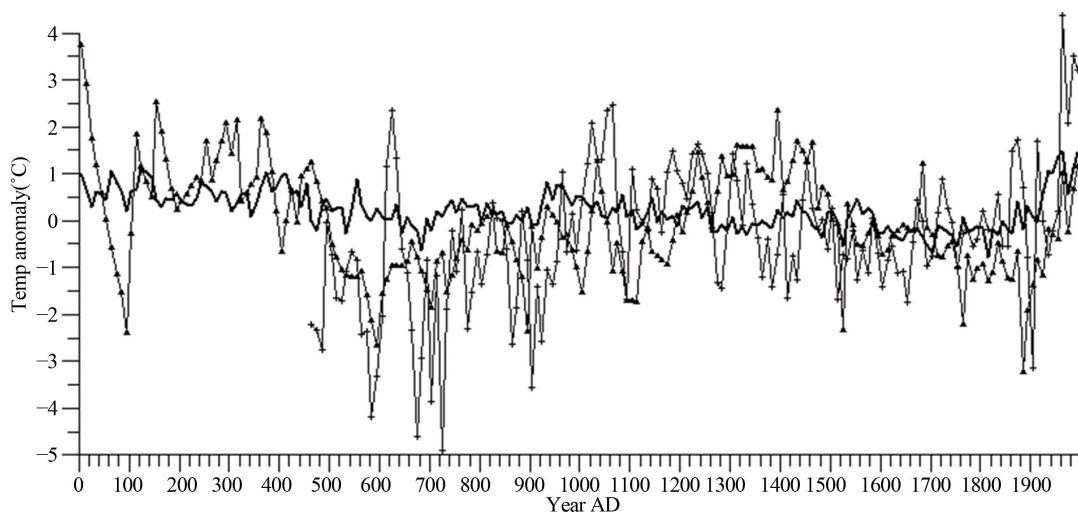


Figure 2. Temperature changes records of the reconstructed Arctic lake in the last 2000 years (date from Kaufman et al., 2009)

图 2. 重建的北极地区湖泊记录的近 2000 年以来温度变化(黑线: 平均值; 三角 - 线: Hallett 湖数据、十字 - 线: Iceberg 湖记录。数据来源于 Kaufman et al., 2009)

目前的气候温暖是否达到了过去 2000 年的极限在国际上尚有争论。问题的关键不但在于对于中世纪暖期是否存在、是否是全球性现象、中世纪暖期的形成原因等问题目前在认识上还存在较大分歧, 而且对区域气候变化空间分异的认识与理解和气候环境信息的提取手段等诸方面都存在着差异。这是由于目前大部分认识依赖于代用资料重建的温度序列, 受重建资料地域性限制, 不同代用指标对气候变化具有

不同的气候响应, 导致气候事件出现的时间、存在范围、变温幅度等认识的差异。

在过去几十年中, 国际上过去 2000 年的历史气候进行了大量模拟研究。例如, Crowley 利用能量平衡模式的模拟结果与重建资料的对比来探讨太阳辐射、火山活动和温室气体等变化的作用[62]。在我国, 刘健等人进行了 1000 年的长时间积分气候模拟试验[41], 探讨 1000 年以来暖期的存在性与时间演变。这些模拟试验主要采用了太阳辐射和大气 CO₂ 浓度的强迫因子驱动对我国的气候状况分析。然而, 东亚地区下垫面在 2000 年以来变化巨大, 自然变化中经历了中世纪暖期(公元 1100~1200 年)和小冰期(公元 1600~1900 年)的变化, 人类活动的影响使自然植被向农耕植被转化。下垫面的变化直接导致地表反照率的改变[63], 因此, 在气候系统中以及气候变化过程中不能不成为一个重要因子加以考虑。

目前解决这个问题的核心是, 缺乏完整空间意义上的人类活动的影响历史植被资料作为气候模拟的重要边界条件, 而通常历史植被采用了历史文献重建。由于历史文件记录的区域局限, 使我国历史植被的重建在区域上存在着很大的缺陷。然而, 湖泊在中国广泛分布, 保存在湖泊中含有大量的过去 2000 年以来植物花粉和人类活动信息, 是重建我国区域历史植被的重要证据, 为东亚季风气候下垫面变化模拟与情景预测分析提供了重要的边界条件, 只有这样, 才能真正获得可靠而有价值的结果。这就要求科学家从自然信息载体和历史记载中寻找准确而可靠的记录资料, 以恢复地球环境变化的详细过程[64]。

