

末次冰消期以来中国湖泊沉积记录的古气候演化及其驱动机制研究

高春亮^{1,2,3},余俊清^{1,3},闵秀云^{1,4},成艾颖^{1,3},洪荣昌^{1,4},张丽莎^{1,3}

(1. 中国科学院青海盐湖研究所,中国科学院盐湖资源综合高效利用重点实验室,青海 西宁 810008;
2. 兰州大学西部环境教育部重点实验室,甘肃 兰州 730000;3. 青海省盐湖地质
与环境重点实验室,青海 西宁 810008;4. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:末次冰消期是全球气候与环境出现较大变化的时段,其间发生了一系列气候突变事件,在全球不同地区以不同方式回应着这些事件的变化过程。综述了末次冰消期以来青藏高原高寒干旱区、西北干旱区、云贵高原湿润区以及东部平原地区的湖泊沉积记录的古气候演化特征,探讨了气候变化的驱动机制,并提出未来该研究领域亟待深入开展的工作,包括拓展高分辨率湖泊沉积记录的气候演化时间序列研究,提升学科交叉和与其他地质记录的对比研究,加强中国第四纪湖泊数据库和全球气候变化研究,以及加强水汽来源示踪研究。

关键词:末次冰消期;湖泊沉积;古气候演化;驱动机制;季风模式;西风模式

中图分类号:P467,P942

文献标识码:A

文章编号:1008-858X(2017)02-0076-13

湖泊沉积是研究过去全球变化(PAGES)的重要环境档案之一,由于湖泊沉积可用于重建不同时间尺度的古气候与古环境演变,因此受到广泛重视^[1]。末次冰消期(19~11 ka BP)是全球气候与环境出现较大变化的时段,进入末次冰消期,北半球气候变化呈现突变模式,发生了一系列亚轨道尺度的气候突发事件,譬如“B/A”暖事件^[2~3]以及“Younger Dryas (YD)”快速降温事件^[4~14]等(图1)。研究注重探讨此类气候突发事件的变速、变幅和持续时间,以及揭示这些事件的驱动机制^[15~18]。进入全新世以后,气候波动尤为显著,突发事件频发,主要包含“8.2 ka”事件^[19~25]、中全新世大暖期^[26~31]、“4.2 ka”事件^[32~37]以及中世纪暖期和小冰期^[38~41]等。这种全新世气候的不稳定性以及中晚全新世气候的干湿变化是区域性的还是全球性的,成为学术界争论的热点。鉴于

此,本文总结我国不同地区湖泊沉积对气候环境变化的代理记录,旨在通过不同区域的对比研究,加深理解末次冰消期以来气候环境变化特征及其驱动机制。

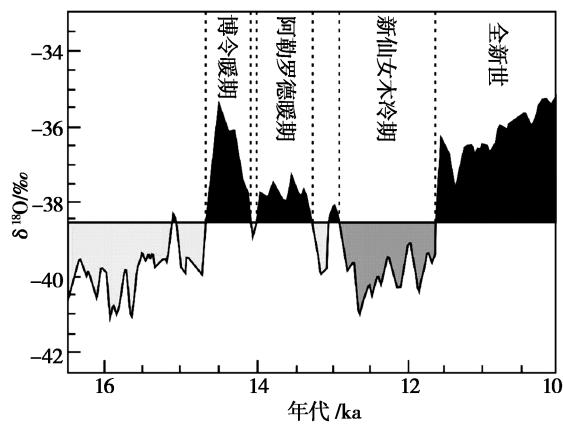


图1 GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ 记录的 16~10 ka BP 气候变化^[3]

Fig. 1 Climate change during 16~10 ka BP recorded by $\delta^{18}\text{O}$ from GISP2

收稿日期:2016-05-07;修回日期:2016-06-27

基金项目:国家自然科学基金项目(U1407206,41471013,41501052);兰州大学西部环境教育部重点实验室开放基金和兰州大学中央高校基本科研业务费专项资金(lzjbky-2015-bt01)以及中国科学院“西部之光”西部博士资助项目共同资助

作者简介:高春亮(1983-),男,博士,助理研究员,主要研究方向为湖泊沉积与环境变化。Email:gaochunliang2007@163.com。

通信作者:余俊清。Email:junqyu@isl.ac.cn。

1 末次冰消期以来我国不同区域湖泊沉积记录的古气候演化特征

1.1 青藏高原高寒干旱区

在 19.1~17.0 ka BP 期间,青藏高原西北部的甜水海钻孔岩芯记录显示此阶段古气候为冷干^[42]。17.0~15.0 ka BP 期间,青藏高原西北部的班公错、红山湖和松西错钻孔岩芯资料显示,此阶段古气候进一步向冷干方向发展^[43]。进入晚冰期(15.0~12.0 ka BP),在青藏高原中部如中、西昆仑山地区气候开始转暖,沉积记录显示进入暖湿期^[44]。约 11.5~10.0 ka BP 期间,很多湖泊水位下降,譬如色林错^[45]和松西错^[43,46~47],它们记录了该地区湖泊沉积对“YD”事件的响应。青藏高原中部封闭湖泊兹格塘错全新世的湖泊沉积岩芯分析结果表明,在 8.3~7.7 ka BP 期间,古气候显示为冷湿;在 4.7~4.2 ka BP 期间,古气候强烈波动,并向冷干方向发展,出现新冰期颤动;在 0.6~0.2 ka BP 期间,古气候显示为小冰期冷湿期气候^[48]。青藏高原可可西里地区的苟鲁错湖底

沉积岩芯碳酸盐含量变化结果表明,碳酸盐含量为低值段时都对应寒冷的时期,高值段则对应温暖时期,即近千年尺度上可可西里地区气候变化主要为暖干和冷湿的组合模式^[49]。

柴达木盆地北部大柴旦盐湖 DCD03 沉积剖面下部粉砂质粘土层的岩性特征、矿物组合特征、粒度特征以及有机质烧失量等代理记录,结合 AMS ¹⁴C 年代学研究表明,在 12.3~10.8 cal. ka BP 期间,整个湖区处于相对冷湿期。在 10.8~8.4 cal. ka BP 期间,整个湖区处在暖湿期;而在 8.4~7.8 cal. ka BP 期间,湖区气候由暖湿期过渡为暖干期,并朝干旱化方向发展(图 2)。柴达木盆地中东部克鲁克湖钻孔岩芯的孢粉记录以及其他古气候代理指标,结合 AMS ¹⁴C 年代学研究表明,克鲁克湖区在 11.9~9.5 ka BP 期间气候相对湿润;在 9.5~5.5 ka BP 期间,气候干旱;5.5 ka BP 以后气候相对湿润^[50]。柴达木盆地东缘茶卡盐湖钻孔岩芯中 TOC 和 TN 含量以及矿物学记录,结合 AMS ¹⁴C 年代学研究表明,在 11.4~5.3 ka BP 期间,湖区古气候处于暖湿期;5.3 ka BP 以后为冷干期^[51]。

