J. Lake Sci.(湖泊科学), 2016, **28**(4): 899-908
DOI 10.18307/2016.0424
© 2016 by *Journal of Lake Sciences*

太白山三清池湖泊沉积记录的全新世气候变化及周期讨论*

宋雅琼, 罗　耀, 李双成, 王红亚**
(北京大学城市与环境学院, 北京 100871)

摘　要: 通过对太白山三清池湖泊沉积柱芯的低频磁化率(χ_{lf})、频率磁化率(χ_{fd})、总有机碳(TOC)、粒度参数指标的时序序列进行小波分析, 探讨太白山全新世气候变化过程及周期波动性. 结果显示: 中、晚全新世太白山气候变化具有明显的阶段性特征; 千年尺度上, χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 和平均粒径参数序列反映的主周期分别为 1427、1427、1427 和 1452 a, 晚全新世 5410 cal aB.P.距今期间存在 8 次显著的冷暖交替震荡; 在百年尺度上, χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 和平均粒径参数序列还揭示出分别以 492、492、467 和 467 a 为周期的次一级变化, 且整体上经历近似 10 次的短期冷暖波动. 此外, 以上结果与全球范围内全新世气候周期有着较好的一致性, 表明我国东部高海拔地区在千年和百年尺度上, 对全新世气候振荡同样具有相似的响应.
关键词: 太白山; 三清池; 全新世; 小波分析; 周期波动; 气候变化

Holocene environmental change and climatic periodicities recorded from the lacustrian sediments in the Sanqing Chi section, Taibai Mountain

SONG Yaqiong, LUO Yao, LI Shuangcheng & WANG Hongya**
(*College of Urban and Environmental Sciences*, *Peking University*, *Beijing* 100871, *P.R.China*)

Abstract: With wavelet analysis, the Holocene environmental change and climatic periodicity in Taibai Mountain are analyzed based on multiple paleoclimatic proxy analysis (χ_{lf}, χ_{fd}, TOC and grain size) in the lake sediments from Sanqing Chi section. The results show obvious gradual characteristic in the periodicities and environmental change of Taibai Mountain. On a longer timescale, there is the a millennial-scale variability of Holocene climate with periodicities of 1427 a in χ_{lf} sequence, 1427 a in χ_{fd} sequence, 1427 a in TOC sequence, and 1452 a in mean particle size sequence. 8 times of significant climate shifts are examined in χ_{lf} sequence since 5410 cal aB.P.. On a centennial scale, periodicities of 492 a, 492 a, 467 a, 467 a are identified in χ_{lf}, χ_{fd}, TOC and grain size, respectively, indicating 10 times climatic oscillation since 5410 cal aB.P.. The consistency in Holocene climatic periodicity between Taibai Mountain and other regions in the world shows that the environmental response to Holocene climatic oscillation also exists at high attitude area in eastern China.
Keywords: Taibai Mountain; Sanqing Chi; Holocene; wavelet analysis; climatic periodicity; climatic change

全新世千、百年尺度的气候快速变化及气候波动的周期性研究是古环境领域的研究热点[1]. 近年来, 多种沉积物[2-4]显示出全新世在全球范围内存在千年及百年尺度上的气候振荡特征. 在我国, 有关全新世气候的周期性探讨相对较少, 且多集中于东部低海拔[5-6]及西北干旱[1,7]地区, 而对于我国东部高海拔地区却鲜有研究. 太白山海拔 3767.2 m, 是秦岭主峰[8], 处于太白山上的湖泊受人类活动干扰较少, 其沉积物良好地记录全新世以来的气候变化信息, 是进行古环境研究的理想材料. 近年来, 众多学者[9-12]通过使用气候代用指标、与黄土高原古气候变化模式对比、气候—孢粉转换模型等方法, 从多方面研究太白山古气候及植被变化特征, 并初步建立全新世以来气候冷暖波动的时间序列. 然而, 由于高分辨率沉积序列的缺乏及所获取剖面年代时限较短, 太白山在全新世不同尺度气候变化的周期性研究较少[8,10], 且通过小波分析多指标时序序列来讨论古气候变化的方法也并不多见. 小波是指零均值、振幅小且快速衰减的一类特殊波形, 其具有时域

* 国家自然科学基金项目(41171160)资助. 2015-03-23 收稿; 2015-10-13 收修改稿. 宋雅琼(1990~), 女, 硕士研究生; E-mail: lvpinic@126.com.
** 通信作者; E-mail: why@urban.pku.edu.cn.