3. 我国湖泊沉积记录的近 2000 年来气候变化研究

湖泊沉积物作为大陆气候环境变化的重要信息载体, 具有沉积连续性好、分辨率高、信息量丰富等特点, 能忠实地记录湖区各气候和环境变化的信息, 具有其它环境记录载体所无法替代的地位[26] [65] [66]。近年来, 随着采样、测试技术的提高和分析方法逐渐完善, 我国湖泊沉积物记录的近 2000 年来气候环境变化研究已取得一定的进展与成就。已有研究结果证实, 距今 2000 年以来的气候变化既有相同的变化趋势, 也有各不相同的区域特征。同样, 人类发展在不同地区的共性和区域特点也非常明显。我们需要开展不同地区的工作来探讨这种共性和个性。为了对已有湖泊沉积记录的近 2000 年来的气候变化研究有一个全面的认识并更准确的预测未来气候变化, 现从其研究现状、存在的挑战及展望三个方面进行综合概述。

3.1. 近 2000 年来我国湖泊沉积记录的气候变化研究现状

尽管湖泊系统自身的复杂性以及较石笋、树轮等载体有较低分辨率限制了湖泊沉积学研究的发展, 但湖泊沉积物在记录过去气候变化上具有其他环境载体所无法替代的优势, 过去几十年我国湖泊沉积研究相对而言还是取得很大进展。中国学者在近 2000 年湖泊沉积记录的气候变化研究中得出我国气候大致呈现暖、冷交替的变化趋势, 尤其是近千年备受关注的中世纪暖期、小冰期以及 20 世纪的增温期被证明在地域上具有全球性[9] [67]。

我国已研究的沉积年龄为近 2000 年以来的湖泊主要有希门错、苏干湖、洱海等。希门错短柱岩芯揭示 430 BC~120 AD 时期为气候寒冷时期; 120~1460 AD 时期为温暖期, 尤其是约 480~1460 AD 时期是非常显著的温暖期, 初步推测这一时期对应中世纪温暖期; 约 1460~1900 AD 时期气候总体变冷对应于我国的明清小冰期[28]。最新的研究结果[45] [46]显示, 希门错中世纪高温期结束于公元 1550 年左右, 随后进入公元 1550 至 1850 年的小冰期, 其中 1550 年至 1760 年以冷湿为特点, 而 1760 年至 1850 年则以干冷为主。1850 年以后, 希门错记录显示伴随着温度的持续升高, 降水也随之增加, 然而, 温度和降水的变化较大, 反映了最近 150 年气候不稳定的特征。对苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素的研究表明 2 ka 来该地区气候变化经历了 5 个阶段: 0~190 AD, 暖干; 190~580 AD, 冷干; 580~1200 AD, 暖干, 对应中世纪暖期; 1200~1880 AD, 冷湿, 对应于小冰期; 1880~1950 AD 期间为冷干气候, 20 世纪 50 年代以来,

气候变暖,对应 20 世纪增温期[35]。洱海沉积物的研究揭示出 2000~1480 a BP 期间,该地区暖干;1480~890 aBP 期间,气候较冷湿;890~450 aBP 期间气候较暖干且存在明显冷湿波动;450~130 aBP 期间气候冷湿;130 aBP 以来气候向暖干发展,后三个阶段明显与中世纪暖期、小冰期、和 20 世纪以来的增温期相对应。对新疆罗布泊湖泊沉积的综合分析认为 2200~900 aBP, 风暴作用强,900~700 aBP 间环境最佳,大致对应中世纪暖期;700~350 aBP 环境开始变差,气候干旱[36]。

对近 1000 年尺度的湖泊沉积记录研究取得很大进展。青海湖 0.9 ka BP 的古盐度变化序列定量重建[34]揭示 1160~1290 AD 的湖水盐度对应中世纪暖期较为湿润的气候;1410~1540 AD、1610~1670 AD 和 1770~1850 AD 三个湖水高盐度期对应小冰期的三个冷期;近几十年湖水的高盐度与近几十年的气候暖干一致。内蒙古岱海湖泊岩芯的研究指出了本区现代小冰期前期冷湿后期冷干的气候特征,本研究记录的小冰期最后两次冷期与冰芯、树轮等记载相吻合[29]。青藏高原苟鲁错湖沉积岩芯研究记录了近 1ka 以来中世纪暖期和小冰期的 3 次冷期与期间的多次暖期,并与古里雅冰芯、祁连山树轮记录做了很好对比[32]。洱海近 650 年来的气候与环境重建揭示了其主要表现为暖干与冷湿交替的气候演替类型并得出存在 200 年时间尺度的变化准周期[31]。通过湖泊沉积物研究对滇池近 700 年气候变化的恢复表明其经历了两个高湖水期和一个低湖水期,并且也有 200 年气候周期性,气候变化具有冷湿-暖干交替的特征[37]。

