中国科学: 地球科学 2019 年 第 49 卷 第 8 期: 1278 ~ 1292
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
论 文 两万年来的中国气候与环境专题

中亚东部晚全新世水文气候变化及可能成因

蓝江湖[1], 徐海[2*], 郁科科[3], 盛恩国[4], 周慷恩[1,5], 王甜莉[1,5], 叶远达[1,5], 严东娜[1,5], 吴慧贤[1,5], 程鹏[1], 外力·阿布列孜[6], 谭亮成[1,7]

1. 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061;
2. 天津大学表层地球系统科学研究院, 天津 300072;
3. 宝鸡文理学院地理与环境学院陕西省灾害监测与机理模拟实验室, 宝鸡 721013;
4. 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002;
5. 中国科学院大学, 北京 100049;
6. 新疆博州赛里木湖风景名胜区管理委员会, 博州 833400;
7. 西安交通大学全球环境变化研究院, 西安 710061
* 通讯作者, E-mail: xuhai@tju.edu.cn

收稿日期: 2018-02-13; 收修改稿日期: 2018-04-20; 接受日期: 2018-06-25; 网络版发表日期: 2018-09-11
国家自然科学基金项目(批准号: 41672169、41473120、41502171)和中国科学院青年创新促进会优秀会员项目(编号: 2012295)资助

摘要 中亚东部水文气候变化对中纬大气环流非常敏感. 为了查明该地区水文气候的长期变化及其与大气环流的关系, 文章利用位于中天山深水湖泊——赛里木湖钻孔岩芯, 在^{137}Cs、^{210}Pb和AMS^{14}C定年基础上, 对湖泊岩芯有机碳、有机氮、碳/氮比、碳酸盐含量和粒度等多指标进行了分析, 重建了晚全新世以来该地区水文气候变化历史. 结果显示, 晚全新世以来共发生了4次降水显著增加时期(4000~3780、3590~3210、2800~2160和890~280cal a BP)和1次降水微弱增加时期(1700~1370cal a BP), 这与中亚东部地区已有的降水/湿度记录相吻合, 表明晚全新世以来该地区具有相似的水文气候变化模式. 太阳活动减弱以及整个环北大西洋地区大气环流南移, 特别是中纬西风主要路径的南移, 可能是中亚东部地区晚全新世水文气候变化的最主要原因.此外, 赛里木湖研究结果还揭示了该地区最近100年降水显著增加, 但中亚地区未来水文气候如何变化仍需更多不同载体的深入研究.

关键词 赛里木湖, 水文气候, 晚全新世, 中纬西风, 北大西洋涛动

1 引言

气候及水文变化对环境、生态、人类社会, 以及文明发展都产生了深远的影响(Hodell等, 1995; Zhang等, 2008; 刘禹等, 2009; Buckley等, 2010; Pederson等, 2014; Tan等, 2015; Putnam等, 2016), 但是现代器测记录不论是空间分布上, 还是时间尺度上都存在较大不足. 因而, 晚全新世水文气候变化以及潜在驱动机制的认识对全面理解全球变暖背景下, 区域和全球气候动力学以及准确评估未来气候变化趋势都有重要意义. 已有大量工作对过去千年, 甚至更长时间尺度气候变化进行了深入研究(Diaz等, 2011; Graham等, 2011).

中文引用格式: 蓝江湖, 徐海, 郁科科, 盛恩国, 周慷恩, 王甜莉, 叶远达, 严东娜, 吴慧贤, 程鹏, 外力·阿布列孜, 谭亮成. 2019. 中亚东部晚全新世水文气候变化及可能成因. 中国科学: 地球科学, 49: 1278–1292, doi: 10.1360/N072018-00057
英文引用格式: Lan J, Xu H, Yu K, Sheng E, Zhou K, Wang T, Ye Y, Yan D, Wu H, Cheng P, Abuliezi W, Tan L. 2019. Late Holocene hydroclimatic variations and possible forcing mechanisms over the eastern Central Asia. Science China Earth Sciences, 62: 1288–1301, https://doi.org/10.1007/s11430-018-9240-x

© 2018 《中国科学》杂志社

例如, 基于秦岭南坡大鱼洞石笋δ^{18}O记录, Tan等(2015)指出湿润时期的干旱事件对社会安定产生了重要的影响, 并预测华中地区未来降水量很可能低于过去500年的平均水平; 又如, Cook等(2004)指出美国西部在中世纪暖期经历了严重的干旱, 并推测未来气候变暖可能会进一步加剧该地区长期干旱趋势. 上述研究工作极大地提升了我们对过去气候以及未来气候变化趋势的认识. 但是, 对晚全新世气候变化驱动机制的认识仍存在较大分歧. 太阳活动一方面直接驱动温度变化(Gray等, 2010; Swingedouw等, 2011), 另一方面通过调控海-气耦合系统驱动区域气候变化(Bond等, 2001; Zhang等, 2008; Moffa-Sánchez等, 2014). 例如, 小冰期太阳辐射量降低驱动北大西洋东部地区形成一个准静止状态的高压系统, 而该高压系统通过改变区域大气环流导致欧洲大陆冬季持续的低温状态(Moffa-Sánchez等, 2014). 高纬地区海冰面积(Sha等, 2014, 2016)、北大西洋(Wirth等, 2013; Moffa-Sánchez等, 2014; Thiéblemont等, 2015; Orme等, 2017)和热带太平洋(Yan等, 2011, 2015)海表面温度和大气环流, 以及中美洲尤卡坦半岛百年尺度水文气候(Hodell等, 2001)变化等, 皆与太阳活动密切相关. 然而, 模拟研究却认为最近1000年北半球气候变化主要受火山活动和温室气体含量控制, 而太阳活动的影响相当有限(Schurer等, 2014); 来自格陵兰和南极冰芯记录亦揭示最近2500年北半球温度年际-十年际变化主要受热带和高纬大型火山活动所驱动(Sigl等, 2015).

中亚东部位于中纬西风环流、西伯利亚高压和亚洲季风系统的交汇区域, 因此该地区既对气候变化非常敏感(Yang等, 2009; Huang等, 2014), 又可能提供半球尺度气候变化的遥相关信息(Lauterbach等, 2014). 虽然已有研究基于不同自然地质载体探讨了该地区降水/湿度变化(Herzschuh, 2006; Chen等, 2008, 2010; Li等, 2011; Cheng等, 2012; Long等, 2017; Wolff等, 2017), 认为该地区水文气候变化与东亚季风区存在空间异质性: 两个地区过去千年降水/湿度变化呈反相位关系(Chen等, 2010, 2015; Lan等, 2018; Li等, 2017). 但是, 对中亚地区晚全新世气候变化的全貌和机制尚缺乏全面认识, 特别是太阳活动和北大西洋地区大气环流变化对该地区的可能影响, 仍需更多可靠年代学的记录来刻画这种半球尺度大气环流格局变化的区域水文气候响应.

天山被誉为"中亚水塔"(Chen等, 2016), 位于中亚东部核心地区, 是中亚众多河流的源头(如塔里木河、伊犁河、玛纳斯河、锡尔河等); 该地区生态环境脆弱, 对未来全球变暖的响应可能更为强烈(IPCC, 2007; Lauterbach等, 2014), 已成为全球气候变化研究的热点地区之一(蒋庆丰等, 2013; Huang等, 2014; Liu W等, 2014; Lan等, 2018; Wolff等, 2017).但为了更加全面认识该地区晚全新世以来水文气候变化历史, 以及揭示太阳活动和北大西洋地区大气环流对研究区气候变化的影响, 本文利用采自中天山高山湖泊——赛里木湖的一支钻孔岩芯, 通过有机碳(TOC)、有机氮(TN)、碳/氮比(C/N)、碳酸盐含量和粒度等多种代用指标分析, 重建了该地区4000年以来水文气候变化历史, 通过与中亚地区其他记录的对比, 揭示了中亚东部地区晚全新世水文气候变化过程, 尝试讨论了该地区水文气候变化与太阳活动和北大西洋地区大气环流的联系.

2　区域概况

位于中天山的赛里木湖(44°30′~44°42′N, 81°05′~81°15′E, 海拔2074m; 图1)形成于上新世至早更新世, 是一个封闭的高山湖泊(王苏民和窦鸿身, 1998; 胡汝骥, 2004). 赛里木湖呈不规则菱形, 东西长约30km, 南北宽约27km, 湖泊面积为~453km^2, 流域面积为~1408km^2(王苏民和窦鸿身, 1998; 胡汝骥, 2004); 湖泊平均水深为56m, 最大水深约为110m(2016年), 蓄水量约为261×10^{8}m^3. 该湖为贫营养-冷水湖泊, 2011年盐度为2.78g L^{-1}, pH为9.17(吴敬禄等, 2012; Liu X Q等, 2014). 本文作者在2013和2016年利用多参数水质分析仪(YSI-6600 Z2)两次对赛里木湖调查表明, 尽管近年来该湖水位持续上涨, 但湖水水文特征并没有发生明显变化, 这与吴敬禄等(2012)研究结果一致.