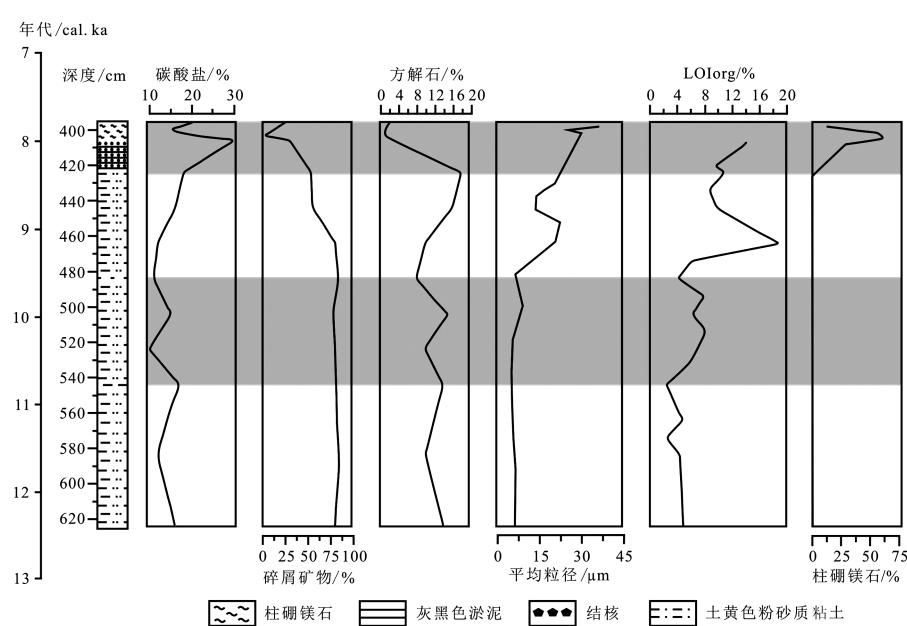


图 2 大柴旦盐湖 DCD03 沉积剖面水文气候变化的代理记录

Fig. 2 The proxy records of hydroclimate change from sediment profile DCD03 of Da Qaidam Salt Lake in Qaidam Basin

青藏高原东北部的青海湖钻孔岩芯记录显示,在 14.0~11.6 ka BP 期间古气候为冷干,在 10.7~10.0 ka BP 期间突发的干旱事件与西欧的“YD”事件年代相当,但没有气候变冷的证据^[52~54]。在全新世早期(10.0~8.0 ka BP),湖

泊沉积记录显示此阶段古气候为冷干;8.0~4.1 ka BP 为中全新世大暖期;4.1 ka BP 以后古气候仍为暖湿,相比早全新世,此时湖泊水位要高出 20 m^[54](图 3)。然而,其他学者对青海湖的研究却得出了相反的结论^[55~57]。

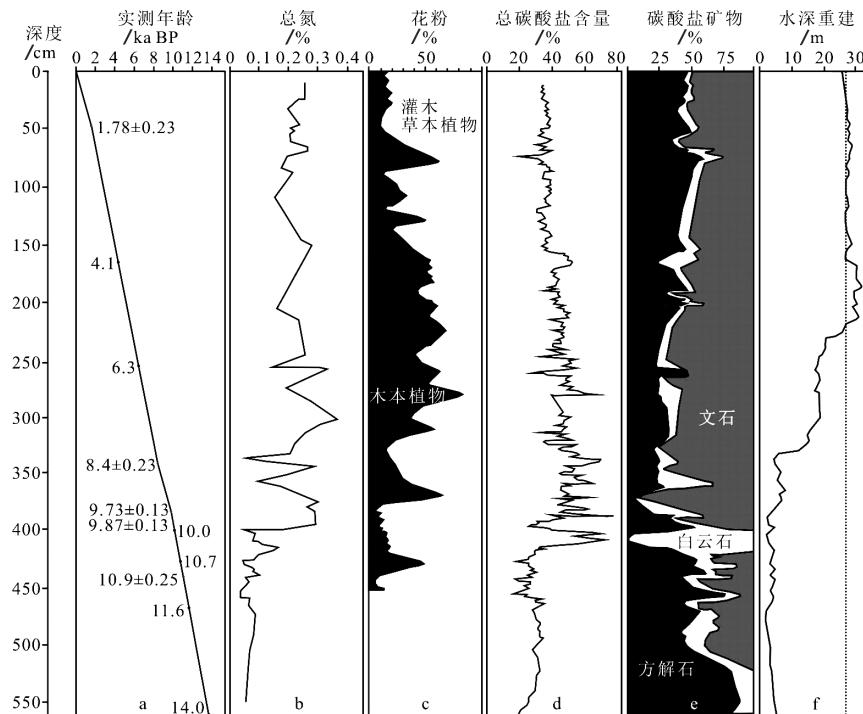


图 3 14 000 年以来青海湖水位重建的多重地层学记录和古植物学指标^[54]

Fig. 3 Reconstructed lake level of Lake Qinghai in the past 14 000 years based on evidences from multiple stratigraphic records and paleobotanic indicator

1.2 西北干旱区

西北干旱区湖泊主要分布在蒙新高原,这些湖泊大部分位于东亚季风的边缘地带,而地处新疆西北部的一些湖泊则位于西风带或西风与季风过渡带。内蒙古东南缘黄旗海沉积岩芯介形类及其壳体稳定同位素、川蔓藻种子特征以及烧失量等代理记录表明,在 16.0~10.2 ka BP 期间,湖区古气候为冷干;在 10.2~6.8 ka BP 期间,湖区古气候发生了暖湿—冷干—暖湿—冷湿的变化;在 6.8~3.8 ka BP 期间,湖区古气候以暖湿为主;3.8 ka BP 以后气候逐渐变凉,间有多次冷暖干湿的剧烈变化^[58~60]。此外,李华章等^[61]对内蒙古黄旗海剖面开展了孢子花粉、微体古生物以及微量元素分析,并结合¹⁴C 年代学研究认为,晚更新世晚期,湖区古气候为冷干;早全新世(11.1~8.0 ka BP),湖区古气候为冷湿,后期向冷干方向发展;中全新世(8.0~3.0 ka BP),湖区古气候以暖湿为主,间有冷干气候波动,其中 8.0~6.0 ka BP 为全新世气候适宜期;晚全新世以来气候逐渐变冷,间有多次冷暖干湿的波动变化。Zhang 等^[62]对内蒙古黄旗海沉积剖面开展了粒度分析,并结合 OSL 年代学研究认为,早中全新世(10.2~6.7 ka BP)为全新世气候适宜期;中晚全新世(6.7~2.2 ka BP)气候持续干旱;2.2 ka BP 以后气候波动变化,黄旗海最终演化成干盐湖。Sun 等^[63]对内蒙古岱海沉积岩芯开展了岩性、构造以及色度变化特征等代理记录研究,结合 AMS¹⁴C 年代学研究指出,在 13.0

素分析,并结合¹⁴C 年代学研究认为,晚更新世晚期,湖区古气候为冷干;早全新世(11.1~8.0 ka BP),湖区古气候为冷湿,后期向冷干方向发展;中全新世(8.0~3.0 ka BP),湖区古气候以暖湿为主,间有冷干气候波动,其中 8.0~6.0 ka BP 为全新世气候适宜期;晚全新世以来气候逐渐变冷,间有多次冷暖干湿的波动变化。Zhang 等^[62]对内蒙古黄旗海沉积剖面开展了粒度分析,并结合 OSL 年代学研究认为,早中全新世(10.2~6.7 ka BP)为全新世气候适宜期;中晚全新世(6.7~2.2 ka BP)气候持续干旱;2.2 ka BP 以后气候波动变化,黄旗海最终演化成干盐湖。Sun 等^[63]对内蒙古岱海沉积岩芯开展了岩性、构造以及色度变化特征等代理记录研究,结合 AMS¹⁴C 年代学研究指出,在 13.0

~7.3 ka BP期间,湖区古气候经历了湿润—干旱—湿润—干旱的波动变化;7.3~3.2 ka BP为全新世气候适宜期;3.2 ka BP以后湖区基本处于干旱期。值得一提的是,其他学者对内蒙古岱海的研究也得出了类似的结论^[61, 64]。曹建廷等^[65]对内蒙古岱海沉积岩芯开展了TOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、碳酸盐含量、介形类以及磁化率等代理记录研究,结合^{210\text{Pb}}年代学研究指出,岱海湖区现代小冰期具有前期冷湿和后期冷干的气候特征。