综合以上我国湖泊沉积记录的近两千年的变化研究,不同区域的湖泊冷湿、暖干各阶段存在一定时间差,这体现了不同气候环境影响下的区域对全球变化的响应。另外研究过程中方法的差异、各个地质记录的时间分辨率和气候敏感程度不同以及分析精确度的差异也有可能引起时间上的不同一性。我国东部地区和西部地区对全球变化反映出不同特征[68],体现了不同区域对全球变化的敏感程度差异。在研究近 2000 年气候变化特征上,张丕远和魏东岩均指出不同阶段气候变化是以突变形式过渡的[69] [70]。已有研究从文献记载的研究中得出中世纪气候温暖与海平面变化之间存在一定关系[71]的结论,但还没有得到其他证据验证。也有研究表明中世纪暖期可能与北大西洋温盐环流有关[72],太阳辐射、火山作用对其也产生一定贡献。中国小冰期气候很可能受到由海陆热力性质差异引起的东亚季风环流异常的影响[73];刘健等利用太阳辐射、火山灰记录等资料,通过模拟试验反映出太阳辐射和火山活动的作用是引起小冰期气候寒冷的最主要原因[74]。总之,大多数学者认为近 2000 年的气候变化主要是由太阳辐射、火山活动、大气环流等因素引起的。

3.2. 湖泊沉积记录近 2000 年气候变化研究面临的挑战

在全球气候变化研究中,各国学者利用湖泊沉积的优越性不断采用先进科学技术与方法,从不同角度不断创新不断取得显著成果,但随着研究工作的不断深入,过去 2000 年气候变化研究仍然存在很大挑战。

首先是两千年以来湖泊沉积记录的高分辨率、高精度定年问题。目前,比较成熟的 2000 年尺度的测年方法包括 ^{137}Cs 、 ^{210}Pb 和 ^{14}C 法,这些方法分别适用于 30~40a 和 100~200a 及上万年以内的湖泊沉积年代序列的测定。由于过去 2ka 气候变化研究是全球变化的重要尺度,而在 ^{210}Pb 法和 ^{14}C 法之间缺少一种适合于千年时间尺度的核素测年方法[75],因此,在精确测定过去两千年尺度的湖泊沉积研究上存在一定难度,寻找和探索可靠、精确的测年技术和方法显得十分重要。

在使用 ^{14}C 方法进行年代测定时要特别注意 ^{14}C 的产生的年代误差。碳库效应会使样品的 ^{14}C 偏老;“老碳”、“年轻碳”的混入也会造成 ^{14}C 年龄误差。因此在对样品进行 ^{14}C 测年时要综合考虑各种可能引起误差的因素并最大限度避免其带来的年代误差。而在利用 ^{210}Pb 测年时要求沉积岩芯柱不能出现沉积间断;风浪、生物、人为清淤等会对浅水湖湖底沉积物产生干扰,在判定近 200 年以来的沉积时间序列时非常困难和复杂。在低纬度地区 ^{137}Cs 的活度会随时间推移而逐渐减弱,因此需要在区域地质和环境中

寻求更多的证据,如碳粒在沉积岩芯中的分布和 ^{14}C 测年等[76]。

其次就是气候因子与湖泊沉积记录指标之间定量转换函数建立的可靠性及精确性问题。国际上在古气候古环境研究方面利用孢粉、硅藻、介形组合特征与氧同位素等建立环境指标并与环境因子的转换函数已有大量研究[77][78]。我国在花粉转换函数方面已作了初步尝试[79];李珍等研究孢粉—气候因子的转换函数进一步指出了用花粉定量恢复环境具有可行性[80]。但目前对我国花粉谱的系统分析还较少,并且在两千年尺度的高分辨率研究中,流域内植被组合在响应气候因子变化时有一定滞后性,所以很难建立较高时间分辨率的定量转换关系,因此用花粉数据定量解释气候变化还需要进一步研究。我国的硅藻转换函数研究还处于起步时期,董旭辉等人首次建立了长江中下游地区湖泊硅藻—总磷转换函数,为今后的相关研究奠定了基础[81]。但是要做到对硅藻古环境分析进行定量研究还需要进行大量湖泊系统调查和研究才有可能得出区域性的定量指标,进而有效解释湖泊的古气候、古环境。