地质测绘院　社会　0004.湖泊科学 2016-4　5 校样　张芸　　成品尺寸 185×260(mm)　45 字 44 行　2016/06/06

与频域分析的双重特性,应用小波变换分析气候记录的时间序列不仅有助于揭示气候变化在各种时间尺度上的周期特征,而且还能显示出各种周期信号随时间的变化[13].

本文使用取自太白山三清池的沉积物柱芯作为研究材料,对其矿物磁性、总有机碳(TOC)、粒度参数等多种气候代用指标进行实验分析,结合 AMS^{14}C 测年建立剖面年代框架,对该时序序列进行小波分析,寻找太白山全新世在千年尺度上及百年尺度上的古气候可能存在的周期波动,并探讨在各个周期下气候变化特征.

1 研究区域及样品采集

1.1 研究区域简介

太白山(图 1a)位于我国中部,处在亚热带气候与暖温带气候的南北分界线上. 其作为秦岭主峰,亦是我国中东部最高峰. 受冰川作用,南坡保存有较为完整的冰川地貌,其上发育的冰蚀湖(如玉皇池和东、西佛爷池)与冰碛湖(三清池)(图 1b)为古环境研究提供了良好的材料. 太白山山体相对高差达 3000 m,高山湖泊受人类干扰较少,其沉积物能较为准确的记录古气候变化信息.

三清池是太白山南坡中部的冰碛湖(现已干涸)(图 1b),位于由二爷海至玉皇池所构成的槽谷内,其西面可见该槽谷横剖面存在明显的三道侧碛垄,三清池处于中间侧碛末端之上,海拔约为 3080 m,处于巴山冷杉林植被带,是太白山冰川运动所达到的最低位置. 三清池终碛垅相对高度 80~100 m,为一向南凸起的弧形垄岗,是由于冰舌在此停留而形成,冰川消退后终碛垅堵水形成三清池[14].

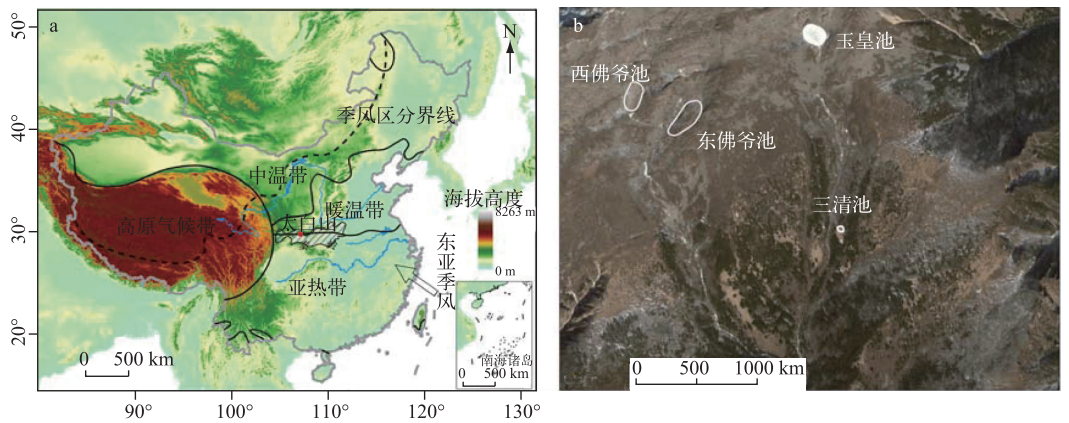


图 1 太白山在中国分布位置(a)和三清池(b)研究区域

Fig.1 Taibai Mountain in mainland China(a) and location of Sanqing Chi in the study area (b)