赛里木湖地处亚欧大陆腹地, 为温带高山气候类型, 以夏季温凉而冬季严寒为主要特征. 封冻期为12月至次年5月初, 时间约为150天, 冰厚0.7~1.05m(王苏民和窦鸿身, 1998). 位于赛里木湖正北20km的温泉气象站(1958~2016年)显示, 年平均气温为3.9℃, 最冷月(1月)和最暖月(7月)均温分别为−14.1℃和19.4℃(图1). 年平均降雨量约为236mm, 主要为西风携带的湿润气流在夏季形成对流雨(Aizen等, 2001), 而冬季由于受西伯利亚反气旋的影响, 其降雨量对全年的贡献相对

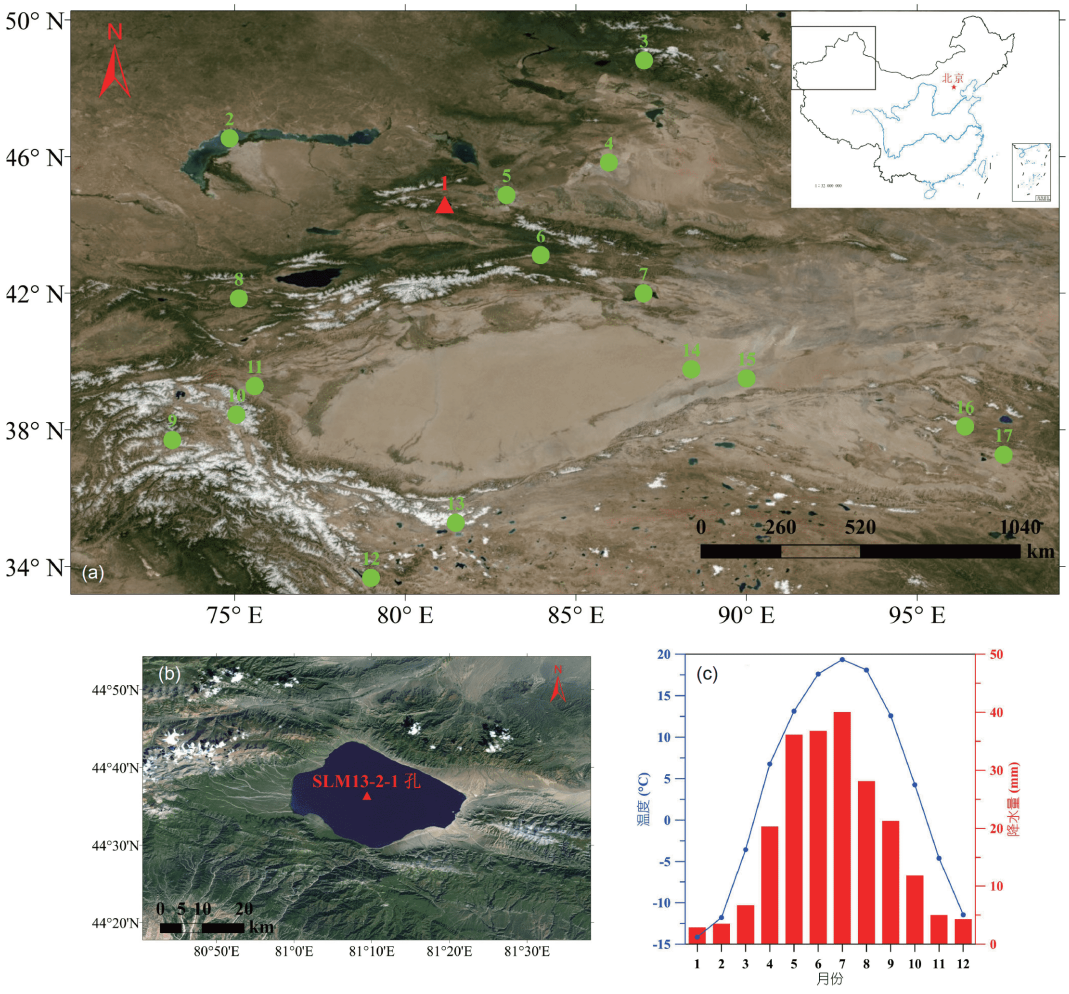


图 1　研究区概况

(a) 本文及中亚东部地区其他研究分布，1~17分别为：赛里木湖(本研究)、巴尔喀什湖(Feng等，2013)、Tiewaike湖(Li等，2017)、玛纳斯湖(Rhodes等，1996; Song等，2015)、艾比湖(Ma等，2011; Wang等，2013)、哈尔努尔湖(Lan等，2018)、博斯腾湖(Mischke和Wunnemann，2006; 陈发虎等，2007)、Son Kol湖(Lauterbach等，2014)、Sasikul湖(Lei等，2014)、喀拉库勒湖(Liu X Q等，2014; Aichner等，2015)、喀什Wupaer剖面(Zhao等，2012)、班公错(Fontes等，1996)、古里雅冰芯(姚檀栋等，1996; Thompson等，1997)、塔里木盆地东缘沙包(Liu等，2011)、罗布泊(Putnam等，2016)、敦德冰芯(Liu等，1998)、德令哈树轮(王文志等，2013); (b) 赛里木湖SLM13-2-1孔采样位置; (c) 温泉气象站温度(蓝色点线)和降水(红色柱状图)资料(1958~2016)

较少，小于全年降水量的10%. 蒸发量约为550mm. 湖水主要依赖大气降水、地下水和冰雪融水补给. 入湖河流主要分布在西面和西北面，共计32条，其中7条为常年河流，其余为季节性河流(胡汝骥，2004). 最长入湖河流为萨嘎克勒，长18km，主要为大气降水补给，年均径流量约为$0.240\times10^8 m^3$. 其余河流以地表径流或地下水形式补给湖泊，入湖水量约为$0.699\times10^8 m^3$；湖面降水量约为$1.586\times10^8 m^3$. 赛里木湖现代年入湖水量约为$2.525\times10^8 m^3$，湖面蒸发量约为$2.492\times10^8 m^3$，收支近似平衡(王苏民和窦鸿身，1998). 此外，赛里木湖流域冰川面积有限，约为$4.28 km^2$(胡汝骥，2004)，约占流域面积的0.3%，因而冰川融水对地表径流、以及湖泊水位/面积的影响非常有限.

3　材料和方法

3.1　样品采集

2013年8月，利用奥地利UWITEC湖泊重力采样器

(内径为60mm)在赛里木湖沉积中心(水深83m)钻取一支长121cm的表层岩芯(SLM13-2-1孔，取芯率100%; 图1). 沉积岩芯上部10.5cm呈淡黄色，10.5~21.0cm呈灰色，并逐渐向下过渡为黑色沉积物(图2)，岩性全部为细粉砂-中粉砂. 将岩芯上部50cm按照0.5cm间隔、其余按1cm间隔现场分样，所获样品在4℃条件下储存, 运回实验室后采用冷冻干燥的方式处理样品.

3.2　定年

本文采用^{137}Cs、^{210}Pb和AMS^{14}C测年方法来建立SLM13-2-1孔年代模型. 其中, 表层沉积物^{137}Cs和^{210}Pb活度按照0.5cm间隔在中国科学院地球环境研究所使用美国Ortec生产的多通道低本底高纯锗伽马能谱仪完成(HPGe; GWL-250-15). ^{137}Cs和^{210}Pb活度在能量谱上分别分布在661.6和46.5keV, 测试误差<10%, 在99%置信度上测量下限为0.1Bg kg^{-1}. 过剩^{210}Pb(^{210}Pb$_{ex}$)活度为总^{210}Pb减去补偿^{210}Pb活度(Xu等, 2006a)，再利用恒定输入通量模式(CRS)和常量初始浓度模式(CIC)来获得表层沉积物年代(Appleby等, 1979). 为了进一步控制整支岩芯的年代，本文在中国科学院地球环境研究所加速质谱中心测试了10个AMS^{14}C年代, 但由于在沉积岩芯中未见合适的植物残体, AMS^{14}C测年材料为全岩有机质.由于我国西部地区湖泊可能存在碳库效应(Hou等, 2012; 侯居峙等, 2012; Liu X Q等, 2014; Yu等, 2014; Lan等, 2018), 表层3个沉积物AMS^{14}C年龄(^{137}Cs活度峰值附近)用于评估赛里木湖碳库效应，其余7个AMS^{14}C年龄则用于建立沉积物年代学模型.

3.3　多指标分析

沉积物碳酸盐含量(%)通过酸碱滴定法获得，测试误差<0.5%. 碳酸盐含量分析后剩余样品用去离子水洗成中性后，利用元素分析仪(vario EL III)测试样品TOC、TN含量和C/N比，测试误差<0.1%. 沉积物原样先后加入10%浓度的双氧水(H_2O_2)和30%浓度的盐酸(HCl), 分别去除有机质和碳酸盐后, 再利用马尔文2000激光粒度仪(Malvern Mastersizer 2000)测试沉积物粒度，测量范围为0.02~2000μm，误差<3%(Sun等, 2011, 2015). 上述实验在中国科学院地球环境研究所完成.

4　结果

4.1　年代学

4.1.1　^{137}Cs和^{210}Pb年代

^{137}Cs作为一种人工放射性核素，其半衰期为30.17

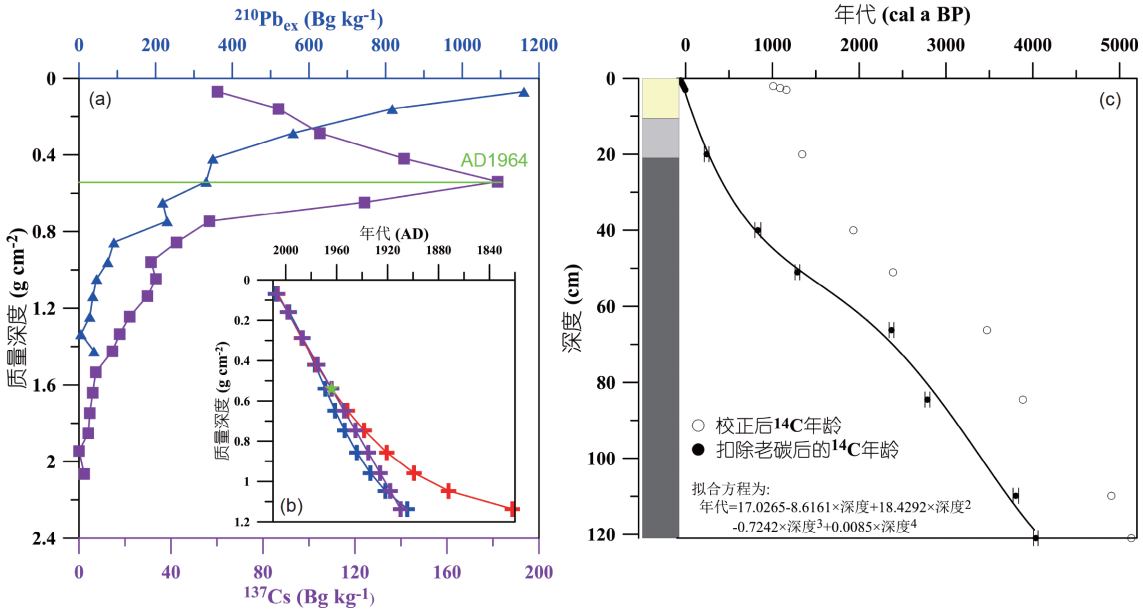


图 2　赛里木湖沉积物年代学模型

(a) SLM13-2-1孔表层沉积物^{137}Cs(紫色)和^{210}Pb$_{ex}$活度(蓝色); (b) 表层沉积物年代学模型，绿色五角星为^{137}Cs峰值年代(AD1964)及其建立的年代学模型(紫色)，红色和蓝色分别为^{210}Pb$_{ex}$活度根据CRS和CIC建立的年代学模型; (c) SLM13-2-1孔年代学模型，黑色实线为扣除1073年碳库效应后的4次多项式拟合

年. 1945年核爆炸后, 特别是50年代早期全球进行了大量地面核试验之后, ^{137}Cs在大气层中浓度迅速上升. 北半球核爆炸产生的^{137}Cs沉降高值开始于1952年, 并在1963年达到最高峰(Pennington等, 1973; Robbins和Edgington, 1975; 万国江, 1995). 由于^{137}Cs在大气层中滞留的时间一般不超过1年, 考虑到湖泊沉积过程, 本文将^{137}Cs峰值沉积物年代定为1964年时间标尺(Lan等, 2018; Yu等, 2017).