第三就是古气候、古环境重建中有效指标的选择问题。研究湖泊沉积记录的气候变化时有效指标的选择非常重要。古生物指标介形类、硅藻组合特征往往能指示水盐度、碱度等物理和化学状况。一些地球化学指标如:Mg/Ca值、氧同位素组成、碳酸盐含量等与湖水盐度有关;还有些生物化学指标如:有机质含量、色素、生物标志化合物等能反映生产力、营养状态、水质、温度等混合环境信息。一种环境指标可以指示多种环境信息,一种环境信息也可能是不同环境指标的综合反映,因此从各种环境指标中提取气候信息具有复杂性。在这方面,我们应当着力注重独立温标的研究与探讨,如二位同位素温标(Clumped Isotope Thermometer, $\Delta 47$)、甘油双烷基甘油四醚(Glycerol Dialkyl Glycerol Tetraethers, GDGTs)温标的探索。虽然我们对二位同位素温标已经开展了研究,但已有的数据显示这并不是轻而易举便可以取得进展的事情(张虎才等,待刊资料),还需要不懈的努力。

3.3. 我国湖泊沉积气候变化记录研究展望

从目前的研究现状和水平来看,我国过去两千年以来的气候变化研究还存在很多问题与不足,有待今后研究解决与加强。

注重湖泊沉积的高精度定年的研究。在年代学研究中,要保证测年技术的精准度需要应用合适的测年技术和方法,当前需要探索一种适合于千年时间尺度的半衰期为1622年的 ^{226}Ra 和半衰期为432.7年的 ^{241}Am 核素测年方法。由于 ^{14}C 测年具有复杂性,在使用此方法进行年代测定时要特别注意 ^{14}C 的污染问题。在测试前挑选样品时应尽可能挑选沉积物中大的植物残体或花粉浓缩物进行 ^{14}C 分析以避免“老碳”影响。多种测年方法相互验证能有效解决碳库效应。

同时应当加强多环境指标的综合研究与气候因子与环境指标之间的定量转换函数研究。由于单一的湖泊沉积环境指标具有多解性,在研究古环境古气候时需要获取多环境指标综合分析。在建立环境指标与气候因子转换函数方面,需要对大量的湖泊进行系统调查,弄清各环境指标与其所依存环境之间的关系,得出区域性定量指标并作深入研究以建立较普遍适用的定量转换函数。

加强高分辨率环境演化的时空对比研究。对中国过去2ka气候变化的湖泊沉积有系统全面的研究,就必须加强同一时期不同区域湖泊和同一湖泊不同时期气候、环境的时空演化模式的对比研究,可能还会涉及到冰芯、树轮、黄土、石笋等不同气候变化记录载体与湖泊沉积物的对比研究。总之,通过一定时空范围内湖泊沉积和其他载体的对比研究可以了解过去2ka以来我不同区域对全球变化的响应和对人类活动关系提供基础资料。

开展多学科交叉研究。湖泊的形成与演化过程受到地质、物理、化学、生物作用的影响与制约,这些复杂的作用被记录在湖泊沉积中,解释湖泊沉积记录的气候环境演化就变得复杂。因此,只有通过多学科的综合交叉综合辨识才能达到对沉积物进行相应的物理、化学、生物的多指标综合分析,得到更符合实

际的结果。这就需要我们重新检讨我们过去工作的缺陷和不足,从工作思路、工作方法、技术手段等方面进行有效的提高与改进,探索新的思路、方法和手段,整体考虑,重点突破,避免低水平重复工作和分散、独立而不可对比的工作,在坚实、全面而可靠的研究工作基础上,采用物理机制的气候模拟研究,对认识 2000 年以来的气候变化的成因机理能够有效地避免数据现象的局限性。通过可靠测年,建立距今 2000 年以来高分辨率的年代序列,使我们的研究工作建立在可靠的年代序列基础上并具有可对比的分辨能力;通过气候环境代用指标的研究,如孢粉、硅藻、介形虫、元素地球化学、稳定同位素、分子化石、沉积特征、环境磁学等方法,重建过去 2000 年研究区气候环境演变的历史,探讨气候变化空间变化特点和区域分异规律及其原因和动力机制。