新疆北部艾比湖沉积记录显示,在10.2~8.3 ka BP期间,气候温凉偏干;在8.3~3.5 ka BP期间,气候以暖湿为主,其中8.3~7.3 ka BP为暖湿期,存在有数次明显的冷暖干湿波动,8.3 ka BP有冷干事件;3.5 ka BP以来,气候逐渐向温干方向发展,并且在百年尺度上表现为暖干—冷湿的组合特征^[66~68]。北疆东北部乌伦古湖沉积记录显示,在早全新世(12.0~7.0 ka BP),古气候经历了冷湿—暖干波动变化;在中全新世(7.0~3.0 ka BP),古气候经历了暖湿—暖干的波动变化;3.0 ka BP以来,气候逐渐向温干方向发展^[69]。新疆南部博斯腾湖多重地层学记录和古植物学指标显示,早全新世古气候表现干旱;中晚全新世古气候则表现为湿润^[70]。

1.3 云贵高原湿润区

云贵高原东缘草海沉积剖面的 $\delta^{13}\text{C}$ 值变化特征显示,在早全新世夏季风达到最盛,指示了区域古气候为湿润;而中全新世夏季风减弱指示了古气候向干旱化发展^[71]。在12.0~8.0 ka BP期间,星云湖和杞麓湖沉积岩芯较高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值指示该地区古气候呈现暖湿^[72~73]。在10.2~7.5 ka BP期间,滇池沉积岩芯中孢粉总浓度和木本浓度开始有所增加,指示古气候正向暖湿过渡^[74]。在9.7~8.8 ka BP期间,洱海沉积岩芯中木本花粉浓度有所增加,也指示该地区古气候温偏湿^[75]。在中全新世,洱海地区气候整体偏暖^[76~77]。而滇池在7.5~4.0 ka BP时段孢粉浓度含量大幅度提高,在6.5 ka BP前后达到峰值,5.0~4.5 ka BP为次高峰,指示古气候为暖湿^[74]。然而,在全新世

适宜期也有次一级的冷事件。如在7.5 ka BP前后和4.0 ka BP,滇池沉积岩芯中木本含量和孢粉总浓度处在低谷时期指示古气候寒冷^[74];洱海在7.2 ka BP和5.3 ka BP左右出现明显的偏冷干事件^[76]。在3.5~2.9 ka BP期间,滇池沉积岩芯中孢粉含量增加指示气候整体暖干^[74]。陈敬安等^[78]认为,云南洱海地区16世纪中期~19世纪末期的冷湿状况可能是现代小冰期的反映;周静等^[75]则认为1.9 ka BP以来,洱海气候以暖干为主。Chen等^[79]对云南星云湖钻孔岩芯开展了多重地层学和古植物学指标分析,结合AMS^{14\text{C}}年代学研究认为,在8.5~5.5 ka BP期间,古气候表现为暖湿;在5.5~2.0 ka BP期间,古气候向干旱化方向发展;2.0 ka BP以来,古气候呈现波动变化,表现出中世纪暖期气候变化特征。郑茜等^[80]对云贵高原泸沽湖钻孔岩芯开展了孢粉、TOC以及碳酸钙含量测定分析,结合AMS^{14\text{C}}年代学研究认为,在15.0~12.3 ka BP期间,古气候显示为温凉偏湿;在12.3~10.3 ka BP期间,古气候表现为偏暖干;在早中全新世(10.3~3.8 ka BP)古气候呈现暖湿;在3.8~3.3 ka BP期间,古气候表现为冷干;3.3 ka BP以来,气温和湿度比早中全新世均偏低。泸沽湖沉积记录不仅揭示了末次冰消期以来升温—高温—降温的变化趋势,还记录了与“YD”冷事件等相关的气候异常事件。

1.4 东部平原地区

瞿文川等^[81]对长江下游的西太湖沉积岩芯开展了TOC、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ 、磁化率、色素含量以及氢指数等代理记录研究,结合液体闪烁计数法^{14\text{C}}年代学研究认为,在14.3~13.3 ka BP期间,太湖水位低,反映此时古气候干旱;13.3~12.4 ka BP为偏暖湿过渡阶段,11.5 ka BP可能是“YD”事件的记录;在12.4~10.9 ka BP期间,古气候呈温暖—寒冷—温暖波动变化;在10.9~7.2 ka BP期间,古气候存有暖湿—暖干—暖湿波动变化;在7.2~5.7 ka BP期间,湖区古气候为暖湿;5.7 ka BP以来,气候向偏冷干方向发展。王苏民等^[82]对江苏固城湖钻孔岩芯开展了多环境指标高分辨率分析,结合

AMS ^{14}C 和液体闪烁计数法 ^{14}C 年代学研究认为,在 15.0 ~ 11.0 ka BP 期间,前期古气候主要表现为凉湿与冷干的波动变化,13.0 ~ 11.0 ka BP 阶段古气候表现出暖湿,但 11.3 ~ 11.0 ka BP 突变的降温,可能与“YD”事件相当;在 11.0 ~ 3.0 ka BP 期间,区域古气候整体上表现为暖湿;3.0 ka BP 以来,经过一次明显降温后,气候向偏冷干方向发展。此外,沈吉^[44]对我国东部平原区湖泊时空演变开展研究后认为,全新世早期气候转暖,长江中下游地区没有大规模的湖泊发育,仅出现一些零星的湖相沉积;全新世中期(7.5 ~ 3.0 ka BP),东部地区进入气候适宜期,气候温暖湿润;3.0 ka BP 以来,本区结束了全新世大暖期,气候向偏冷干方向发展。

1.5 古气候演化特征的共性和差异性

综上所述,关于我国四大区域末次冰消期以来湖泊沉积记录(图 4)的古气候演化特征方

面依然存在分歧,同时具有共性和差异性(表 1, 表 2)。纵观我国四大区域的古气候演化特征,在末次冰消期至全新世期间,“B/A”暖事件以及“YD”冷事件在很多地区的湖泊沉积中都有所记录和响应,譬如班公错、色林错、哈拉湖、大柴旦盐湖、青海湖、花海、公海、小龙湾玛珥湖、西太湖和固城湖等(表 1)。由此推论,“B/A”事件和“YD”事件并非是区域性的气候变暖和变冷事件,而是全球性的气候变暖和变冷事件。

在早全新世,东部湿润区和西部干旱区(包括青藏高原东北部)的部分湖泊沉积记录之间存有明显的反相位,但存有暖湿、冷湿以及暖干、冷干之分;在中全新世,各地区基本进入气候适宜期,但古气候仍存有波动;进入晚全新世后,各地区气候整体上向干旱化方向发展,但木格措、哈拉湖、青海湖、克鲁克湖、乌伦古湖和博斯腾湖区古气候呈现湿润特征(表 2)。值得

表 1 末次冰消期至全新世时期我国不同地区湖泊沉积记录的气候冷暖变化

Table 1 The climatic cold-warm fluctuations recorded by lacustrine sediments in different regions of China from Last Deglaciation to Holocene period

湖泊沉积记录	冷期时段/ka BP	持续时间/ka	暖期时段/ka BP	持续时间/ka
班公错 ^[43]	17.0 ~ 12.5	4.5	12.5 ~ 12.0	0.5
	11.5 ~ 10.0 (YD)	1.5		
色林错 ^[45]	12.0 ~ 10.0 (YD)	2.0	—	—
	17.0 ~ 12.5	4.5	12.5 ~ 12.0	0.5
松西错 ^[43]	11.5 ~ 10.0 (YD)	1.5		
	12.0 ~ 10.5 (YD)	1.5	—	—
哈拉湖 ^[84]	17.0 ~ 15.4 (H1)	1.6	15.4 ~ 13.0 (B/A)	2.4
	12.9 ~ 11.6 (YD)	1.3		
大柴旦盐湖	12.3 ~ 10.8 (YD)	1.5	—	—
青海湖 ^[54]	14.0 ~ 11.6	2.4	11.6 ~ 10.0	1.6
	15.9 ~ 15.0 (H1)	0.9	15.0 ~ 12.6 (B/A)	2.4
青海湖 ^[85]	12.6 ~ 11.5 (YD)	1.1		
	13.0 ~ 12.2 (YD)	0.8	—	—
花海 ^[86]	16.0 ~ 10.6	5.4	10.6 ~ 10.2	0.4
黄旗海 ^[60]	12.4 ~ 11.5 (YD)	0.9	—	—
小龙湾玛珥湖 ^[88]	12.8 ~ 11.7 (YD)	1.1	14.8 ~ 12.8 (B/A)	2.0
	14.3 ~ 13.3	1.0	13.3 ~ 11.5 (B/A)	1.8
西太湖 ^[81]	11.5 ~ 10.9 (YD)	0.6	10.9 ~ 10.0	0.9
	15.0 ~ 13.0	2.0	13.0 ~ 11.3 (B/A)	1.7
固城湖 ^[82]	11.3 ~ 11.0 (YD)	0.3		