1.2 样品采集

使用铝制饭盒对太白山三清池附近深约 80 cm 的沉积物剖面 SQC07(33°55′N,107°56′E)进行连续垂直扣取采样,在室内将柱芯分割为厚 1 cm 薄块,装入塑封袋中密封保存,共获取样品 80 个. 在北京大学地表过程分析与模拟教育部重点实验室使用 Bartington MS2 型磁化率仪测量低、高频磁化率(χ_{lf}、χ_{hf}),计算获得频率磁化率(χ_{fd}). TOC 含量测定在中国科学院地理科学与资源研究所分析测试中心完成,同时粒度参数在北京大学城市与环境学院第四纪粒度实验室通过采用英国 Malvern Instruments 公司生产的 Mastersizer 2000 激光粒度仪测量获取. 为建立剖面年代框架,先后选取其 6 个样品在北京大学考古文博学院科技考古与文物保护实验室进行 AMS^{14}C 测年,利用树轮校正曲线 IntCal13 和程序 Calib v7.04 将这 6 个^{14}C 年代数据校正为日历年(cal aB.P.),结果可以看到,沉积物剖面在 50~51 cm 处测年结果出现倒置现象,与余下测年结果所形成年代沉积趋势相悖(表 1). 三清池为太白山最后一次冰川作用后所形成的冰碛湖,湖泊面积较小,其所在流域整体水动力不强,由剖面序列特征可知平均粒度、TOC 指标在 50~51 cm 处表现较为平稳,并无强烈流水冲刷作用,故排除碳库效应及再沉积作用[15]的可能. 此外,我们对太白山其他湖沼沉积物进行研究,如

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

佛爷池(待刊)、跑马梁等,对其底部剖面样品测年,结果均不足 6000 cal aB.P.. 综上,此处测年可能是由实验误差所致,本研究中并不采用. 采用其他 5 个测年数据,分别计算相邻 2 个测年点之间的平均沉积速率,建立这一剖面的年代模式.

表 1 加速器质谱 AMS^{14}C 测试结果及校正后年代

Tab.1 Radiocarbon dates for the Sanqing Chi sequence, Taibai Mountain, central China

实验室编号	水深/cm	AMS^{14}C 年代/cal aB.P.(±1σ)	校正后年代/cal aB.P.(±2σ)	
			范围	平均值
BAO7828	10~11	155±35	285−1	143
BAO7827	30~31	2525±40	2747−2487	2617
BA151125	45~46	3105±35	3390−3221	3306
BA151126	58~59	4075±20	4786−4447	4617
BAO7825	79~80	5000±35	5891−5645	5768
BAO7826	50~51	5690±35	6600−6401	6501

2 研究方法

2.1 气候代用指标

长期以来,人们尝试使用各种气候代用指标来解译古气候. 其中,理解湖泊沉积中代用指标的环境意义和确定较准确的沉积年代,是利用湖泊沉积物重建过去气候环境演变的两个关键环节[16].

一般认为,湖泊沉积物的磁化率与粒度指标能较好地反映水动力特征,进而指示古环境状况. 磁化率(χ_{lf})是物质被磁化难易程度的一种度量,大致反映了样品中亚铁磁性矿物的富集程度[17],粒度是对沉积物中颗粒大小的度量. 三清池湖泊面积较小,地表径流与植被覆盖情况是影响沉积物的主要因素. 当气候湿润时,三清池地区内植被发育良好,侵蚀多集中于土壤表层,且具有一定的成土作用,且此时地表径流发育,流域内较细的颗粒物质多由径流携带至湖底沉积,故此时平均粒径较低[18]而χ_{lf}指标较高[19]. 反之,在气候较为干旱的情况下,植被的覆盖较差,寒冻风化作用加强,同时突发性的强降水过程,使地表更多的粗颗粒物质进入湖泊,致使沉积物中粗颗粒组分含量增加[11],对于磁性矿物以细颗粒(SD)为主的三清池而言,假单畴(PSD)-多畴(MD)磁性矿物的增多会导致χ_{lf}降低,另一方面,对于三清池这一封闭湖泊而言,气候湿润时,还原环境引起的碳酸盐溶解同样会使磁性矿物相对积累[20-21]. 实际上,水动力在对粒径进行分选的同时,也会对矿物进行密度分选,即当较粗的轻矿物与较细的重矿物在同一粒级沉积物中共存时,较轻矿物更易被流水携带,而重矿物相对在三清池内富集,引起χ_{lf}增强[22],这也可以解释在三清池湖沼沉积物χ_{lf}指标与平均粒径序列并不严格一致的现象. 而对于反映了样品的矿物磁性随着磁场强度变化而衰减程度的χ_{fd},沉积物样品频率磁化率的变化可以确定超顺磁(SP)颗粒的相对含量波动[23],即χ_{fd}对沉积物中的细颗粒含量更为敏感,其与平均粒径指标的负相关变化较χ_{lf}更为显著,其值较高时多指示出周围环境存在良好的成土作用,暗示气候更加温暖湿润. TOC 指标直接反映沉积物中有机质含量的多少,TOC 含量越高,有机质含量越高;TOC 含量越低, 则有机质含量越低[19]. 三清池位于侧碛垄末端之上,湖泊水温较低,水生植物发育较少,有机质的来源主要依赖于湖周围陆生植被的发育情况,较高的有机质含量反映良好的植被发育,指示出适宜的暖湿气候.