基金项目

国家自然科学基金(41361008)、中国科学院战略性先导科技专项一应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA01020304)、云南省高端人才引进项目(2010CII11)和湖泊沉积与环境变化云南省创新团队项目(2010CI)。

参考文献 (References)

- [1] PAGES (1995) Paleoclimates of the Northern and Southern Hemispheres. Pages Series 95-1, Pages Press, Bern, 1-92.
- [2] North, G.R., et al. (2005) Committee on surface temperature reconstructions for the last 2,000 years.
- [3] Huang, S., Pollack, H.N. and Shen, P.Y. (2000) Temperature trends over the past five centuries reconstructed from borehole temperatures. *Nature*, **403**, 756-758.
- [4] Jansen, E., Overpeck, J., Briffa, K.R., et al. (2007) Palaeoclimate. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., et al., Eds., *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 435-483.
- [5] Chen, J.L., Wilson, C.R. and Tapley, B.D. (2013) Contribution of ice sheet and mountain glacier melt to recent sea level rise. *Nature Geoscience*, **6**, 549-552.
- [6] Hanna, E., Navarro, F.J., Pattyn, F., et al. (2013) Ice-sheet mass balance and climate change. *Nature*, **498**, 51-59.
- [7] 许靖华 (1998) 太阳、气候、饥荒与民族大迁移. *中国科学(D 辑)*, **4**, 366-383.
- [8] 任美镠 (2004) 气候变化对全新世以来中国东部政治、经济和社会发展影响的初步研究. *地球科学进展*, **5**, 695-698.
- [9] Mann, M.E., Bradley, R.S. and Hughes, M.K. (1999) Northern hemisphere temperatures during the past millennium: Inferences, uncertainties, and limitations. *Geophysical Research Letters*, **26**, 759-762.
- [10] 郑斯中 (1982) 广东小冰期的气候及其影响. *科学通报*, **27**, 302-304.
- [11] 张丕远 (1996) 中国历史气候变化. 山东科学技术出版社, 济南.
- [12] 张德二, 刘传志, 江剑民 (1997) 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析. *第四纪研究*, **17**, 1-11.
- [13] 王绍武 (1990) 公元 1380 年以来我国华北气温序列的重建. *中国科学 B 辑*, **5**, 553-560.
- [14] Ge, Q.S., Zheng, J.Y., Fang, X.Q., et al. (2003) Winter half-year temperature reconstruction for the middle and lower reaches of the Yellow River and Yangtze River, China, during the past 2000 years. *Holocene*, **13**, 933-940.
- [15] Zheng, J.Y., Wang, W.C., Ge, Q.S., et al. (2006) Precipitation variability and extreme events in eastern China during the past 1500 years. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, **17**, 579-592.
- [16] 郑景云, 郝志新, 方修琦, 葛全胜 (2014) 中国过去 2000 年极端气候事件变化的若干特征. *地理科学进展*, **1**, 3-12.
- [17] 杨保, 康兴成, 施雅风 (2000) 近 2000 年都兰树轮 10 年尺度的气候变化及其与中国其它地区温度代用资料的比较. *地理科学*, **5**, 397-402.
- [18] Liu, X.H., Shao, X.M., Zhao, L.J., Qin, D., Chen, T. and Ren, J. (2007) Dendroclimatic temperature record derived from tree-ring width and stable carbon isotope chronologies in the middle Qilian Mountains, China. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, **39**, 651-657.