如图2所示, 赛里木湖SLM13-2-1孔表层沉积物^{137}Cs活度随质量深度呈典型的单峰模式, 与全球大气^{137}Cs沉降模式一致(徐海等, 2010), 表明赛里木湖沉积物^{137}Cs活度峰值是一个可靠的时间标尺. 因此, 本文将质量深度0.54g cm^{-2}或几何深度2.5cm处^{137}Cs峰值(活度为180Bg kg^{-1})定为1964年(图2). 由此获得表层质量沉积速率为0.0108g cm^{-2} a^{-1}, 与^{210}Pb$_{ex}$年代模式所获得的质量沉积速率相近(0.0109g cm^{-2} a^{-1}, 详见后文; 图2). 因而虽然赛里木湖在位置上与切尔诺贝利核泄漏事故地点较近, 但沉积物^{137}Cs峰值仍然记录的是1964年时标而不是切尔诺贝利事件(即1986年时标; Wieland等, 1993; Putyrskaya等, 2009; Klaminder等, 2012; Lei等, 2014).

^{210}Pb是U裂变系列中的一种自然核素, 其半衰期为22.23年, 通常用于确定过去100~150年的沉积年代(Appleby等, 1979; Appleby, 2001; Sanchez-Cabeza和Ruiz-Fernández, 2012). 如图2所示, ^{210}Pb$_{ex}$活度随质量深度呈指数衰减. 根据CRS和CIC模式建立的沉积物年代在AD1964以来基本一致, 且与^{137}Cs活度建立的年代相吻合(图2). 例如, 在质量深度0.54g cm^{-2}(几何深度为2.5cm)处, CRS和CIC模拟年代分别为1963.9和1968.8AD, 且该年代与^{137}Cs峰值所指示的AD1964时标也基本一致. 根据CRS和CIC模式所得的AD1964以来的质量沉积速率分别为0.0109和0.0125g cm^{-2} a^{-1}, 也相吻合, 印证了沉积物表层年代学的可靠性. 但是, 3种定年方法在AD1964之前存在一定的差异, 可能与沉积速率变化有关. 因而, 基于质量深度, 我们利用^{137}Cs-^{210}Pb活度建立了AD1964以来的表层沉积物年代, 而下部沉积物年龄则根据AMS^{14}C年代来获得.

4.1.2 ^{14}C年代学模型

将AMS^{14}C原始年龄利用INTCAL 09校正数据库在CALIB 7.0.2软件下校正为日历年龄(Stuiver和Reimer, 1993; Reimer等, 2009). SLM13-2-1孔AMS^{14}C测年结果显示, 10个AMS^{14}C呈良好的线性关系, 无年龄倒置. 我们选取已确定年代的^{137}Cs峰值附近3个沉积物样品AMS^{14}C年龄与对应的^{137}Cs年龄(AD1964)的差异来评估该沉积岩芯的碳库效应. 结果显示, 该样品组校正后的AMS^{14}C平均年龄约为1087年(表1), 暗示AMS^{14}C年龄老于^{137}Cs年龄约1087年, 即老碳年龄为1073年. 这两种相互独立的年代学方法所获得的年龄存在差异, 暗示沉积物全岩有机碳AMS^{14}C年龄受到了碳库效应的影响. 这种现象在我国西部湖泊沉积物定年中较为常见. 例如, 新疆博斯腾湖(陈发虎等, 2007)、哈尔努尔湖(Lan等, 2018)、喀拉库勒湖(Liu X Q等, 2014)、甘肃高台盐湖(Yu等, 2014)、青海库赛湖(Liu等, 2009)等湖泊碳库效应分别为1140、3560、1880、11000和3400年.

此外, 基于^{137}Cs峰值所确定的AD1950的质量深度略小于0.54g cm^{-2}(图2), 而同一深度沉积物根据AMS^{14}C外插所得的年龄为920年, 与上述方法所获得的碳库效应(1073年)基本一致, 表明本文所确定的赛里木湖沉积物碳库效应约为1073年是可信的. 本文假设赛里木湖晚全新世以来碳库效应恒定不变, 将1073年碳库效应应用到SLM13-2-1孔整支岩芯中. 由此, 我们将扣除碳库效应后的AMS^{14}C年龄采用4次多项式拟合, 并结合^{137}Cs-^{210}Pb年龄建立了赛里木湖SLM13-2-1孔年代学模型(图2).

4.2 代用指标

如图3所示, 赛里木湖SLM13-2-1孔TOC含量变化范围为3.3~8.7%, 平均值约为5.6%. 如图3所示, TOC含量在2170cal a BP之前相对较低, 期间存在两个高含量时段(~3770~3610和3180~2830cal a BP), 随后在910cal a BP之前呈逐渐增加趋势. 在890~280cal a BP期间, TOC含量较低但变化幅度较大; 280~20cal a BP之间TOC含量显著增加. 但是, 最近100年以来TOC却异常地呈降低趋势(图3). 赛里木湖SLM13-2-1孔TOC含量从表层至底部并未呈逐渐降低趋势, 表明易分解的有机质组分在湖水中已充分分解, 且早期成岩作用对TOC的分解也较弱. SLM13-2-1孔TN含量和C/N比在长期变化趋势上与TOC含量变化除了在890~280cal a BP时段存在差异外, 基本表现出同步变化(图3). 此外, TOC、TN含量和C/N比与碳酸盐含量整体上呈正相关

表 1　赛里木湖全岩样品AMS^{14}C年代

加速质谱中心编号	样品编号	深度 (cm)	质量深度 (g cm^{-2})	未校正的^{14}C年龄±误差 (a BP)	校正后的^{14}C年龄, 1σ (cal a BP)	碳库效应(a)	^{137}Cs年龄 (AD)	扣除1073年碳库效应后的^{14}C年龄 (cal a BP)
XA14624	SLML13-2-1-4	2	0.42	1106±25	1010		1975	
XA11869	SLML13-2-1-5	2.5	0.54	1164±24	1090	1073	1964	
XA14625	SLML13-2-1-6	3	0.65	1229±30	1161		1954	
XA12326	SLML13-2-1-40	20	3.95	1456±27	1343			256
XA12327	SLML13-2-1-80	40	8.68	1982±35	1933			846
XA12328	SLML13-2-1-101	51	11.43	2371±27	2389			1302
XA11870	SLML13-2-1-116	66	15.69	3250±27	3473			2386
XA13271	SLML13-2-1-134	84	21.57	3584±28	3887			2800
XA13272	SLML13-2-1-159	110	31.16	4338±32	4906			3819
XA11871	SLML13-2-1-170	121	35.90	4457±26	5136			4049

关系.

赛里木湖SLM13-2-1孔过去4000年碳酸盐含量在29.9~45.8%变化, 平均值为40.4%(图3). ~2750cal a BP之前碳酸盐含量呈降低趋势, 随后持续增加到~1000cal a BP, 890~280cal a BP碳酸盐含量较低, 之后为持续约150年的高碳酸盐阶段. 然而最近100年以来碳酸盐含量显著降低(图3).

~2000cal a BP之前, SLM13-2-1孔平均粒径较细, 特别是在4000~3780、3590~3210和2800~2160cal a BP时段, 与TOC、TN、碳酸盐含量和C/N比低值时段对应(图3). 2000~1010cal a BP平均粒径变粗(~20μm), 之后1010~400cal a BP相对变细. 但~400cal a BP以来, 平均粒径变率显著增加(图3).

总之, 赛里木湖沉积物TOC、TN、C/N比、碳酸盐含量和粒度等指标皆显示了4个显著降低阶段(分别为4000~3780、3590~3210、2800~2160和890~280cal a BP)和1次微弱的降低阶段(1700~1370cal a BP). 此外, 还揭示最近100年以来所有指标都显著降低(图3).

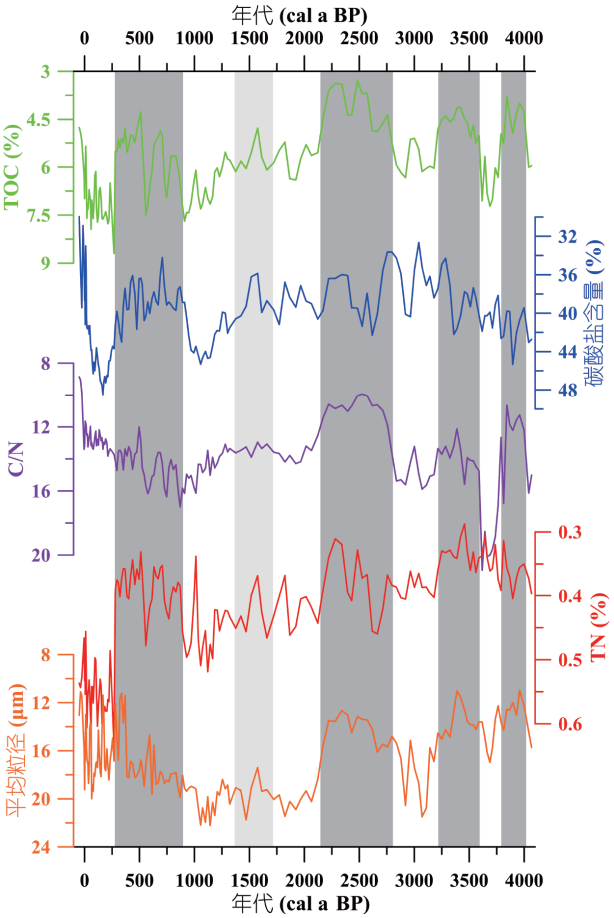


图 3　赛里木湖SLM13-2-1孔多指标记录的气候变化

灰色阴影时段指示降水增加阶段

5　讨论

5.1　气候代用指标的环境指示意义

5.1.1　TOC、TN含量和C/N比

湖泊沉积物中有机质主要有两个来源: 湖泊水生植物(即内源)和流域陆生有机植物残体(即外源; Tal-

bot和Johannessen, 1992; Meyers, 1994). 水生植物因纤维素含量较低而蛋白质相对较高, 湖泊内生有机质C/N比值较低, 通常在4~10变化; 陆源有机质因富纤维素而贫蛋白质, 其C/N比值通常>20(Meyers, 1994, 1997, 2003; Muller和Mathesius, 1999). 虽然早期成岩作用会导致湖泊沉积物有机质C/N比值会在一定程度上发生改变, 但大量研究指出, C/N比值的变化仍然能有效地指示湖泊沉积物有机质内源和外源的相对贡献(Meyers, 1990, 1994, 1997; Talbot和Johannessen, 1992; Meyers和Ishiwatari, 1993; Meyers和Teranes, 2001; Lamb等, 2006).