2.2 小波分析

小波分析是在傅里叶(Fourier)变换的基础上引入窗口函数,它通过选择适当的母函数来进行分析,借以有效地反映时间序列的局部变化特征,从而可以清楚地揭示出各个周期在序列中所处的位置[7]. 小波分析中用到的函数具有多样性,根据研究对象特征及各小波的优势,本文采用 Morlet 小波,它能很好地兼顾时间域和频率域的分辨率.

三清池剖面底层沉积物测年结果为 5768 cal aB.P.,为减小有序时间序列边缘效应的影响,在小波分析前,先对时序序列向两队进行一定程度的延伸. 小波变换结束后,去掉两端延伸数据的小波变换系数,保留

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

原数据序列时段内的小波变换特征. 小波变化结束后,将小波系数在所有尺度上进行平方求和,即得小波方差. 小波方差表征时间序列中某尺度周期波动的强弱,小波方差的峰值对应显著周期,为求得小波方差最大值所对应的周期,还需将变换尺度转换为实际周期.

3 结果与讨论

3.1 结果及分析

图 2 给出太白山三清池湖泊沉积物剖面的χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 及平均粒度指标随年代变化序列,灰色实线为代用指标曲线经傅里叶滤波平滑处理后的结果,图中黄色条带与红色虚线所指示位置均表示三清池晚全新世可能存在的寒冷时期,其中黄色条带与 Bond 所给出的全新世冷事件相对应,同时给出三清池地区出现冷事件与其他地区时间对比(表 2). 各指标之间变化存在良好的一致性,χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 呈现正相关关系,而粒度指标则表现出反相位关系,这与之前所述气候代用指标解译模式相符,红色虚线所指示的寒冷时间(c1~c4)显示三清池全新世气候变化或存在千年尺度的周期,且存在 4 次气候冷暖交替的循环变化(图 2). 在 5768－5100 cal aB.P.阶段,TOC 含量先升高后降低,χ_{fd}短暂波动后,数值开始降低,平均粒径呈现波动上升趋势,至 5100 cal aB.P.(c4)处达峰值,依据全新世整体气候特征判断,此阶段可能处于全新世大暖期将近结束阶段,气候自此开始趋于寒冷干燥,但仍处于频繁的波动中,存在 4945－4616 cal aB.P.时期有趋暖的波动以及其后相邻的 4213 cal aB.P,冷期,再次波动直至 3608 cal aB.P.(c3),气候整体开始好转. 此阶段中,4213 cal aB.P. 冷期与全新世冷事件 3 有较好对应,一方面表明全球性的气候振荡在太白山同样具有较好反映,另一方面显示太白山气候特征可能并非由单一周期所主导,特征曲线更有可能是多个周期叠加后的产物. 尽管 3608－885 cal aB.P.阶段气候整体趋于温暖,但代用指标频繁的波动显示出全新世气候的不稳定性,具体表现在 2754 cal aB.P.与 1998 cal aB.P.左右两次快速变冷事件,或分别与全新世事件 2、1 相对应,而气候代用指标揭示出 1380－1132 cal aB.P.变暖过程似乎暗示此时处于中世纪暖期. 自 885 cal aB.P.后,气候再次转向寒冷干燥,在 761 cal aB.P.(c1)左右表现较为突出,可能与小冰期对应,气候变冷过程持续时间较短,结束于 390 cal aB.P.之后,太白山气候在经历剧烈波动后进入现代暖期. 这里,太白山高海拔湖泊沉积所显示的小冰期事件开始时间要早于中国东部大部分低海拔地区,这一部分原因可能是由于太白山高山带特殊的气候驱动机制所引起,同时也可能由于近年来人类活动对表层沉积物的扰动及样品测年误差造成,具体原因还需相关数据做深入讨论. 但总而言之,气候代用指标所揭示出的晚全新世气候冷暖交替波动及千年尺度上近似等时间间隔所出现的气候冷事件(c1~c4),都暗示出太白山气候变化的确存在某种周期性节律变化.