- [19] Shao, X.M., Xu, Y., Yin, Z.Y., Liang, E., Zhu, H. and Wang, S. (2010) Climatic implications of a 3585-year tree-ring width chronology from the northeastern Qinghai-Tibetan Plateau. *Quaternary Science Reviews*, **29**, 2111-2122.
- [20] 姚檀栋 (1997) 古里雅冰芯近 2000 年来气候环境变化记录. *第四纪研究*, **1**, 52-59.
- [21] 姚檀栋, 徐柏青, 段克勤, 王宁练, 蒲健辰, 田立德, 等 (2002) 青藏高原达索普冰芯 2ka 来温度与甲烷浓度变化记录. *中国科学(D 辑)*, **4**, 346-352.
- [22] 姚檀栋, 秦大河, 徐柏青, 杨梅学, 段克勤, 王宁练, 等 (2006) 冰芯记录的未来 1000a 青藏高原温度变化. *气候变化研究进展*, **3**, 99-103.
- [23] 杨梅学, 姚檀栋 (2004) 近 2000 a 来古里雅冰芯记录及 19~20 世纪的气候变暖. *冰川冻土*, **3**, 289-293.
- [24] Tan, M., Liu, T.S., Hou, J.Z., Qin, X., Zhang, H. and Li, T. (2003) Cyclic rapid warming on centennial-scale revealed by a 2650-year stalagmite record of warm season temperature. *Geophysical Research Letters*, **30**, 1617-1621.
- [25] 何尧启, 汪永进, 孔兴功, 程海 (2005) 贵州董哥洞近 1000a 来高分辨率洞穴石笋 $\delta^{18}\text{O}$ 记录. *科学通报*, **11**, 1114-1118.
- [26] Hong, Y.T., Jiang, H.B., Liu, T.S., Zhou, L.P., Beer, J., Li, H.D., et al. (2000) Response of climate to solar forcing recorded in a 6000-year $\delta^{18}\text{O}$ time-series of Chinese peat cellulose. *Holocene*, **10**, 1-7.
- [27] Chen, J.A., Wan, G.J. and Tang, D.G. (2000) Recent climatic changes recorded by sediment grain sizes and isotopes in Erhai Lake. *Progress in Natural Science*, **10**, 54-61.
- [28] 王苏民, 薛滨, 夏威夷 (1997) 希门错 2000 多年来气候变化的湖泊记录. *第四纪研究*, **1**, 62-69.
- [29] 曹建廷, 王苏民, 沈吉, 张振克 (2000) 近千年来内蒙古岱海气候环境演变的湖泊沉积记录. *地理科学*, **5**, 391-396.
- [30] 陈敬安, 万国江, 黄荣贵 (2000) 程海近代气候变化的化学记录. *海洋地质与第四纪地质*, **1**, 39-42.
- [31] 张振克, 吴瑞金, 沈吉, 潘红玺, 夏威夷, 吴艳宏 (2001) 近 2000 年来云南洱海沉积记录的气候变化. *海洋地质与第四纪地质*, **2**, 31-35.
- [32] 李世杰, 王小天, 夏威夷, 李万春 (2004) 青藏高原苟鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化. *第四纪研究*, **5**, 578-584.
- [33] 沈吉, 刘兴起, Matsumoto, R., 王苏民, 羊向东 (2004) 晚冰期以来青海湖沉积物多指标高分辨率的古气候演化. *中国科学: D 辑*, **6**, 582-589.
- [34] 张恩楼, 沈吉, 王苏民, 尹宇, 朱育新, 夏威夷 (2004) 近 0.9ka 来青海湖湖水盐度的定量恢复. *科学通报*, **7**, 697-701.
- [35] 强明瑞, 陈发虎, 张家武, 高尚玉, 周爱锋 (2005) 2ka 来苏干湖沉积碳酸盐稳定同位素记录的气候变化. *科学通报*, **13**, 1385-1393.
- [36] 马春梅, 王富葆, 曹琼英, 夏训诚, 李升峰, 李徐生 (2008) 新疆罗布泊地区中世纪暖期及前后的气候与环境. *科学通报*, **16**, 1942-1952.
- [37] 陈荣彦, 宋学良, 张世涛, 张子雄, 杨伟 (2008) 滇池 700 年来气候变化与人类活动的湖泊环境响应研究. *盐湖研究*, **2**, 7-12.
- [38] Yu, K.F., Zhao, J.X., Wei, G.J., Cheng, X.R. and Wang, P.X. (2005) Mid-late Holocene monsoon climate retrieved from seasonal Sr/Ca and $\delta^{18}\text{O}$ records of *Porites lutea* corals at Leizhou Peninsula, northern coast of the South China Sea. *Glob Planet Change*, **47**, 301-316.
- [39] 王绍武, 闻新宇, 罗勇, 董文杰, 赵宗慈, 杨保 (2007) 近千年中国温度序列的建立. *科学通报*, **52**, 958-964.
- [40] Yang, B., Braeuning, A. and Johnson, K.R. (2002) General characteristics of temperature variation in China during the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, **29**, 38-1-38-4.
- [41] 刘健, Storch, H., 陈星, Zorita, E., 郑景云, 王苏民 (2005) 千年气候模拟与中国东部温度重建序列的比较研究. *科学通报*, **20**, 2251-2255.
- [42] Shen, C.M., Wang, W.C., Zeng, G., Peng, Y.B. and Xu, Y. (2013) Rates of global temperature change during the past millennium. *Climate Research*, **57**, 11-18
- [43] Yang, B., Qin, C., Wang, J.L., Hea, M., Melvinb, T.M., Osborn, T.J., et al. (2013) A 3,500-year tree-ring record of annual precipitation on the northeastern Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **111**, 2903-2908.
- [44] 葛全胜, 郑景云, 郝志新, 刘浩龙 (2012) 过去 2000 年中国气候变化的若干重要特征. *中国科学(地球科学)*, **6**, 934-942.