一提的是,“8.2 ka”事件和“4.2 ka”事件在部分湖泊沉积记录中有着很好的响应。

上述显著特征除了在时间和空间上受不同的大气环流格局(东亚夏季风、东亚冬季风、西南季风和西风带,见图4)主控外,究其原因,主要表现为以下三方面:1)年代学测年精度,这受限于断代材料、取样方法以及定年方法等,需

要AMS ^{14}C 定年、OSL 定年和铀系定年等年代学方法交叉验证;2)末次冰消期以来古气候演化的湖泊沉积记录序列较少,而高分辨率沉积序列更少,受西风带气候主控区以及季风边缘区亟待开展研究工作;3)在早全新世,东部湿润区和西部干旱区(包括青藏高原东北部)的部分湖泊沉积记录之间存有明显的反相位,造

表2 全新世以来我国不同地区湖泊沉积记录的气候干湿变化

Table 2 The climatic dry-wet fluctuations recorded by lacustrine sediments in different regions of China since Holocene period

湖泊沉积记录	干旱时段/ka BP	持续时间/ka	湿润时段/ka BP	持续时间/ka
色林错 ^[45]	4.2~0.0	4.2	10.0~4.2	5.8
兹格塘错 ^[48]	4.0~0.0	4.0	9.3~4.0	5.3
木格措 ^[83]	10.0 6.2~2.5 10.0~8.0	— 3.7 2.0	10.5~6.2 2.5~0.0	4.3 2.5
尕斯库勒湖 ^[89]	4.4,4.0,2.7 2.1~0.0	— 2.1	8.0~2.1	5.9
大柴旦盐湖	8.4~7.8	0.6	10.8~8.4	2.4
克鲁克湖 ^[50]	9.9~5.5	4.4	11.9~9.5 5.5~0.0	2.4 5.5
哈拉湖 ^[84]	11.6~9.0 8.2 3.0~1.5	2.6 — 1.5	9.0~8.2 8.2~3.0 1.5~0.0	0.8 5.2 1.5
青海湖 ^[54]	10.0~8.0	2.0	8.0~0.0	8.0
乌伦古湖 ^[69]	10.0~7.0 5.0~3.0	3.0 2.0	7.0~5.0 3.0~0.0	2.0 3.0
艾比湖 ^[66]	10.2~8.3 3.5~0.0	1.9 3.5	8.3~3.5	4.8
博斯腾湖 ^[70]	12.0~8.0	4.0	8.0~0.0	8.0
黄旗海 ^[60]	3.8~0.0	3.8	10.2~3.8	6.4
岱海 ^[63]	3.2~0.0	3.2	10.0~3.2	6.8
洱海 ^[75]	8.8~8.3 5.5~0.0	0.5 5.5	10.2~8.8 8.3~5.5	1.4 2.8
泸沽湖 ^[80]	3.8~0.0	3.8	10.3~3.8	6.5
滇池 ^[74]	4.0~2.7 1.7~0.0	1.3 1.7	10.2~4.0 2.7~1.7	6.2 1.0
星云湖 ^[79]	5.5~2.0	3.5	8.5~5.5	3.0
西太湖 ^[81]	5.7~0.0	5.7	10.9~5.7	5.2
固城湖 ^[82]	3.0~0.0	3.0	11.0~3.0	8.0

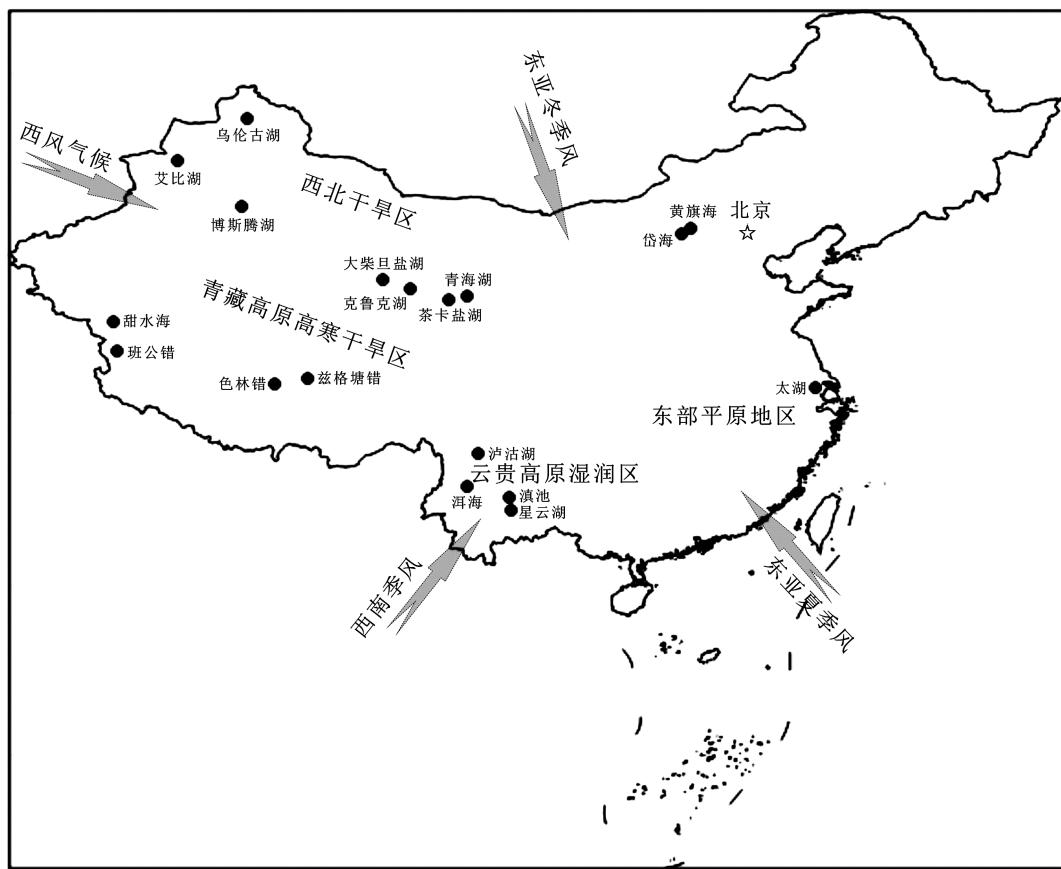


图4 中国四大区域气候变化及主要湖泊沉积代理记录分布示意图

Fig. 4 The proxy records of climate changes from lacustrine sediments in four regions of China

成这一现象的主导因素或驱动机制有哪些？有待于深入研究。

2 气候变化的驱动机制探讨

对于末次冰消期以来气候的驱动机制，因气候记录载体和地理位置的不同结论也不尽相同。目前，关于末次冰消期千年尺度气候波动的驱动机制问题仍存在很大争议。16.0~10.0 ka BP期间北半球夏季太阳辐射逐渐增加^[90]，到“YD”事件期间达到最大值^[91]。传统理论认为末次冰消期伴随太阳辐射增加全球变暖，北半球冰盖融水增加，导致北大西洋温盐环流减弱甚至中断，诱发千年尺度的气候突变事件^[92~94]。潮汐过程可能对冰山的释放起到了催化剂作用^[95]，这似乎与大洋环流快速变化^[96]和大洋一大气耦合模型模拟结果^[97~98]相吻合。然而，上述研究结论也遭受了挑战。南