表 2 三清池全新世寒冷事件时间与其他地方时间对比(cal aB.P.)

Tab.2 Radiocarbon dates for the Sanqing Chi sequence, Taibai Mountain, central China

寒冷事件[4]	三清池湖沼沉积物	大西洋深海沉积[3]	若尔盖高原泥炭[6]	广东湖光岩湖泊沉积物[6]	敦德冰芯[24]	冲绳黑潮深海沉积[25]	冷期编号[26]
100、300	761(c1)	—	—	680	400	600	0
1100	—	—	—	1200	—	—	—
1400、1700	1998(c2)	1400	1500	1640	1500	1700	1
2300	—	—	—	—	—	—	—
2800、3300	2754	2800	2800	2680	3000	3300	2
3800	3608(c3)	—	3700	3830	4000	—	—
4500	4213	4300	4400	4250	4600	4600	3
4900	5100(c4)	—	—	—	—	—	—
5500、5900	—	5900	5900	—	5600	5900	4

3.2 气候代用指标序列的小波时频分析

三清池湖泊沉积物剖面的χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 及粒度序列的小波变换结果如图 3 所示. 在小波系数图(图 3a~3d)中,背景设置为白色,由蓝色至红色表示系数由低到高的变化,4 个序列的小波方差图见图 3e~3g. 为进

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

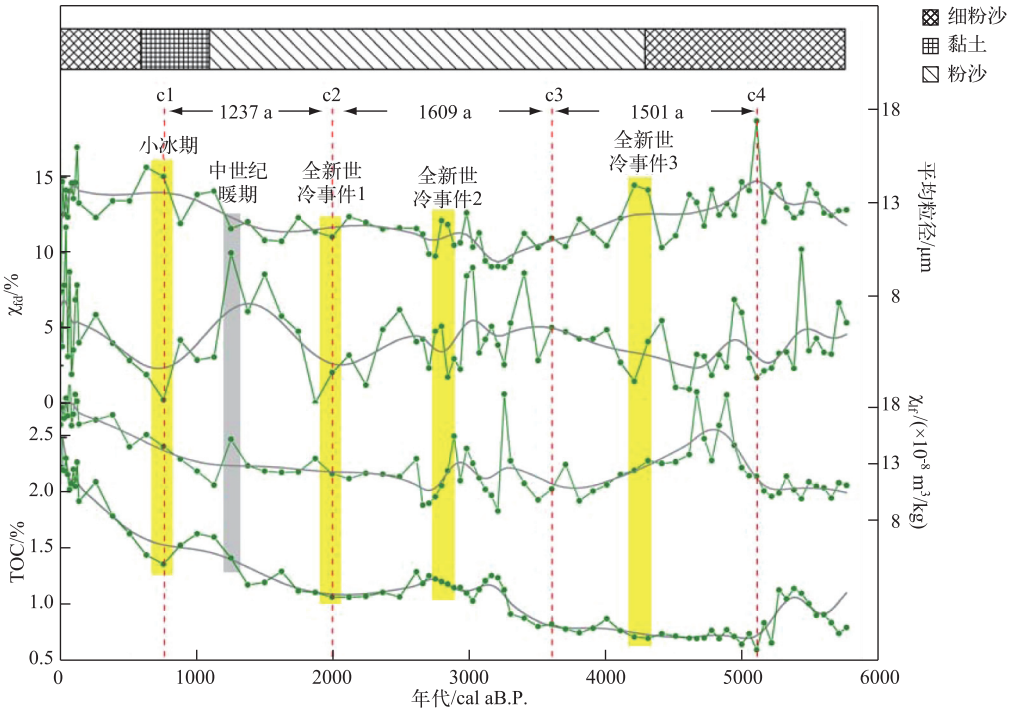


图 2 三清池剖面气候代用指标(红色虚线、黄色条带指示全新世可能存在的气候周期变化的冷事件,灰色条带指示中世纪暖期发生时段)