- [45] Pu, Y., Zhang, H.C., Wang, Y.L., Lei, G.L., Nace, T. and Zhang, S.P. (2011) Climatic and environmental implications from *n*-alkanes in glacially eroded lake sediments in Tibetan Plateau: An example from Ximen Co. *Chinese Science Bulletin*, **56**, 1503-1510.
- [46] Pu, Y., Nace, T., Meyers, P.A., Zhang, H., Wang, Y., Zhang, C.L., et al. (2013) 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. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, **379-380**, 39-53.
- [47] Sun, Q., Chu, G.Q., Li, S.Q., Lü, C. and Zheng, M. (2004) Long-chain alkenones in sulfate lakes and its paleoclimatic implications. *Chinese Science Bulletin*, **49**, 2082-2086.
- [48] Sun, Q., Chu, G.Q., Liu, G.X., Lia, S. and Wang, X. (2007) Calibration of alkenone unsaturation index with growth temperature for a lacustrine species, *Chrysothila lamellosa* (Haptophyceae). *Organic Geochemistry*, **38**, 1226-1234.
- [49] Chu, G.Q., Sun, Q., Li, S.Q., Zheng, M., Jia, X. and Lu, C. (2005) Long-chain alkenone distributions and temperature dependence in lacustrine surface sediments from China. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **69**, 4985-5003.
- [50] Wang, Z. and Liu, W.G. (2013) Calibration of the $U_{37}^{K'}$ index of long-chain alkenones with the *in-situ* water temperature in Lake Qinghai in the Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 803-808.
- [51] He, Y.X., Liu, W.G., Zhao, C., Wang, Z., Wang, H.Y., Liu, Y., et al. (2013) Solar influenced late Holocene temperature changes on the northern Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, **58**, 1053-1059.
- [52] Liu, J., Wang, B., Cane, M.A., Yim, S.Y. and Lee, J.Y. (2013) Divergent global precipitation changes induced by natural versus anthropogenic forcing. *Nature*, **493**, 656-659.
- [53] Kaufman, D.S., Schneider, D.P., McKay, N.P., Ammann, C.M., Bradley, R.S., Briffa, K.R., et al. (2009) Recent Warming Reverses Long-Term Arctic Cooling. *Science*, **325**, 1236-1239.
- [54] Moberg, A., Sonechkin, D.M., Holmgren, K., Datsenko, N.M. and Karlén, W. (2005) Highly variable Northern Hemisphere temperatures reconstructed from low- and high-resolution proxy data. *Nature*, **433**, 613-617.
- [55] Zhang, P.Z., Cheng, H., Edwards, R.L., Chen, F., Wang, Y., Yang, X., et al. (2008) A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. *Science*, **322**, 940-942.
- [56] Peng, Y.B., Xu, Y. and Jin, L.Y. (2009) Climate changes over eastern China during the last millennium in simulations and reconstructions. *Quaternary International*, **208**, 11-18.
- [57] Ding, Y.H., Ren, G.Y., Zhao, Z.C., Xu, Y., Luo, Y., Li, Q., et al. (2007) Detection causes and projection of climate change over China: An overview of recent progress. *Advances in Atmospheric Sciences*, **24**, 954-971.
- [58] Trenberth, K.E. and Fasullo, J.T. (2009) Global warming due to increasing absorbed solar radiation. *Geophysical Research Letters*, **36**, Article ID: L07706.
- [59] Trenberth, K.E. and Fasullo, J.T. (2013) An apparent hiatus in global warming? *Earth's Future*, **1**, 19-32.
- [60] Kosaka, Y. and Xie, S.P. (2013) Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling. *Nature*, **501**, 403-407.
- [61] Stevens, B. and Bony, S. (2013) What Are Climate Models Missing? *Science*, **340**, 1053-1054.
- [62] Crowley, T.J. (2000) Causes of climate change of the last 1000 years. *Science*, **289**, 270-277.
- [63] Zhang, H.C. (2002) Impact of surface albedo and vegetation on the response of the LLN climate model to the astronomical forcing. Dissertation Doctorale Présentée en vue de l'Obtention du Grade de Docteur en Sciences par, Université catholique de Louvain, Belgium, 121.
- [64] 杨保, 施雅风, 李恒鹏 (2002) 过去 2ka 气候变化研究进展. *地球科学进展*, **1**, 110-117.
- [65] 王苏民, 张振克 (1999) 中国湖泊沉积与环境演变研究的新进展. *科学通报*, **6**, 579-587.
- [66] Rioual, P., Andrieu-Ponel, V., Rietti-Shati, M., Battarbee, R.W., de Beaulieu, J.L., Cheddadi, R., et al. (2001) High-resolution record of climate stability in France during the last interglacial period. *Nature*, **413**, 293-296.
- [67] Broecker, W.S. (2001) Was the medieval warm period global? *Science*, **291**, 1497-1499.
- [68] 郑景云, 王邵武 (2005) 中国过去 2000 年气候变化的评估. *地理学报*, **1**, 21-31.
- [69] 张丕远, 葛全胜, 张时煌, 刘啸雷 (1997) 2000 年来我国旱涝气候演化的阶段性和突变. *第四纪研究*, **1**, 12-20.
- [70] Wei, D.Y. (1992) The discovery and its geological significance of fossil faecal pellets of brine shrimps in mirabilite deposit. *Chinese Science Bulletin*, **37**, 1017-1021.
- [71] 薛积彬, 钟魏, 赵引娟, 彭晓莹 (2005) 历史时期广东省旱涝时空分布特征的初步研究. *地理科学*, **4**, 461-466.
- [72] Cronin, T.M., Dwyer, G.S., Kamiya, T., Schwedea, S. and Willard, D.A. (2000) Medieval Warm Period, Little Ice Age and 20th century temperature variability from Chesapeake Bay. *Global and Planetary Change*, **36**, 17-29.
- [73] Qian, W.H. and Zhu, Y.F. (2002) Little Ice Age climate near Beijing, China, inferred from historical and stalagmite