极冰盖的快速变化对末次冰消期一系列气候事件可能做出了重要贡献^[99]。另外，热带东太平洋不饱和烃代理记录显示，末次冰消期千年尺度气候变化很可能受大洋温盐环流重组的驱动^[100]，而热带大洋一大气相互作用可能起到了放大作用^[101]。热带太平洋水循环对南北半球高纬度气候过程较为敏感，可能在气候突变事件中发挥了中枢作用^[102]。此外，更新世冰盖已经很大以致于相对较小的随机冰量变化也能导致显著的淡水通量变化，引发北大西洋温盐环流的显著变化，从而导致千年尺度气候变化^[103]。

关于全新世气候变化驱动机制的研究结果也是各不相同，以太阳辐射强度的变化和北大西洋温盐环流对全新世气候的影响最受关注，并应考虑受太阳黑子活动、ENSO活动和地球反射率的影响。青海共和盆地、青海湖盆地风

成沉积以及西北干旱区湖泊沉积的研究表明,末次冰消期以来气候演化长时间尺度上受控于太阳辐射所引起的季风气候变迁,而短时间尺度上受北大西洋温盐环流、太阳活动强度、地球反射率和ENSO活动等影响^[104-107]。值得一提的是,“8.2 ka”事件的出现被认为与北大西洋温盐环流的减缓和太阳活动的减弱有关^[108-110]。

Chen等^[18]集成中亚内陆干旱区湖泊水位发现,早全新世水位较低,中晚全新世水位较高,这种早全新世干旱、中晚全新世湿润的气候变化模式称为“西风模式”,这与季风区气候变化模式有明显差别(图5)。在早全新世,董哥洞石笋记录、青海湖氧同位素记录和敦德孢粉浓度记录均表明气候湿润^[111-113]。特别要注意的是,大柴旦盐湖深居柴达木盆地北部,受西风带气候主控,但早全新世气候呈现出与西风模式相反的变化模式。与此同时,早全新世的湿润(冷湿和暖湿)导致湖区蒸发量下降,有效湿度增加,这为后期湖底柱硼镁石矿层和盐类矿物的形成提供了物质基础。由此可见,全新世以来大柴旦湖区古气候变化除了受西风环流主控外,在不同时间尺度上高低海拔湿度变化可能存在差异性,区域特定地形可能起了极大作用。特定地形引发盛行西风差动效应,以致汇水流域高山区与盆地盐湖区水文气候条件的明显反差,地形差异造成高山区雨量较丰,而盆地内因雨影效应极度干旱^[114]。

3 问题与展望

近几十年以来,我国湖泊沉积与气候环境演化研究发展较为迅速,从研究区域来看,覆盖了我国大部分地区,为开展整体性和系统性研究提供了保证。然而,由于年代学测年精度问题、研究时间跨度不一致、湖泊沉积序列分辨率不一致以及气候环境代理记录不一致等因素,致使各个区域间可对比性不强,依然存有分歧。与此同时,大多数湖泊沉积的研究手段较为单一,对于与气候环境具有复杂响应关系的湖泊沉积来说,多学科和多重代理指标的综合分析与集成研究尚显不足。

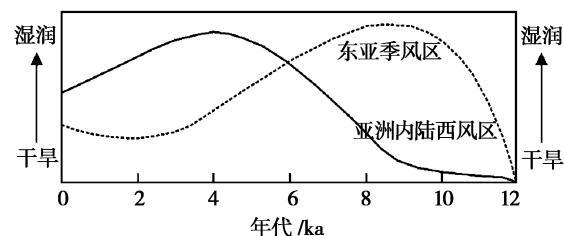


图5 全新世气候变化的季风模式和西风模式示意图^[18]

Fig. 5 The Holocene climate change patterns in monsoon Asia and arid central Asia

1)拓展高分辨率湖泊沉积记录的气候演化时间序列研究。湖泊沉积具有覆盖面积广和沉积连续的特点,是极佳的进行高分辨率气候演化的研究对象。准确而又可靠的年代学控制是完成湖泊沉积与气候演化研究的关键。针对不同的湖泊沉积物,可以采用AMS ^{14}C 、液体闪烁计数法 ^{14}C 、U-Th以及OSL等测年方法交叉验证,建立具有精确年代控制的万年尺度、千年尺度、百年尺度、十年尺度以及季节尺度古气候和古环境演变记录。20世纪80年代后期以来建立了多个湖泊的气候环境演化序列,但分辨率不一致,所采用的气候环境变化代理指标也不尽相同,给湖泊气候环境演化序列研究带来较大困难。目前无论在时间上还是在空间上都存在空白点,非常缺乏十万年以上的湖泊沉积记录,难以满足区域对比的要求。因此,急需选择关键的地段填补空白。

2)提升学科交叉以及与其他地质记录的比较研究,对湖泊沉积物进行物理、化学和生物的多重指标分析,通过多学科交叉得到符合实际的研究结果。如在流域范围内建立地表花粉—功能性植被—气候要素相关模型,定量解译湖泊沉积岩芯中孢粉代理记录所反映的湖区气候特征;基于湖泊沉积岩芯中微生物壳体的微量元素(Sr/Ca 和 Ca/Mg 比值)以及自生碳酸盐的 $\delta^{18}\text{O}$ 定量重建湖水古盐度;利用湖泊沉积岩芯中的生物标志化合物定量重建湖泊古水温等。此外,湖泊沉积记录的气候环境变化信息在一定程度上带有地域性,可以加强与黄土、深海沉积、冰芯、石笋、珊瑚、树轮和泥炭等古气候载体的对比研究,以便理解古气候干湿冷暖

变化是全球性的还是区域性的。

3) 加强中国第四纪湖泊数据库与全球气候变化研究。通过湖泊沉积、湖岸阶地地貌以及生物地层等地学证据恢复和重建的水文气候代理记录,可以客观反映大气降水和有效湿度。国际湖泊数据库研究始于20世纪70年代后期,依据不用区域多个湖泊水位的同步变化,建立区域乃至全球性古湖泊数据库,有可能提供全球气候变化的信息。全球古湖泊数据库已成功用于恢复和重建晚第四纪以来的气候和大气环流系统的时空变化,并为检验评价和改进大气环流模型提供了科学依据^[115]。中国湖泊水位数据库的研究处于起步阶段,有关湖泊的第四纪研究为建立湖泊水位数据库奠定了基础。中国第四纪湖泊水位数据库/水文气候数据库的建立可为重建东亚季风环流和季风时空变迁提供地质依据,为评价和改进古气候模型提供科学依据^[44]。

4) 加强水汽来源示踪研究。湖泊的形成以及湖泊水位、水化学的变化取决于湖泊流域的水量平衡,即有效湿度(Precipitation-Evaporation)。在重建有效湿度的同时,加强水汽来源示踪研究,主要是稳定同位素 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 示踪研究,水样包括大气降水、补给河水、冰雪融水和湖水等。这可能是解开末次冰消期以来不同时期高湖面和低湖面争论的一把钥匙,进而揭示区域古气候和古环境的演化特征。

参考文献:

- [1] 张振克,王苏民. 中国湖泊沉积记录的环境演变:研究进展与展望[J]. 地球科学进展,1999,14(4):417–422.
- [2] Stuiver M, Grootes P M, Braziunas T F. The GISP2 $\delta^{18}\text{O}$ climate record of the past 16,500 years and the role of the sun, ocean, and volcanoes [J]. Quaternary Research, 1995, 44(3): 341–354.
- [3] Stuiver M, Grootes P M. GISP2 oxygen isotope ratios[J]. Quaternary Research, 2000, 53(3): 277–284.
- [4] Abbott M B, Finney B P, Edwards M E, et al. Lake-level reconstruction and paleohydrology of Birch Lake, central Alaska, based on seismic reflection profiles and core transects[J]. Quaternary Research, 2000, 53(2):154–166.
- [5] DeMenocal P, Ortiz J, Guilderson T, et al. Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing[J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19(1): 347–361.
- [6] Salzmann U, Hoelzmann P, Morczinek I. Late Quaternary climate and vegetation of the Sudanian zone of northeast Nigeria[J]. Quaternary Research, 2002, 58(1): 73–83.
- [7] Hu F S, Shemesh A. A biogenic-silica $\delta^{18}\text{O}$ record of climatic change during the last glacial-interglacial transition in southwestern Alaska[J]. Quaternary Research, 2003, 59(3): 379–385.
- [8] Demske D, Heumann G, Granoszewski W, et al. Late glacial and Holocene vegetation and regional climate variability evidenced in high-resolution pollen records from Lake Baikal [J]. Global and Planetary Change, 2005, 46(1–4): 255–279.
- [9] An Z S, Porter S C, Zhou W J, et al. Episode of strengthened summer monsoon climate of Younger Dryas age on the Loess Plateau of central China[J]. Quaternary Research, 1993, 39(1): 45–54.
- [10] Zhou W J, Li X Q, Dong G R, et al. The high-resolution peat record of desert/loess during Younger Dryas period [J]. Science in China, Series D, 1996, 26(2): 118–123.
- [11] Yao T D, Thompson L G, Shi Y F. Climate variation since the Last Interglaciation recorded in the Guliya ice core[J]. Science in China, Series D, 1997, 40(6): 662–668.
- [12] Yang Z H, Yao T D, Huang C L, et al. Younger Dryas event recorded in Guliya ice core[J]. Chinese Science Bulletin, 1997, 42(18): 1975–1978.
- [13] Shen J, Liu X Q, Wang S M, et al. Palaeoclimatic changes in the Qinghai Lake area during the last 18,000 years[J]. Quaternary International, 2005, 136(1): 131–140.
- [14] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China[J]. Science, 2001, 294: 2345–2348.
- [15] Clemens S, Prell W, Murray D, et al. Forcing mechanisms of the Indian Ocean monsoon [J]. Nature, 1991, 353(6346): 720–725.
- [16] Overpeck J, Anderson D, Trumbore S, et al. The southwest Indian Monsoon over the last 18000 years[J]. Climate Dynamics, 1996, 12(3): 213–225.
- [17] Alley R B, Ágústsdóttir A M. The 8k event: cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change[J]. Quaternary Science Reviews, 2005, 24 (10): 1123–1149.
- [18] Chen F H, Yu Z C, Yang M L, et al. Holocene moisture evolution in arid central Asia and its out-of-phase relationship with Asian monsoon history[J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(3): 351–364.
- [19] Alley R B, Mayewski P A, Sowers T, et al. Holocene climatic instability: a prominent, widespread event 8200 yr ago[J]. Geology, 1997, 25(6): 483–486.

- [20] Stager J C, Mayewski P A. Abrupt early to mid-Holocene climatic transition registered at the equator and the poles [J]. *Science*, 1997, 276(5320): 1834–1836.
- [21] Chen F H, Zhu Y, Li J J, et al. Abrupt Holocene changes of the Asian monsoon at millennial-and centennial-scales: Evidence from lake sediment document in Minqin Basin, NW China[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2001, 46(23): 1942–1947.
- [22] Wang N L, Yao T D, Thompson L G, et al. Evidence for cold events in the early Holocene from the Guliya ice core, Tibetan Plateau, China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, 47(17): 1422–1427.
- [23] Wu J L, Shen J, Wang S M, et al. Characteristics of an early Holocene climate and environment from lake sediments in Ebinur region, NW China[J]. *Science in China, Series D*, 2005, 48(2): 258–265.
- [24] Qin J M, Yuan D X, Cheng H, et al. The YD and climate abrupt events in the early and middle Holocene: Stalagmite oxygen isotope record from Maolan, Guizhou, China[J]. *Science in China, Series D*, 2005, 48(4): 530–537.
- [25] Jin Z D, Yu J M, Chen H X, et al. The influence and chronological uncertainties of the 8.2 ka cooling event on continental climate records in China[J]. *The Holocene*, 2007, 17(7): 1041–1050.
- [26] An C B, Feng Z D, Tang L Y. Evidence of a humid mid-Holocene in the western part of Chinese Loess Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(22): 2472–2479.
- [27] Shi Y F, Kong Z C, Wang S M, et al. The climatic fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China[J]. *Science in China, Series B*, 1994, 37(3): 353–365.
- [28] Feng Z D, An C B, Wang H B. Holocene climatic and environmental changes in the arid and semi-arid areas of China: a review[J]. *The Holocene*, 2006, 16(1): 119–130.
- [29] 孙千里,肖举乐. 岱海沉积记录的季风/干旱过渡区全新世适宜期特征[J]. 第四纪研究,2006,26(5):781–790.
- [30] Li Y, Wang N A, Zhang C Q. An abrupt centennial-scale drought event and mid-Holocene climate change patterns in monsoon marginal zones of east Asia[J]. *PloS one*, 2014, DOI: 10.1371/journal.pone.0090241.
- [31] Zinke J, Pfeiffer M, Park W, et al. Seychelles coral record of changes in sea surface temperature bimodality in the western Indian Ocean from the mid-Holocene to the present[J]. *Climate Dynamics*, 2014, 43(3–4): 689–708.
- [32] Staubwasser M, Sirocko F, Grootes P M, et al. Climate change at the 4.2 ka BP termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability[J]. *Geophysical Research Letters*, 2003, DOI: 10.1029/2002GL016822.
- [33] Booth R K, Jackson S T, Forman S L, et al. A severe centennial-scale drought in midcontinental North America 4200 years ago and apparent global linkages[J]. *The Holocene*, 2005, 15(3): 321–328.
- [34] Arz H W, Lamy F, Pätzold J. A pronounced dry event recorded around 4.2 ka in brine sediments from the northern Red Sea[J]. *Quaternary Research*, 2006, 66(3): 432–441.
- [35] Drysdale R, Zanchetta G, Hellstrom J, et al. Late Holocene drought responsible for the collapse of Old World civilizations is recorded in an Italian cave flowstone[J]. *Geology*, 2006, 34(2): 101–104.
- [36] Menounos B, Clague J J, Osborn G, et al. Western Canadian glaciers advance in concert with climate change circa 4.2 ka[J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, DOI: 10.1029/2008GL033172.
- [37] 谭亮成,安芷生,蔡演军,等. 4.2 ka BP 气候事件在中国的降雨表现及其全球联系[J]. 地质论评,2008,54(1):94–104.
- [38] Thompson L G, Mosley-Thompson E, Davis M E, et al. A 1 000 year climatic ice-core record from the Guliya ice cap, China: its relationship to global climate variability[J]. *Annals of Glaciology*, 1995, 21: 175–181.
- [39] 王绍武,龚道溢. 全新世几个特征时期的中国气温[J]. 自然科学进展,2000,10(4):325–332.
- [40] Morellón M, Valero-Garcés B, González-Sampériz P, 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[J]. *Journal of Paleolimnology*, 2011, 46(3): 423–452.
- [41] Zhou T J, Li B, Man W M, et al. A comparison of the Medieval Warm Period, Little Ice Age and 20 th century warming simulated by the FGOALS climate system model[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56(28–29): 3028–3041.
- [42] 余素华,朱照宇,李炳元,等. 23万年以来青藏高原甜水海湖岩心铁元素的气候记录刍议[J]. 海洋地质与第四纪地质,1998,18(3):63–70.
- [43] 李元芳,张青松,李炳元,等. 青藏高原西北部17 000年以来的介形类及环境演变[J]. 地理学报,1994,49(1): 46–54.
- [44] 沈吉. 末次盛冰期以来中国湖泊时空演变及驱动机制研究综述:来自湖泊沉积的证据[J]. 科学通报,2012,57(34):3228–3242.
- [45] 顾兆炎,刘嘉麒,袁宝印,等. 12000年来青藏高原夏季风变化—色林错沉积物地球化学的证据[J]. 科学通报,1993,38(1):61–64.
- [46] Gasse F, Arnold M, Fontes J C, et al. A 13000-year climate record from western Tibet[J]. *Nature*, 1991, 353