Fig.2 Total organic carbon content(TOC), mineral magnetism (χ_{lf}, χ_{fd}) and average particle size for the Sanqing Chi sequence(Vertical yellow bars and red dashed line denote the cold events of climate in Taibai Mountain, vertical grey bars indicate themedieval warm period)

一步说明小波变换结果给出的三清池晚全新世以来的气候冷暖交替变化特征,本文分别计算气候代用指标所对应最大小波方差尺度下的变换曲线的零值,并取各指标对应零值的平均值作为分段基础,图中使用灰色点划线划分出 8 个气候带,由 s1~s8 标识.

由小波方差图(图 3e~3h)可知,三清池剖面χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 和平均粒径指标分别在 1160、1160、1160 和 1180 a 的变换尺度下均对应峰值,依据公式[13]计算实际周期分别为 1427、1427、1427 和 1452 a,即太白山晚全新世以来气候在千年尺度下的周期性变化明显,周期为 1427~1452 a. 该尺度上的χ_{lf}与 TOC 小波系数变换具有一致性. 三清池晚全新世以来,s1~s8 区域内的χ_{lf}小波系数差异显著,整体上具有 8 次数值高低交替的准千年尺度变化,分别是:5410—4730 cal aB.P.较低期、4730—4010 cal aB.P.较高期、4010—3330 cal aB.P.较低期、3300—2590 cal aB.P.较高期、2590—1855 cal aB.P.较低期、1855—1145 cal aB.P.较高期、1145—425 cal aB.P.较低期及 425 cal aB.P.至今较高期,即三清池在 5410 cal aB.P.至今的时间里,其植被侵蚀状况先后经历了强→弱→强→弱→强→弱→强→弱的 8 次周期性变化,谷值对应出的显著变冷时间与上文所述 c1~c4 事件近似(图 3a,c).χ_{fd}指标虽然同样在千年尺度上表现出周期性,但存在一定局部性,即χ_{fd}指标在 3330 cal aB.P.至今的时间内周期变化明显,在 s5~s1 阶段内依次呈现高→低→高→低→高的波动特征,但在 s6~s8 阶段内特征变化较弱(图 3b). 千年尺度的主周期在粒度指标小波系数图也同样存在,变换系数(图 3d)的正负信号变动与上述 2 个指标变化相反,即太白山气候干湿状况同样经历类似的周期震荡,这也增强了小波分析结果的可靠性. 其在显著周期的主要集中区间在 s1~s4 阶段内,而在 s5~s8 处周期不稳定,且与上述 3 个指标项有 1/4 个相位差,整体上与χ_{fd}指标较为相近. 由小波方差图(图 3e~3h)可知,三清池气候代用指标除存在千年尺度的主周期外,分别还在 400、400、380 和 380 a 的尺度上出现一个次峰值,χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 和

平均粒径的实际周期分别为 492、492、467 和 467 a.