records. *Quaternary Research*, **57**, 109-119.

- [74] 刘健, 陈星, 王苏民, 郑益群, 于革 (2004) 小冰期气候的模拟. *自然科学进展*, **4**, 462-468.
- [75] 吉磊 (1995) 中国过去 2000 年湖泊沉积记录的高分辨率研究: 现状与问题. *地球科学进展*, **2**, 169-175.
- [76] 吴艳宏, 王苏民, 夏威夷, 刘健 (2005) 近代湖泊沉积物球状碳颗粒(SCP)定年. *科学通报*, **50**, 703-707.
- [77] Webb 3rd, T. and Bryson, R.A. (1972) Late-and-postglacial climate change in the Northern Midwest, USA: Quantitative estimates derived from fossil pollen spectra by multivariate statistical analysis. *Quaternary Research*, **2**, 70-115.
- [78] Charles, D.F., Binford, M.W., Furlong, E.T., Hites, R.A., Mitchell, M.J., Norton, S.A., et al. (1990) Paleocological investigation of recent lake acidification in the Adirondack Mountains, N.Y. *Journal of Paleolimnology*, **3**, 195-241.
- [79] 沈才明, 唐领余 (1992) 长白山、小兴安岭地区全新世气候——花粉 - 气候转换函数的初步研究. In: 施雅风, 孔昭宸, Eds., *中国全新世大暖期气候与环境*, 海洋出版社, 北京, 33-39.
- [80] 李珍, 王开发, 王永吉, 张玉兰, 吕厚远, 毛礼米 (2002) 红树林孢粉 - 气候因子转换函数恢复古环境的可行性初探. *海洋科学进展*, **3**, 73-78.
- [81] 董旭辉, 羊向东, 王荣, 潘红玺 (2006) 长江中下游地区湖泊硅藻 - 总磷转换函数. *湖泊科学*, **1**, 1-12.