一般而言, 随着区域气候条件改善、降水增加, 流域陆源有机物质输入也相应地增加, 导致湖泊沉积物中TOC、TN含量和C/N比值上升(Xiao等, 2006; Xu等, 2015). 但赛里木湖研究结果显示: 当降水增加, 区域植被改善时, 随地表径流进入湖泊中的碎屑矿物对TOC、TN的稀释作用, 导致湖泊沉积物中TOC、TN含量降低. 同时, 气候条件的改善也促使湖泊内生藻类生物量增加, 导致C/N比降低. 因此, TOC、TN和C/N比降低, 指示区域降水增加; 反之, 指示降水减少.

5.1.2 碳酸盐含量

湖泊碳酸盐形成主要受控于蒸发/降水(E/P)比: 当E/P比增加时, 有利于湖水中碳酸盐过饱和, 形成碳酸盐沉降, 导致沉积物中碳酸盐含量增加; 反之, 沉积物中碳酸盐含量降低. 因此, 湖泊沉积物碳酸盐变化能有效地指示区域气候变化(Xiao等, 2006; 陈发虎等, 2007; Xu等, 2006b, 2008; Wittkop等, 2009). 例如, 青海湖研究表明E/P与沉积物碳酸盐含量之间存在良好的正相关关系, 而温度是控制青海湖E/P比值最重要的因素, 因而青海湖沉积物碳酸盐含量可作为区域温度变化的代用指标(Xu等, 2006b, 2008). 但陈发虎等(2007)指出博斯腾湖沉积物碳酸盐含量主要反映区域有效湿度变化; Sasikul湖的工作也得出相似的结论(Lei等, 2014).

赛里木湖为高寒深水湖泊, 其深水区无水生植物, 因而生物成因碳酸盐沉淀较弱; 而赛里木湖从12月至翌年5月初为封冻期, 碳酸盐形成主要依靠夏季湖面强烈蒸发作用产生的化学沉淀. 而赛里木湖湖水富HCO_3^-和CO_3^{2-}离子贫Ca^{2+}离子(王苏民和窦鸿身, 1998; 胡汝骥, 2004), 同时流域中灰岩广布(王树基, 1978), 有利于入湖径流携带的Ca^{2+}与湖水中HCO_3^-和CO_3^{2-}离子因蒸发作用快速生成碳酸盐($CaCO_3$)化学沉淀, 这一观点为SLML13-2-1孔碳酸盐含量平均值高达40.4%所佐证(图3). 当降水增加时, 一方面蒸发作用减弱, 不利于过饱和条件的形成; 另一方面, 随地表径流输入的陆源碎屑物质增加, 对沉积物碳酸盐起到了稀释作用, 导致其含量降低. 反之, 当降水减少时, 碳酸盐含量增加.博斯腾湖(陈发虎等, 2007; Zhang等, 2010; 张家武等, 2010)、达里湖(Xiao等, 2008)、Sasikul湖(Lei等, 2014)等湖泊沉积物中碳酸盐含量气候意义与本研究结果相似: 沉积物碳酸盐含量降低(增加)指示降水增加(减弱)、气候变湿(变干). 因此, 赛里木湖沉积物碳酸盐含量变化有效地指示区域降水变化: 碳酸盐含量减少指示区域降水增加; 反之则指示降水减少、气候变干.

5.1.3 粒度

湖泊沉积物粒径大小直接或间接地反映了沉积时的水动力条件, 而湖泊水动力条件不仅受湖泊自身特征影响(诸如面积、大小、形状和湖底地形等), 还受气候(主要是降水)和流域植被等影响. 因此, 湖泊沉积物粒度变化可作为理想的古气候变化代用指标(Peng等, 2005; Xiao等, 2009, 2013, 2015; Xu等, 2015; Lan等, 2018). 受湖泊水动力条件控制, 沉积物粒径大小在理想状态下呈同心圆分布: 粗颗粒主要沉积在近岸浅水区, 越向湖心粒径越细. 赛里木湖属中等面积的深水湖泊, 粗颗粒物质难以被搬运至湖泊中心, 因此湖泊中心沉积物粒度较小(平均粒度约为17μm). 此外, 赛里木湖为封闭湖泊, 其面积和水深变化较大(本文作者2016年夏季对该湖考察时水位比2013年夏季上升约10m). 当降水增加时, 湖面迅速上升, 湖泊中心采样点距湖岸更远, 水动力减弱, 较粗颗粒物更难以被搬运至湖泊中心, 因而沉积物粒度变细; 反之, 当降水减少时, 湖面退缩, 采样点距湖岸越近, 水动力增强, 接收到的粗颗粒物增加, 沉积物粒度变粗. 赛里木湖岩芯顶部粒度变细(图3)也正好与近几十年降水增加相吻合. 对同样是封闭湖泊的岱海(Xiao等, 2013)和达里湖(Xiao等, 2015)的研究也有相似的结论: 粗颗粒组分增加指示降水减少. 因此, 赛里木湖粒度能有效地反映区域降水变化: 平均粒径变细指示区域降水增加, 反之指示降水

减少.

5.2　赛里木湖晚全新世水文气候变化

本文利用SLM13-2-1孔的碳酸盐含量、TOC、TN、C/N和粒度重建了赛里木湖地区过去4000年水文气候变化. 如图3所示, 在4000~3780、3590~3210、2800~2160和890~280cal a BP所有指标皆显著降低, 表明赛里木湖地区在这4个时期降水显著增加; 1700~1370cal a BP所有指标均存在一定程度降低, 暗示赛里木湖地区在该时期降水量有所增加, 但并不显著. 其中, 1700~1370和890~280cal a BP降水增加时期可能与黑暗冷期和小冰期相对应.

此外, 所有指标均在最近100年以来异常降低, 包括TOC含量(图3). 通常而言, 湖泊表层沉积物TOC含量会呈明显增长趋势(Xiao等, 2008; Xu等, 2013; Anderson等, 2014; Heathcote等, 2015). 这种差异一方面说明赛里木湖受人类活动影响较弱, 另一方面暗示本文所有指标降低都有效地指示了最近100年赛里木湖地区降水显著增加, 这与前人在该湖通过其他指标所反映的降水变化基本一致(Liu W等, 2014), 亦与最近几十年该地区器测资料记录的降水变化相吻合(胡汝骥, 2004).

5.3　中亚东部晚全新世水文气候变化

中亚东部地区晚全新世古气候记录相对较少, 但通过与我们工作的对比分析, 仍可揭示该地区晚全新世以来在数十年-百年时间尺度上区域水文气候变化历史. 由于受中纬西风环流、西伯利亚高压和亚洲夏季风的相互作用(Herzschuh, 2006; Chen等, 2008, 2010; Rudaya等, 2009; Wang等, 2013; Long等, 2017; Wolff等, 2017), 中亚东部地区气候变化呈现一定的区域差异, 因而晚全新世水文气候变化在空间上可能存在较大的复杂性.

通过赛里木湖与中亚东部地区过去4000年水文气候变化对比分析(图4), 表明该地区晚全新世存在相似的气候和环境变化模式. 为了进一步证实赛里木湖降水指标的区域代表性, 我们将TOC含量与区域湿度代表指标——帕米尔高原喀拉库勒湖叶蜡δD(Aichner等, 2015)进行对比(图4). 结果显示: 在很大程度上, 赛里木湖TOC低值时期与喀拉库勒湖δD偏负相对应, TOC高值时期与δD偏正相对应; 这一结果印证了前文述及的暗示赛里木湖TOC含量可作为区域水文气候变化的有效代用指标. 但是, 由于定年误差、样品分辨率和采样点的区域特征等因素, 3590~3210cal a BP赛里木湖地区降水增加在喀拉库勒湖中并未记录到. 这种差异可能恰好揭示了中亚东部地区晚全新世水文气候变化的空间复杂性, 表明需要更多的研究才能全面认识该地区水文气候变化过程. 但是, 赛里木湖记录的降水增加阶段在中亚东部地区仍然存在广泛的一致性. 例如, 吉尔吉斯斯坦中部Son Kol湖δ^{15}N记录的冬季降水增加(Lauterbach等, 2014)、新疆博斯腾湖介形虫δ^{18}O记录的高湖面(高盐度; Mischke和Wunnemann, 2006)、青藏高原西北地区班公错碳酸盐δ^{18}O记录的湿度增加(Fontes等, 1996), 等等, 皆与赛里木湖降水增加相吻合. 此外, 3800~3600cal a BP赛里木湖TOC显著增加指示的干旱环境与玛纳斯湖孢粉含量降低、A/C比最低(Rhodes等, 1996)一致, 表明该时段干旱环境可能广泛存在. 将蒋庆丰等(2013)在赛里木湖的记录扣除本文给出的碳库效应(1073年)后, 其A/C比亦与本文的TOC变化大体一致(图4), 不仅表明本文重建结果的可靠性, 还暗示赛里木湖甚至我国西北地区的湖泊定年中都应充分考虑碳库效应的影响.