- (6346) : 742 - 745.
- [47] Van Campo E, Gasse F. Pollen-and diatom-inferred climatic and hydrological changes in Sumxi Co Basin (Western Tibet) since 13000 yr BP [J]. Quaternary Research, 1993, 39(3) : 300 - 313.
- [48] 李世杰, Wünnemann B, 夏威岚, 等. 青藏高原兹格塘错沉积记录的全新世水位变化事件及其原因初步研究 [J]. 地学前缘, 2009, 16(6) : 162 - 167.
- [49] 李世杰, 王小天, 夏威岚, 等. 青藏高原荷鲁错湖泊沉积记录的小冰期气候变化 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(5) : 578 - 584.
- [50] Zhao Y, Yu Z C, Chen F H, et al. Holocene vegetation and climate history at Hurleg Lake in the Qaidam Basin, northwest China [J]. Review of Palaeobotany and Palynology, 2007, 145(3) : 275 - 288.
- [51] Liu X Q, Dong H L, Rech J A, et al. Evolution of Chaka Salt Lake in NW China in response to climatic change during the Latest Pleistocene - Holocene [J]. Quaternary Science Reviews, 2008, 27(7) : 867 - 879.
- [52] 余俊清, Kelts K. 末次冰消期晚期青藏高原东北部气候变化 [J]. 第四纪研究, 2002, 22(5) : 413 - 423.
- [53] Jun Q Y, Kelts K. Abrupt changes in climatic conditions across the late-glacial/Holocene transition on the NE Tibet-Qinghai Plateau: evidence from Lake Qinghai, China [J]. Journal of Paleolimnology, 2002, 28(2) : 195 - 206.
- [54] Yu J Q, Zhang L S. LAKE QINGHAI: Paleoenvironment and Paleoclimate [M]. Beijing: Science Press, 2008 : 1 - 161.
- [55] 王苏民, 施雅风. 晚第四纪青海湖演化研究析视与讨论 [J]. 湖泊科学, 1992, 4(3) : 1 - 9.
- [56] Liu X Q, Shen J, Wang S M, et al. Southwest monsoon changes indicated by oxygen isotope of ostracode shells from sediments in Qinghai Lake since the late Glacial [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(4) : 539 - 544.
- [57] An Z S, Colman S, Zhou W J, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka [J]. Scientific Reports, 2012, 2 : 619. DOI: 10.1038/srep00619.
- [58] 李军, 余俊清. 黄旗海介形类及其壳体稳定同位素环境记录 [J]. 盐湖研究, 2002, 10(4) : 13 - 18.
- [59] 张丽莎, 余俊清, 刘子亭, 等. 黄旗海沉积岩芯烧失量变化曲线: 冰后期环境演变的有效代用指标 [J]. 盐湖研究, 2007, 15(1) : 12 - 15.
- [60] 刘子亭, 余俊清, 张保华, 等. 黄旗海岩芯烧失量分析与冰后期环境演变 [J]. 盐湖研究, 2008, 16(4) : 1 - 5.
- [61] 李华章, 刘清泗, 汪家兴. 内蒙古高原黄旗海、岱海全新世湖泊演变研究 [J]. 湖泊科学, 1992, 4(1) : 31 - 39.
- [62] Zhang J R, Jia Y L, Lai Z P, et al. Holocene evolution of Huangqihai Lake in semi-arid northern China based on sedimentology and luminescence dating [J]. The Holocene, 2011, 21(8) : 1261 - 1268.
- [63] Sun Q L, Wang S M, Zhou J, et al. Lake surface fluctuations since the late glaciation at Lake Daihai, North central China: a direct indicator of hydrological process response to East Asian monsoon climate [J]. Quaternary International, 2009, 194(1) : 45 - 54.
- [64] Peng Y J, Xiao J L, Nakamura T, et al. Holocene East Asian monsoonal precipitation pattern revealed by grain-size distribution of core sediments of Daihai Lake in Inner Mongolia of north-central China [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2005, 233(3) : 467 - 479.
- [65] 曹建廷, 王苏民, 沈吉, 等. 近千年来内蒙古岱海气候环境演变的湖泊沉积记录 [J]. 地理科学, 2000, 20(5) : 391 - 396.
- [66] 吴敬禄. 新疆艾比湖全新世沉积特征及古环境演化 [J]. 地理科学, 1995, 15(1) : 39 - 46.
- [67] 吴敬禄, 沈吉, 王苏民, 等. 新疆艾比湖地区湖泊沉积记录的早全新世气候环境特征 [J]. 中国科学:D辑, 2003, 33(6) : 569 - 575.
- [68] 吴敬禄, 刘建军, 王苏民. 近 1500 年来新疆艾比湖同位素记录的气候环境演化特征 [J]. 第四纪研究, 2004, 24(5) : 585 - 590.
- [69] 羊向东, 王苏民. 一万多年来乌伦古湖地区花粉组合及其古环境 [J]. 干旱区研究, 1994, 11(2) : 7 - 10.
- [70] 陈发虎, 黄小忠, 杨美临, 等. 亚洲中部干旱区全新世气候变化的西风模式 [J]. 第四纪研究, 2006, 26(6) : 881 - 887.
- [71] 林瑞芬, 卫克勤. 草海 ZHJ 柱样沉积物有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 记录及其古气候信息 [J]. 地球化学, 2000, 29(4) : 390 - 396.
- [72] Whitmore T J, Brenner M, Song X L. Environmental implications of the late Quaternary diatom history from Xingyun Hu, Yunnan Province, China [J]. Memoirs of the California Academy of Science, 1994, 17 : 525 - 538.
- [73] Hodell D A, Brenner M, Kanfoush S L, et al. Paleoclimate of southwestern China for the past 50 000 year inferred from lake sediment records [J]. Quaternary Research, 1999, 52(3) : 369 - 380.
- [74] 吴艳宏, 吴瑞金, 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.
- [75] 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.
- [76] 张振克, 吴瑞金, 王苏民, 等. 全新世大暖期云南洱海环境演化的湖泊沉积记录 [J]. 海洋与湖沼, 2000, 31(2) : 210 - 214.
- [77] 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, 34(2) : 130 - 138.
- [78] 陈敬安, 万国江, 陈振楼, 等. 洱海沉积物化学元素与古