最近2000年赛里木湖记录了两个降水增加阶段, 其中小冰期(~890~280cal a BP)降水显著增加, 而黑暗冷期(1700~1370cal a BP)却并不突出(图4). 这两个时段降水增加与中亚西风控制区水文气候变化模式存在广泛的一致性(Chen等, 2010, 2015; Lan等, 2018). 基于17个水文气候记录, Chen等(2010)提出中亚干旱区小冰期湿润而中世纪暖期干旱的观点, 并指出与亚洲季风区水文气候变化模式存在错相位关系, 这一观点为后续的研究所支持(Chen等, 2015). 最近, Lan等(2017)基于天山哈尔努尔湖粗颗粒组分(20~22μm)含量变化得出小冰期和黑暗冷期降水显著增加,并结合中亚不同地区气候记录指出在最近2000年不论中亚干旱区还是中亚高山区水文气候变化皆呈暖干-冷湿的模式. Feng等(2013)基于孢粉重建的降水变化表明巴尔喀什湖在650~100cal a BP降水增加. 新疆Tiewaike湖(Li等, 2017)和玛纳斯湖(Song等, 2015)研究也表明小冰期湿润而中世纪暖期干旱的水文气候变化特征.与赛里木湖紧邻的艾比湖在小冰期A/C比显著增加(图4; Wang等, 2013),碳酸盐含量降低、有机碳和碳酸盐氧同位素偏负(Ma等, 2011)皆指示该时期区域降水增加. 博

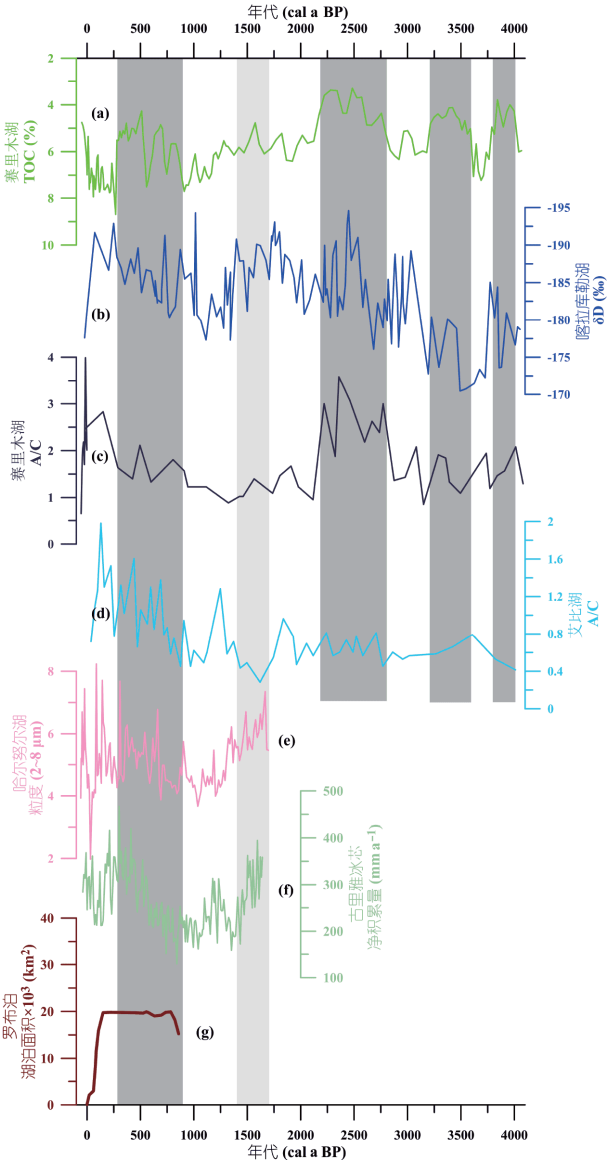


图 4　赛里木湖记录的降水变化与中亚东部地区对比

(a) 天山赛里木湖TOC(本研究); (b) 帕米尔高原喀拉库勒湖δD(Aichner等, 2015); (c) 天山赛里木湖孢粉A/C比(扣除1073年碳库效应后; 蒋庆丰等, 2013); (d) 新疆艾比湖A/C比(Wang等, 2013); (e) 天山哈尔努尔湖粗颗粒组分含量(Lan等, 2018); (f) 青藏高原北部古里雅冰芯净积累量(姚檀栋等, 1996; Thompson等, 1997); (g) 新疆罗布泊面积(Putnam等, 2016)

斯腾湖碳酸盐含量、孢粉组合和粒度等指标了揭示小冰期湿润的气候特征, 并在最近千年气候变化组合以暖干和冷湿为主(陈发虎等, 2007). Liu等(2011)基于塔里木盆地东部干旱区沙包植物$\delta^{13}C$揭示小冰期显著变湿的气候特征. 中天山Son Kol湖δD记录的夏季湿度在800cal a BP以来显著升高, 而1750~800cal a BP湿度降低, 也暗示小冰期湿润而中世纪干旱的气候特征(Lauterbach等, 2014). 帕米尔高原Sasikul湖在小冰期碳酸盐$\delta^{18}O$偏负、无机碳和粗砂含量降低, 指示该时期显著偏湿且湖面上升(Lei等, 2014). 喀拉库勒湖叶蜡δD (Aichner等, 2015)在小冰期和黑暗冷期同位素相对偏负(图4), 也表明在这两个时期降水/湿度增加. 塔里木盆地西缘孢粉记录揭示~1750~1260和~550~390cal a BP两个时期湿度增加(Zhao等, 2012). 此外, 同样受西风环流控制的青藏高原北部地区也记录了小冰期和黑暗冷期降水/湿度增加. 例如, 班公错碳酸盐$\delta^{18}O$(Fontes等, 1996)、古里雅冰芯净积累量(图4; 姚檀栋等, 1996; Thompson等, 1997)、敦德冰芯孢粉记录(Liu等, 1998), 以及德令哈树轮$\delta^{18}O$(王文志等, 2013)等都显示黑暗冷期和/或小冰期降水/湿度增加.

虽然上述研究在小冰期开始时间上都晚于赛里木湖, 但最近Putnam等(2016)基于大量地质证据, 指出罗布泊持续湿润气候条件(湖面扩张)开始于12世纪晚期, 与本文所得结果一致(图4). 因此, 我们认为赛里木湖地区小冰期降水增加开始于~890cal a BP是可信的.

5.4　中亚东部晚全新世水文气候变化的可能驱动机制

中亚东部晚全新世以来水文气候变化的一致性表明上述时期降水增加并非是局地信号, 很可能与半球尺度大气环流变化有关.

中亚东部地区气候年际变化受多种因素的相互作用(Aizen等, 1997, 2001, 2006; Chen等, 2010; Cheng等, 2012; Lauterbach等, 2014; Wolff等, 2017). 但正如Cheng等(2012)所指出, 在太阳辐射量较低时期(如晚全新世)亚洲夏季风难以深入中亚地区. Seong等(2009)在帕米尔高原慕士塔格的工作也指出印度夏季风对该地区降水贡献较小. 西伯利亚高压控制下气候冷干, 对中亚地区年降水的直接贡献较小, 但Aizen等(2001)认为当西伯利亚高压位置东移时由于反气旋的作用导致亚洲内陆降水增加.而西伯利亚高原对中亚地区长期气候变化的影响和机制仍有待进一步澄清.

基于阿尔泰山冰芯(Belukha)和天山冰芯(Inilchek)$\delta^{18}O$研究, Aizen等(2006)揭示中亚地区降水主要是中纬西风环流从咸海-里海、地中海、黑海和北大西洋地区携带而来, 这为后向轨迹分析所佐证(Wolff等,

2017). 此外, 基于145个气象站记录, Aizen等(2001)提出中亚地区降水与北大西洋涛动(NAO)指数之间存在显著负相关, 认为在NAO负相位时中纬西风环流南移, 中亚地区降水增加; 反之, 降水减少. Wolff等(2017)利用KNMI模拟也得出在1950~2015年期间, NAO偏负时期, 中亚地区降水偏多. 基于上述观点, 本文将赛里木湖记录的降水变化与格陵兰湖泊记录的NAO指数(Olsen等, 2012)、阿尔卑斯南部湖泊记录的洪水频率(亦指示NAO变化; Wirth等, 2013)、和太阳辐射量变化(Stuiver等, 1998; Bard等, 2000; Reimer等, 2004)进行对比. 结果表明, 最近4000年赛里木湖降水增加时期与NAO指数偏负、阿尔卑斯南部洪水频率增加、以及太阳活动减弱相对应(图5). 这揭示太阳活动减弱(太阳辐射量降低)及其整个环北大西洋地区大气环流南移