- 气候演化[J]. 地球化学,1999,28(6):562–570.
- [79] Chen F H, Chen X M, Chen J H, et al. Holocene vegetation history, precipitation changes and Indian Summer Monsoon evolution documented from sediments of Xingyun Lake, south-west China [J]. Journal of Quaternary Science, 2014, 29(7): 661–674.
- [80] 郑茜,张虎才,明庆忠,等. 泸沽湖记录的西南季风区 15000 a BP 以来植被与气候变化[J]. 第四纪研究, 2014, 34(6):1314–1326.
- [81] 瞿文川,薛滨,吴艳宏,等. 太湖 14000 年以来古环境演变的湖泊记录[J]. 地质力学学报,1997,3(4):53–61.
- [82] 王苏民,羊向东,马燕,等. 江苏固城湖 15 ka 来的环境变迁与古季风关系探讨[J]. 中国科学:D 辑,1996,26(2):137–141.
- [83] Sun W W, Zhang E L, Jones R T, et al. Asian summer monsoon variability during the late glacial and Holocene inferred from the stable carbon isotope record of black carbon in the sediments of Muge Co, southeastern Tibetan Plateau, China[J]. The Holocene, 2015, 25(12): 1857–1868.
- [84] Wang R, Zhang Y Z, Wünnemann B, et al. Linkages between Quaternary climate change and sedimentary processes in Hala Lake, northern Tibetan Plateau, China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 107: 140–150.
- [85] An Z S, Colman S M, Zhou W J, et al. Interplay between the Westerlies and Asian monsoon recorded in Lake Qinghai sediments since 32 ka [J]. Scientific reports, 2012, 2: 619.
- [86] Wang N A, Li Z L, Li Y, et al. Younger Dryas event recorded by the mirabilite deposition in Huahai lake, Hexi Corridor, NW China [J]. Quaternary International, 2012, 250: 93–99.
- [87] Chen F H, Liu J B, Xu Q H, et al. Environmental magnetic studies of sediment cores from Gonghai Lake: implications for monsoon evolution in North China during the late glacial and Holocene[J]. Journal of paleolimnology, 2013, 49(3): 447–464.
- [88] Gao Q, Rioual P, Chu G Q. Lateglacial and early Holocene climatic fluctuations recorded in the diatom flora of Xiaolongwan maar lake, NE China [J]. Boreas, 2016, 45(1): 61–75.
- [89] 孙亚芳. 甘青地区全新世气候变化研究[D]. 兰州:兰州大学,2008,1–73.
- [90] 施雅风,刘晓东,李炳元,等. 距今 40 ~ 30 ka 青藏高原特强夏季风事件及其与岁差周期关系[J]. 科学通报, 1999,44(14):1475–1480.
- [91] 汪品先. 气候与环境演变中的非线性关系—以末次冰期为例[J]. 第四纪研究,1991,11(2):97–103.
- [92] Donnelly J P, Driscoll N W, Uchupi E, et al. Catastrophic meltwater discharge down the Hudson Valley: a potential trigger for the Intra-Allerød cold period [J]. Geology, 2005, 33(2): 89–92.
- [93] Broecker W S, Kennett J P, Flower B P, et al. Routing of meltwater from the Laurentide Ice Sheet during the Younger Dryas cold episode[J]. Nature, 1989, 341: 318–321.
- [94] Hughen K A, Overpeck J T, Peterson L C, et al. Rapid climate changes in the tropical Atlantic region during the last deglaciation[J]. Nature, 1996, 380: 51–54.
- [95] Arbic B K, MacAyeal D, Mitrovica J, et al. Ocean tides and Heinrich events[J]. Nature, 2004, 432: 460.
- [96] McManus J F, Francois R, Gherardi J M, et al. Collapse and rapid resumption of Atlantic meridional circulation linked to deglacial climate changes[J]. Nature, 2004, 428(6985): 834–837.
- [97] Paillard D, Labeyriet L. Role of the thermohaline circulation in the abrupt warming after Heinrich events[J]. Nature, 1994, 372: 162–164.
- [98] Manabe S, Stouffer R J. Simulation of abrupt climate change induced by freshwater input to the North Atlantic Ocean[J]. Nature, 1995, 378(6553):165–167.
- [99] Bassett S E, Milne G A, Mitrovica J X, et al. Ice sheet and solid earth influences on far-field sea-level histories [J]. Science, 2005, 309(5736): 925–928.
- [100] Kienast M, Kienast S S, Calvert S E, et al. Eastern Pacific cooling and Atlantic overturning circulation during the last deglaciation[J]. Nature, 2006, 443(7113): 846–849.
- [101] Schmittner A, Clement A C. Sensitivity of the thermohaline circulation to tropical and high latitude freshwater forcing during the last glacial-interglacial cycle[J]. Paleoceanography, 2002, 17(2): 1–12.
- [102] Partin J W, Cobb K M, Adkins J F, et al. Millennial-scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum[J]. Nature, 2007, 449(7161): 452–455.
- [103] Hyde W T, Crowley T J. Stochastic forcing of Pleistocene ice sheets: Implications for the origin of millennial-scale climate oscillations[J]. Paleoceanography, 2002, 17(4): 91–98.
- [104] 黄小忠. 新疆博斯腾湖记录的亚洲中部干旱区全新世气候变化研究[D]. 兰州:兰州大学,2006.
- [105] 孙庆峰. 青海共和盆地达连海岩芯粘土矿物与末次冰消期以来环境变化探讨[D]. 兰州:兰州大学,2009.
- [106] 郭小燕. 季风边缘区尕海湖记录的全新世气候变化 [D]. 兰州: 兰州大学,2012.
- [107] 宋磊. 晚冰期以来青藏高原东北部更尕海沉积记录的气候变化[D]. 兰州: 兰州大学,2012.
- [108] Bond G, Kromer B, Beer J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [J]. Science, 2001, 294(5549): 2130–2136.
- [109] Clarke G K C, Leverington D W, Teller J T, et al. Paleo-hydraulics of the last outburst flood from glacial Lake Agassiz

- siz and the 8200BP cold event[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(3): 389–407.
- [110] Jansson K N, Kleman J. Early Holocene glacial lake melt-water injections into the Labrador Sea and Ungava Bay[J]. Paleoceanography, 2004, 19(1): 1–12.
- [111] Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar changes and North Atlantic climate[J]. Science, 2005, 308: 854–857.
- [112] Lister G S, Kelts K, Chen K Z, et al. Lake Qinghai, China: Closed-basin like levels and the oxygen isotope record for Ostracoda since the Latest Pleistocene[J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1991, 84 (1 – 4): 141 – 162.
- [113] Liu K B, Yao Z J, Thompson L G. A pollen record of Holocene climatic changes from Dunde ice cap, Qinghai-Tibetan Plateau[J]. Geology, 1998, 26: 135 – 138.
- [114] Yu J Q, Gao C L, Cheng A Y, et al. Geomorphic, hydro-climatic and hydrothermal controls on the formation of lithium brine deposits in the Qaidam Basin, northern Tibetan Plateau, China[J]. Ore Geology Reviews, 2013, 50: 171 – 183.
- [115] 于革. 全球晚第四纪湖泊数据库的研究[J]. 湖泊科学, 1997, 9(3): 193 – 202.

The Study on Paleoclimatic Evolution and Driving Mechanisms since the Last Deglaciation Recorded by Lacustrine Sediments in China

GAO Chun-liang^{1,2,3}, YU Jun-qing^{1,3}, MIN Xiu-yun^{1,4}, CHENG Ai-ying^{1,3},
HONG Rong-chang^{1,4}, ZHANG Li-sha^{1,3}

(1. Key Laboratory of Comprehensive and Highly Efficient Utilization of Salt Lake resources, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China; 2. MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University, Lanzhou, 730000, China; 3. Key Laboratory of Salt Lake Geology and Environment of Qinghai Province, Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, 810008, China;
4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100049, China)

Abstract: The Last Deglaciation is a period that global climate and environment altered largely. During the Last Deglaciation, a series of abrupt climate changes occurred in different ways and different regions of the world. A review of paleoclimatic evolution recorded by lacustrine sediments from the arid regions of high altitude and cold temperature on Qinghai-Tibetan Plateau, the arid regions of Northwestern China, the humid regions on Yunnan-Guizhou Plateau and the plains of Eastern China since Last Deglaciation were presented. The driving mechanism for climate changes is also discussed. The author proposes that future work should conducted to: 1) enhancing the study of high-resolution time series of climatic evolution recorded by lacustrine sediments, 2) promoting the comparative study of interdisciplinarity and other geologic records, 3) strengthening the study of the Quaternary lake database in China and global climate changes, and 4) strengthening the tracer study of vapor sources.

Key words: Last Deglaciation; Lacustrine sediment; Paleoclimatic evolution; Driving mechanism; Monsoon pattern; Westerlies pattern