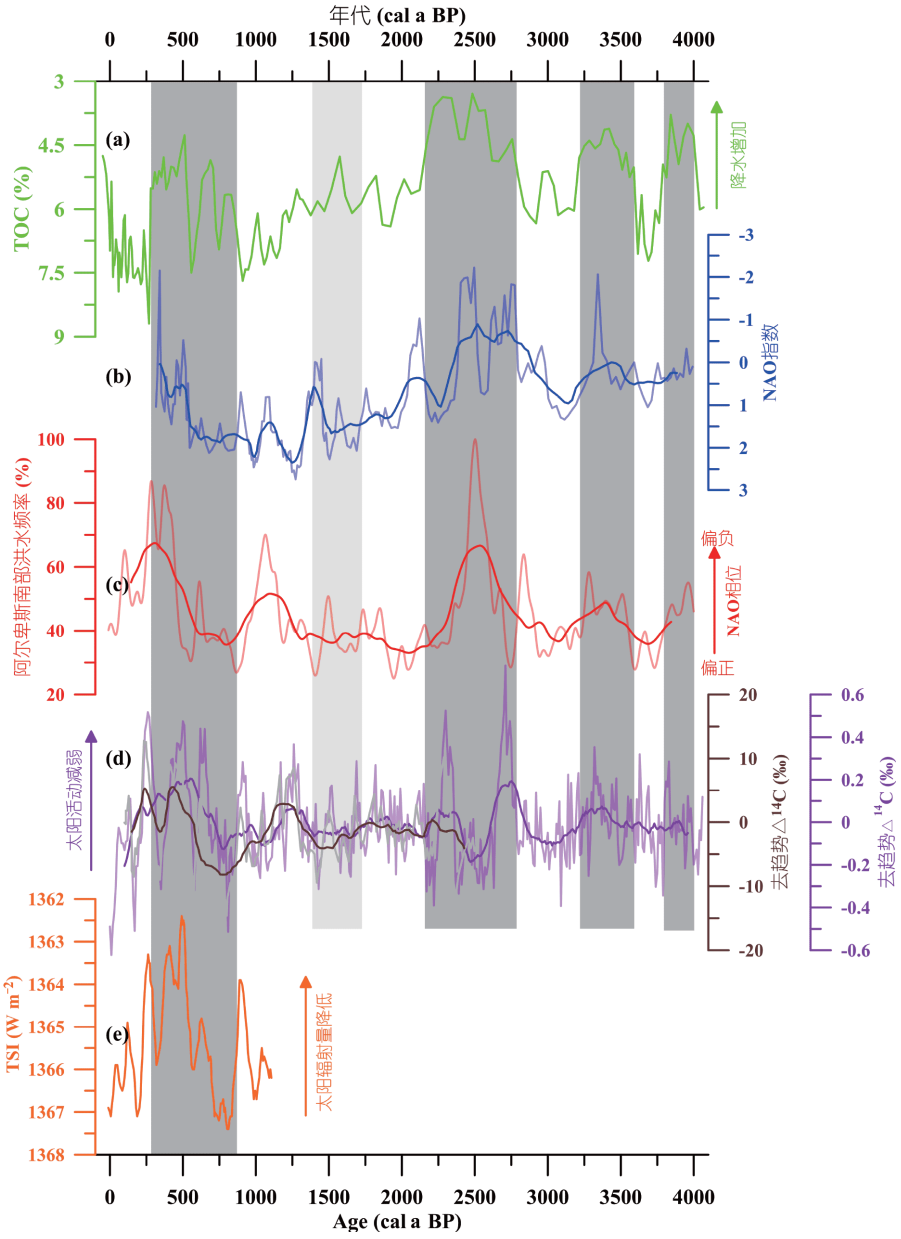


图 5　赛里木湖记录的降水变化与北大西洋涛动及太阳活动

(a) 赛里木湖降水记录(本研究); (b) 格陵兰湖泊重建的NAO指数(Olsen等, 2012); (c) 阿尔卑斯南部洪水频率所反映的NAO指数(Wirth等, 2013); (d) 去趋势的太阳活动(紫色, Stuiver等, 1998; 棕色, Reimer等, 2004); (e) 太阳辐射量变化(Bard等, 2000)

(Wirth等, 2013), 特别是中纬西风环流主要路径的南移, 对中亚地区降水增加产生了重要影响. 这一结果与前人的观点相相吻合: 当NAO负相位时, 西风环流南移, 更加湿润的水汽进入中亚地区, 导致降水增加(Aizen等, 2006; Chen等, 2010; Lei等, 2014; Lan等, 2018; Wolff等, 2017). 例如, Chen等(2010)指出在小冰期NAO为负相位(Trouet等, 2009), 北大西洋和地中海气旋活动加强, 促使中纬西风环流携带更多湿润水汽进入中亚地区, 导致降水/湿度增加. 因此, 赛里木湖地区最近4000年降水变化很可能是由于太阳活动变化(Stuiver等, 1998; Bard等, 2000; Reimer等, 2004; Orme等, 2017)引起整个环北大西洋地区大气环流的南北移动所致(Trouet等, 2009; Olsen等, 2012;Wirth等, 2013). 但由于尚未全面了解中纬西风环流如何影响中亚地区降水, 因而其背后的机制和过程仍有待进一步研究(Deininger等, 2017).

6 结论

基于TOC、TN、碳酸盐含量、C/N比和粒度变化, 本文重建了中天山赛里木湖地区晚全新世以来数十年至百年尺度水文气候变化历史. 结果揭示了5个降水增加时期: 4000~3780、3590~3210、2800~2160、1700~1370和890~280cal a BP, 其中后两次降水增加时期分别与黑暗冷期和小冰期相对应. 赛里木湖记录的降水变化与中亚东部地区其他古气候记录存在广泛的一致性, 表明晚全新世以来中亚西风控制区具有相似的水文气候变化模式. 通过与太阳活动、NAO指数和阿尔卑斯南部降水频率等对比分析, 揭示了太阳活动变化及整个环北大西洋地区大气环流变化, 特别是中纬西风环流位置的南北移动, 是引起研究区水文气候变化的最主要因素. 这一结果表明了半球尺度气候变化的紧密联系, 为研究中纬西风环流对中亚地区气候变化的过程和机制提供了参考. 另外, 在全球变暖的背景下, 赛里木湖地区最近100年降水持续增加, 但整个中亚地区未来水文气候如何变化仍需进一步深入研究.

致谢 感谢审稿人对论文修改提出的宝贵意见, 感谢新疆博州赛里木湖风景名胜区管理委员会在样品采集中提供的大力支持. 本工作属于中国科学院地球环境研究所"一带一路"研究计划的一部分.

参考文献

陈发虎, 黄小忠, 张家武, Holmes J A, 陈建徽. 2007. 新疆博斯腾湖记录的亚洲内陆干旱区小冰期湿润气候研究. 中国科学D辑: 地球科学, 37: 77–85

侯居峙, D'Andrea W D, 柳中晖. 2012. 湖泊碳库效应对青藏高原气候变化解释的影响探讨. 第四纪研究, 32: 441–453

胡汝骥. 2004. 中国天山自然地理. 北京: 中国环境科学出版社. 278–284

蒋庆丰, 季俊峰, 沈吉, Ryo M, 童国榜, 钱鹏, 任雪梅, 闫德智. 2013. 赛里木湖孢粉记录的亚洲内陆西风区全新世植被与气候变化. 中国科学: 地球科学, 43: 243–255

刘禹, 安芷生, Hans W L, Deliang C, 宋慧明, 蔡秋芳, 孙军艳, 田华. 2009. 青藏高原中东部过去2485年以来温度变化的树轮记录. 中国科学D辑: 地球科学, 39: 166–176

万国江. 1995. ^{137}Cs及^{210}Pb$_{ex}$方法湖泊沉积计年研究新进展. 地球科学进展, 10: 188–192

王树基. 1978. 关于赛里木湖的形成、演变与第四纪古冰川作用的关系. 干旱区地理, 1: 47–55

王苏民, 窦鸿身. 1998. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社. 348–349

王文志, 刘晓宏, 徐国保, 邵雪梅, 秦大河, 孙维贞, 安文玲, 曾小敏. 2013. 柴达木盆地树轮δ^{18}O记录的过去1000年湿度变化. 科学通报, 58: 3458–3463

吴敬禄, 曾海鳌, 马龙, 白瑞东. 2012. 新疆主要湖泊水资源及近期变化分析. 第四纪研究, 32: 142–150

徐海, 刘晓燕, 安芷生, 侯昭华, 董吉宝, 刘斌. 2010. 青海湖现代沉积速率空间分布及沉积通量初步研究. 科学通报, 55: 384–390

姚檀栋, 秦大河, 田立德, 焦克勤, 杨志红, 谢超, Thompson L G. 1996. 青藏高原2 ka来温度与降水变化——古里雅冰芯记录. 中国科学D辑: 地球科学, 26: 348–353

张家武, 王君兰, 郭小燕, 李双, 何晶, 陈硕, 黄小忠, 陈发虎. 2010. 博斯腾湖全新世岩芯沉积物碳酸盐氧同位素气候意义. 第四纪研究, 30: 1078–1087

Aichner B, Feakins S J, Lee J E, Herzschuh U, Liu X. 2015. High-resolution leaf wax carbon and hydrogen isotopic record of the late Holocene paleoclimate in arid Central Asia. Clim Past, 11: 619–633

Aizen E M, Aizen V B, Melack J M, Nakamura T, Ohta T. 2001. Precipitation and atmospheric circulation patterns at mid-latitudes of Asia. Int J Climatol, 21: 535–556

Aizen V B, Aizen E M, Joswiak D R, Fujita K, Takeuchi N, Nikitin S A. 2006. Climatic and atmospheric circulation pattern variability from ice-core isotope/geochemistry records (Altai, Tien Shan and Tibet). Ann Glaciol, 43: 49–60

Aizen V B, Aizen E M, Melack J M, Dozier J. 1997. Climatic and hydrologic changes in the Tien Shan, Central Asia. J Clim, 10: 1393–1404

Anderson N J, Bennion H, Lotter A F. 2014. Lake eutrophication and its implications for organic carbon sequestration in Europe. Glob Change Biol, 20: 2741–2751

Appleby P G. 2001. Chronostratigraphic techniques in recent sediments. In: Last W M, Smol J P, eds. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques. Dordrecht: Springer Netherlands. 171–203

Appleby P G, Oldfield F, Thompson R, Huttunen P, Tolonen K. 1979. ^{210}Pb dating of annually laminated lake sediments from Finland. Nature, 280: 53–55

Bard E, Raisbeck G, Yiou F, Jouzel J. 2000. Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. Tellus B-Chem Phys Meteorol, 52: 985–992

Bond G, Kromer B, Beer J, Muscheler R, Evans M N, Showers W, Hoffmann S, Lotti-Bond R, Hajdas I, Bonani G. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. Science, 294: 2130–2136

Buckley B M, Anchukaitis K J, Penny D, Fletcher R, Cook E R, Sano M, Canh Nam L, Wichienkeeo A, That Minh T, Hong T M. 2010. Climate as a contributing factor in the demise of Angkor, Cambodia. Proc Natl Acad Sci USA, 107: 6748–6752

Chen F H, Chen J H, Holmes J, Boomer I, Austin P, Gates J B, Wang N L, Brooks S J, Zhang J W. 2010. Moisture changes over the last millennium in arid central Asia: A review, synthesis and comparison with monsoon region. Quat Sci Rev, 29: 1055–1068

Chen F H, Yu Z C, Yang M L, Huang X, Zhao Y, Sato T, Birks H J B, Boomer I, Chena J, Ana C, Wunnemannj B. 2008. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history. Quat Sci Rev, 27: 351–364

Chen J H, Chen F H, Feng S, Huang W, Liu J B, Zhou A F. 2015. Hydroclimatic changes in China and surroundings during the Medieval climate anomaly and little ice age: Spatial patterns and possible mechanisms. Quat Sci Rev, 107: 98–111

Chen Y N, Li W H, DengH J, Fang G H, Li Z. 2016. Changes in central Asia's water tower: Past, present and future. Sci Rep, 6: 35458

Cheng H, Zhang P Z, Spötl C, Edwards R L, Cai Y J, Zhang D Z, Sang W C, Tan M, An Z S. 2012. The climatic cyclicity in semiarid-arid central Asia over the past 500000 years. Geophys Res Lett, 39: L01705

Cook E R, Woodhouse C A, Eakin C M, Meko D M, Stahle D W. 2004. Long-term aridity changes in the western United States. Science, 306: 1015–1018

Deininger M, McDermott F, Mudelsee M, Werner M, Frank N, Mangini A. 2017. Coherency of late Holocene European speleothem δ^{18}O records linked to North Atlantic Ocean circulation. Clim Dyn, 49: 595–618

Diaz H F, Trigo R, Hughes M K, Mann M E, Xoplaki E, Barriopedro D. 2011. Spatial and temporal characteristics of climate in Medieval Times revisited. Bull Amer Meteorol Soc, 92: 1487–1500

Feng Z D, Wu H N, Zhang C J, Ran M, Sun A Z. 2013. Bioclimatic change of the past 2500 years within the Balkhash Basin, eastern Kazakhstan, Central Asia. Quat Int, 311: 63–70

Fontes J C, Gasse F, Gibert E. 1996. Holocene environmental changes in Lake Bangong basin (western Tibet). Part 1: Chronology and stable isotopes of carbonates of a Holocene lacustrine core. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 120: 25–47

Graham N E, Ammann C M, Fleitmann D, Cobb K M, Luterbacher J. 2011. Support for global climate reorganization during the "Medieval Climate Anomaly". Clim Dyn, 37: 1217–1245

Gray L J, Beer J, Geller M, Haigh J D, Lockwood M, Matthes K, Cubasch U, Fleitmann D, Harrison G, Hood L, Luterbacher J, Meehl G A, Shindell D, van Geel B, White W. 2010. Solar influences on climate. Rev Geophys, 48: RG4001

Heathcote A J, Anderson N J, Prairie Y T, Engstrom D R, del Giorgio P A. 2015. Large increases in carbon burial in northern lakes during the Anthropocene. Nat Commun, 6: 10016

Herzschuh U. 2006. Palaeo-moisture evolution in monsoonal Central Asia during the last 50000 years. Quat Sci Rev, 25: 163–178

Hodell D A, Brenner M, Curtis J H, Guilderson T. 2001. Solar forcing of drought frequency in the Maya lowlands. Science, 292: 1367–1370

Hodell D A, Curtis J H, Brenner M. 1995. Possible role of climate in the collapse of Classic Maya civilization. Nature, 375: 391–394

Hou J Z, D'Andrea W J, Liu Z H. 2012. The influence of ^{14}C reservoir age on interpretation of paleolimnological records from the Tibetan Plateau. Quat Sci Rev, 48: 67–79

Huang X T, Oberhansli H, von S H, Prasad S, Sorrel P, Plessen B, Mathis M, Usubaliev R. 2014. Hydrological changes in western Central Asia (Kyrgyzstan) during the Holocene as inferred from a palaeolimnological study in lake Son Kul. Quat Sci Rev, 103: 134–152

IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Cambridge: Cambridge University Press. 996

Klaminder J, Appleby P, Crook P, Renberg I. 2012. Post-deposition diffusion of ^{137}Cs in lake sediment: Implications for radiocaesium dating. Sedimentology, 59: 2259–2267

Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. 2006. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using δ^{13}C and C/N ratios in organic material. Earth-Sci Rev, 75: 29–57

Lan J H, Xu H, Sheng E G, Yu K K, Wu H X, Zhou K E, Yan D N, Ye Y

D, Wang T L. 2018. Climate changes reconstructed from a glacial lake in High Central Asia over the past two millennia. Quat Int, 487: 43–53

Lauterbach S, Witt R, Plessen B, Dulski P, Prasad S, Mingram J, Gleixner G, Hettler-Riedel S, Stebich M, Schnetger B, Schwalb A, Schwarz A. 2014. Climatic imprint of the mid-latitude Westerlies in the Central Tian Shan of Kyrgyzstan and teleconnections to North Atlantic climate variability during the last 6000 years. Holocene, 24: 970–984

Lei Y B, Tian L D, Bird B W, Hou J Z, Ding L, Oimahmadov I, Gadoev M. 2014. A 2540-year record of moisture variations derived from lacustrine sediment (Sasikul Lake) on the Pamir Plateau. Holocene, 24: 761–770

Li X Q, Zhao K L, Dodson J, Zhou X Y. 2011. Moisture dynamics in central Asia for the last 15 kyr: New evidence from Yili Valley, Xinjiang, NW China. Quat Sci Rev, 30: 3457–3466

Li Y, Qiang M R, Zhang J W, Huang X Z, Zhou A F, Chen J H, Wang G G, Zhao Y. 2017. Hydroclimatic changes over the past 900 years documented by the sediments of Tiewaike Lake, Altai Mountains, Northwestern China. Quat Int, 452: 91–101

Liu K, Yao Z, Thompson L G. 1998. A pollen record of Holocene climatic changes from the Dunde ice cap, Qinghai-Tibetan Plateau. Geology, 26: 135

Liu W, Wu J, Ma L, Zeng H. 2014. A 200-year sediment record of environmental change from Lake Sayram, Tianshan Mountains in China. GFF, 136: 548–555

Liu W, Wu J L, Ma L, Zeng H A. 2011. Wet climate during the ‘Little Ice Age’ in the arid Tarim Basin, northwestern China. Holocene, 21: 409–416

Liu X Q, Dong H L, Yang X D, Herzschuh U, Zhang E L, Stuut J B W, Wang Y B. 2009. Late Holocene forcing of the Asian winter and summer monsoon as evidenced by proxy records from the northern Qinghai-Tibetan Plateau. Earth Planet Sci Lett, 280: 276–284

Liu X Q, Herzschuh U, Wang Y B, Kuhn G, Yu Z T. 2014. Glacier fluctuations of Muztagh Ata and temperature changes during the late Holocene in westernmost Tibetan Plateau, based on glaciolacustrine sediment records. Geophys Res Lett, 41: 6265–6273

Long H, Shen J, Chen J, Tsukamoto S, Yang L, Cheng H, Frechen M. 2017. Holocene moisture variations over the arid central Asia revealed by a comprehensive sand-dune record from the central Tian Shan, NW China. Quat Sci Rev, 174: 13–32

Ma L, Wu J, Yu H, Haiao Z, Abuduwaili J. 2011. The medieval warm period and the little ice age from a sediment record of Lake Ebinur, northwest China. Boreas, 40: 518–524

Meyers P A. 1990. Impacts of late Quaternary fluctuations in water level on the accumulation of sedimentary organic matter in Walker Lake, Nevada. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 78: 229–240

Meyers P A. 1994. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. Chem Geol, 114: 289–302

Meyers P A. 1997. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes. Org Geochem, 27: 213–250

Meyers P A. 2003. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: A summary of examples from the Laurentian Great Lakes. Org Geochem, 34: 261–289

Meyers P A, Ishiwatari R. 1993. Lacustrine organic geochemistry—An overview of indicators of organic matter sources and diagenesis in lake sediments. Org Geochem, 20: 867–900

Meyers P A, Teranes J L. 2001. Sediment organic matter. In: Last W M, Smol J P, eds. Tracking Environmental Change Using Lake Sediments. Volume 2: Physical and Geochemical Methods. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 239–240

Mischke S, Wunnemann B. 2006. The Holocene salinity history of Bosten Lake (Xinjiang, China) inferred from ostracod species assemblages and shell chemistry: Possible palaeoclimatic implications. Quat Int, 154-155: 100–112

Moffa-Sánchez P, Born A, Hall I R, Thornalley D J R, Barker S. 2014. Solar forcing of North Atlantic surface temperature and salinity over the past millennium. Nat Geosci, 7: 275–278

Muller A, Mathesius U. 1999. The palaeoenvironments of coastal lagoons in the southern Baltic Sea, I. The application of sedimentary C-org/N ratios as source indicators of organic matter. Palaeogeogr Palaeoclim Palaeoeco,145: 1–16

Olsen J, Anderson N J, Knudsen M F. 2012. Variability of the North Atlantic oscillation over the past 5200 years. Nat Geosci, 5: 808–812

Orme L C, Charman D J, Reinhardt L, Jones R T, Mitchell F J G, Stefanini B S, Barkwith A, Ellis M A, Grosvenor M. 2017. Past changes in the North Atlantic storm track driven by insolation and sea-ice forcing. Geology, 45: 335–338

Pederson N, Hessl A E, Baatarbileg N, Anchukaitis K J, Di Cosmo N. 2014. Pluvials, droughts, the Mongol Empire, and modern Mongolia. Proc Natl Acad Sci USA, 111: 4375–4379

Peng Y J, Xiao J, Nakamura T, Liu B L, Inouchi Y. 2005. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China. Earth Planet Sci Lett, 233: 467–479

Pennington W, Tutin T G, Cambray R S, Fisher E M. 1973. Observations on lake sediments using fallout ^{137}Cs as a tracer. Nature, 242: 324–326

Putnam A E, Putnam D E, Andreu-Hayles L, Cook E R, Palmer J G,

Clark E H, Wang C, Chen F, Denton G H, Boyle D P, Bassett S D, Birkel S D, Martin-Fernandez J, Hajdas I, Southon J, Garner C B, Cheng H, Broecker W S. 2016. Little Ice Age wetting of interior Asian deserts and the rise of the Mongol Empire. Quat Sci Rev, 131: 33–50

Putyrskaya V, Klemt E, Röllin S. 2009. Migration of ^{137}Cs in tributaries, lake water and sediment of Lago Maggiore (Italy, Switzerland)—Analysis and comparison with Lago di Lugano and other lakes. J Environ Radioact, 100: 35–48

Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, Bayliss A, Warren Beck J, Bertrand C J H, Blackwell P G, Buck C E, Burr G S, Cutler K B, Damon P E, Lawrence Edwards R, Fairbanks R G, Friedrich M, Guilderson T P, Hogg A G, Hughen K A, Kromer B, McAffmac G, Manning S, Bronk Ramsey C, Reimer R W, Remmele S, Southon J R, Stuiver M, Talamo S, Taylor F W, van der Plicht J, Weyhenmeyer C E. 2004. Intcal04 terrestrial radiocarbon age calibration, 0–26 cal kyr BP. Radiocarbon, 46: 1029–1058

Reimer P J, Baillie M G L, Bard E, Bayliss A, Beck J W, Blackwell P G, Bronk Ramsey C, Buck C E, Burr G S, Edwards R L, Friedrich M, Grootes P M, Guilderson T P, Hajdas I, Heaton T J, Hogg A G, Hughen K A, Kaiser K F, Kromer B, McCormac F G, Manning S W, Reimer R W, Richards D A, Southon J R, Talamo S, Turney C S M, van der Plicht J, Weyhenmeyer C E. 2009. Intcal09 and marine09 radiocarbon age calibration curves, 0–50000 years cal BP. Radiocarbon, 51: 1111–1150

Rhodes T E, Gasse F, Lin R, Fontes J C, Wei K, Bertrand P, Gibert E, Mélières F, Tucholka P, Wang Z, Cheng Z Y. 1996. A late Pleistocene-Holocene lacustrine record from Lake Manas, Zunggar (northern Xinjiang, western China). Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 120: 105–121

Robbins J A, Edgington D N. 1975. Determination of recent sedimentation rates in Lake Michigan using Pb-210 and Cs-137. Geochim Cosmochim Acta, 39: 285–304

Rudaya N, Tarasov P, Dorofeyuk N, Solovieva N, Kalugin I, Andreev A, Daryin A, Diekmann B, Riedel F, Tserendash N, Wagner M. 2009. Holocene environments and climate in the Mongolian Altai reconstructed from the Hoton-Nur pollen and diatom records: A step towards better understanding climate dynamics in Central Asia. Quat Sci Rev, 28: 540–554

Sanchez-Cabeza J A, Ruiz-Fernández A C. 2012. ^{210}Pb sediment radiochronology: An integrated formulation and classification of dating models. Geochim Cosmochim Acta, 82: 183–200

Schurer A P, Tett S F B, Hegerl G C. 2014. Small influence of solar variability on climate over the past millennium. Nat Geosci, 7: 104–108

Seong Y B, Owen L A, Yi C, Finkel R C, Schoenbohm L. 2009. Geomorphology of anomalously high glaciated mountains at the northwestern end of Tibet: Muztag Ata and Kongur Shan. Geomorphology, 103: 227–250

Sha L, Jiang H, Seidenkrantz M S, Knudsen K L, Olsen J, Kuijpers A, Liu Y. 2014. A diatom-based sea-ice reconstruction for the Vaigat Strait (Disko Bugt, West Greenland) over the last 5000 yr. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 403: 66–79

Sha L, Jiang H, Seidenkrantz M S, Muscheler R, Zhang X, Knudsen M F, Olsen J, Knudsen K L, Zhang W. 2016. Solar forcing as an important trigger for West Greenland sea-ice variability over the last millennium. Quat Sci Rev, 131: 148–156

Sigl M, Winstrup M, McConnell J R, Welten K C, Plunkett G, Ludlow F, Büntgen U, Caffee M, Chellman N, Dahl-Jensen D, Fischer H, Kipfstuhl S, Kostick C, Maselli O J, Mekhaldi F, Mulvaney R, Muscheler R, Pasteris D R, Pilcher J R, Salzer M, Schüpbach S, Steffensen J P, Vinther B M, Woodruff T E. 2015. Timing and climate forcing of volcanic eruptions for the past 2500 years. Nature, 523: 543–549

Song M, Zhou A F, Zhang X N, Zhao C, He Y X, Yang W Q, Liu W G, Li S H, Liu Z H. 2015. Solar imprints on Asian inland moisture fluctuations over the last millennium. Holocene, 25: 1935–1943

Stuiver M, Reimer P J. 1993. Extended ^{14}C data base and revised calib 3.0 ^{14}C age calibration program. Radiocarbon, 35: 215–230

Stuiver M, Reimer P J, Bard E, Beck J W, Burr G S, Hughen K A, Kromer B, McCormac G, Van Der Plicht J, Spurk M. 1998. INTCAL98 radiocarbon age calibration, 24000–0 cal BP. Radiocarbon, 40: 1041–1083

Sun Y B, Clemens S C, Morrill C, Lin X P, Wang X L, An Z S. 2011. Influence of Atlantic meridional overturning circulation on the East Asian winter monsoon. Nat Geosci, 5: 46–49

Sun Y B, Kutzbach J, An Z S, Clemens S, Liu Z Y, Liu W G, Liu X D, Shi Z G, Zheng W P, Liang L J, Yan Y, Li Y. 2015. Astronomical and glacial forcing of East Asian summer monsoon variability. Quat Sci Rev, 115: 132–142

Swingedouw D, Terray L, Cassou C, Voldoire A, Salas-Mélia D, Servonnat J. 2011. Natural forcing of climate during the last millennium: Fingerprint of solar variability. Clim Dyn, 36: 1349–1364

Talbot M R, Johannessen T. 1992. A high resolution palaeoclimatic record for the last 27500 years in tropical West Africa from the carbon and nitrogen isotopic composition of lacustrine organic matter. Earth Planet Sci Lett, 110: 23–37

Tan L C, Cai Y J, An Z S, Cheng H, Shen C C, Breitenbach S F M, Gao Y L, Edwards R L, Zhang H W, Du Y J. 2015. A Chinese cave links climate change, social impacts, and human adaptation over the last 500 years. Sci Rep, 5: 12284

Thiéblemont R, Matthes K, Omrani N E, Kodera K, Hansen F. 2015. Solar forcing synchronizes decadal North Atlantic climate variability. Nat Commun, 6: 8268

Thompson L G, Yao T, Davis M E, Henderson K A, MosleyThompson E, Lin P N, Beer J, Synal H A, ColeDai J, Bolzan J F. 1997. Tropical climate instability: The last glacial cycle from a Qinghai-Tibetan ice core. Science, 276: 1821–1825

Trouet V, Esper J, Graham N E, Baker A, Scourse J D, Frank D C. 2009. Persistent positive North Atlantic oscillation mode dominated the medieval climate anomaly. Science, 324: 78–80

Wang W, Feng Z D, Ran M, Zhang C J. 2013. Holocene climate and vegetation changes inferred from pollen records of Lake Aibi, northern Xinjiang, China: A potential contribution to understanding of Holocene climate pattern in East-central Asia. Quat Int, 311: 54–62

Wieland E, Santschi P H, Höhener P, Sturm M. 1993. Scavenging of chernobyl ^{137}Cs and natural ^{210}Pb in Lake Sempach, Switzerland. Geochim Cosmochim Acta, 57: 2959–2979

Wirth S B, Glur L, Gilli A, Anselmetti F S. 2013. Holocene flood frequency across the Central Alps-solar forcing and evidence for variations in North Atlantic atmospheric circulation. Quat Sci Rev, 80: 112–128

Wittkop C A, Teranes J L, Dean W E, Guilderson T P. 2009. A lacustrine carbonate record of Holocene seasonality and climate. Geology, 37: 695–698

Wolff C, Plessen B, Dudashvilli A S, Breitenbach S F, Cheng H, Edwards L R, Strecker M R. 2017. Precipitation evolution of Central Asia during the last 5000 years. Holocene, 27: 142–154

Xiao J L, Fan J W, Zhai D Y, Wen R L, Qin X G. 2015. Testing the model for linking grain-size component to lake level status of modern clastic lakes. Quat Int, 355: 34–43

Xiao J L, Fan J W, Zhou L, Zhai D Y, Wen R L, Qin X G. 2013. A model for linking grain-size component to lake level status of a modern clastic lake. J Asian Earth Sci, 69: 149–158

Xiao J L, Chang Z, Si B, Qin X, Itoh S, Lomtatidze Z. 2009. Partitioning of the grain-size components of Dali Lake core sediments: Evidence for lake-level changes during the Holocene. J Paleolimnol, 42: 249–260

Xiao J L, Si B, Zhai D Y, Itoh S, Lomtatidze Z. 2008. Hydrology of Dali Lake in central-eastern Inner Mongolia and Holocene East Asian monsoon variability. J Paleolimnol, 40: 519–528

Xiao J L, Wu J, Si B, Liang W, Nakamura T, Liu B, Inouchi Y. 2006. Holocene climate changes in the monsoon/arid transition reflected by carbon concentration in Daihai Lake of Inner Mongolia. Holocene, 16: 551–560

Xu H, Ai L, Tan L, An Z. 2006a. Geochronology of a surface core in the northern basin of Lake Qinghai: Evidence from ^{210}Pb and ^{137}Cs radionuclides. Chin J Geochem, 25: 301–306

Xu H, Ai L, Tan L, An Z. 2006b. Stable isotopes in bulk carbonates and organic matter in recent sediments of Lake Qinghai and their climatic implications. Chem Geol, 235: 262–275

Xu H, Lan J, Liu B, Sheng E, Yeager K M. 2013. Modern carbon burial in Lake Qinghai, China. Appl Geochem, 39: 150–155

Xu H, Liu X Y, Hou Z H. 2008. Temperature variations at Lake Qinghai on decadal scales and the possible relation to solar activities. J Atmos Sol-Terrestrial Phys, 70: 138–144

Xu H, Zhou X Y, Lan J H, Liu B, Sheng E G, Yu K K, Cheng P, Wu F, Hong B, Yeager K M, Xu S. 2015. Late Holocene Indian summer monsoon variations recorded at Lake Erhai, Southwestern China. Quat Res, 83: 307–314

Yan H, Sun L, Wang Y, Huang W, Qiu S, Yang C. 2011. A record of the Southern Oscillation Index for the past 2000 years from precipitation proxies. Nat Geosci, 4: 611–614

Yan H, Wei W, Soon W, An Z, Zhou W, Liu Z, Wang Y, Carter R M. 2015. Dynamics of the intertropical convergence zone over the western Pacific during the Little Ice Age. Nat Geosci, 8: 315–320

Yang B, Wang J, Brauning A, Dong Z, Esper J. 2009. Late Holocene climatic and environmental changes in arid central Asia. Quat Int, 194: 68–78

Yu K, Xu H, Lan J, Sheng E, Liu B, Wu H, Tan L, Yeager K M. 2017. Climate change and soil erosion in a small alpine lake basin on the Loess Plateau, China. Earth Surf Process Land, 42: 1238–1247

Yu S Y, Cheng P, Hou Z F. 2014. A caveat on radiocarbon dating of organic-poor bulk lacustrine sediments in arid China. Radiocarbon, 56: 127–141

Zhang C, Feng Z, Yang Q, Gou X, Sun F. 2010. Holocene environmental variations recorded by organic-related and carbonate-related proxies of the lacustrine sediments from Bosten Lake, northwestern China. Holocene, 20: 363–373

Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, Chen F H, Wang Y J, Yang X L, Liu J, Tan M, Wang X F, Liu J H, An C L, Dai Z B, Zhou J, Zhang D Z, Jia J H, Jin L Y, Johnson K R. 2008. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. Science, 322: 940–942

Zhao K L, Li X Q, Dodson J, Atahan P, Zhou X Y, Bertuch F. 2012. Climatic variations over the last 4000 cal yr BP in the western margin of the Tarim Basin, Xinjiang, reconstructed from pollen data. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol, 321-322: 16–23

(责任编委: 肖举乐)