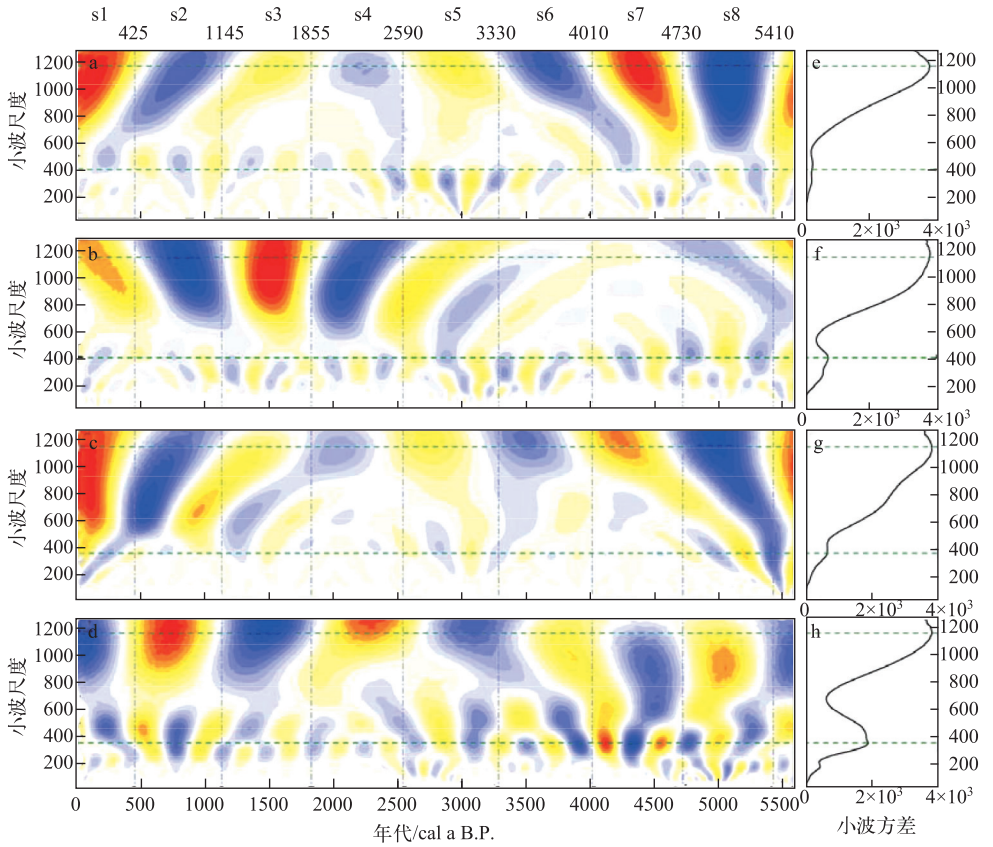


图 3 清池剖面气候代用指标(χ_{lf} χ_{fd}、TOC、平均粒径)的小波系数(a~d)及小波方差(e~h)
(灰色虚线将三清池序列划分为 8 个冷暖交替的气候带,绿色虚线表示主、次周期对应的小波尺度)

Fig.3 Wavelet coefficients(a-d) and variances(e-h) of total organic carbon content(TOC), mineral magnetism (χ_{lf}, χ_{fd}) and average particle size for the Sanqing Chi sequence(Grey dashed dot lines divide Sanqing Chi sequence into eight alternate warm and cold climate zones(s1 - s8) at millennial-scale)

为了更清楚揭示晚全新世以来三清池气候的周期变化特征,现在分别绘制各气候代用指标在千年尺度上(约为 1160 a 左右)及百年尺度上(约为 390 a 左右)的小波变换系数实部随时移的系数变化曲线(图 4). 在千年尺度上,现阶段χ_{lf} χ_{fd}、TOC 指标已达峰值,平均粒径达谷值,可以认为目前太白山正处于暖湿大背景下,未来太白山的暖湿环境背景仍会维持一段时间,但长尺度上有偏向干冷的趋势. 而从百年尺度上可以发现,现阶段χ_{lf} χ_{fd}、TOC 指标已达谷值,而平均粒径已处于峰值,故太白山目前处在暖湿大背景下较为寒冷的一段时期,预计未来气候会开始有所好转.

3.3 全新世千年—百年尺度周期变化

三清池湖泊沉积物显示出约 467~492、1427~1452 a 的气候周期变化并非个例. Bond 等研究北大西洋冰漂碎屑沉积后[3]得出著名的 1470 a 全新世周期变化. 其后,阿拉伯粉尘[27]给出了 1450~1470 a 周期、加拿大西部湖泊沉积物[2]显示出的 1500 a 周期以及冲绳海潮黑潮演变的 1500 a 周期,都表明 1500 a 的气候周期可能是全新世冰后期气候波动的主导周期[28],且被认为似乎是末次冰期气候波动在冰后期的延续[29]. 在我国,若尔盖高原红原剖面[29]功率谱分析中,1463、512 a 周期通过检验,而湖光岩玛珥湖[29]同样检验出 2930 a(约为 1450 a 的 2 倍)、1140 a 及 490 a 的周期成分,青藏高原泥炭[30]含量显示出 1428、512 和 255 a 准

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

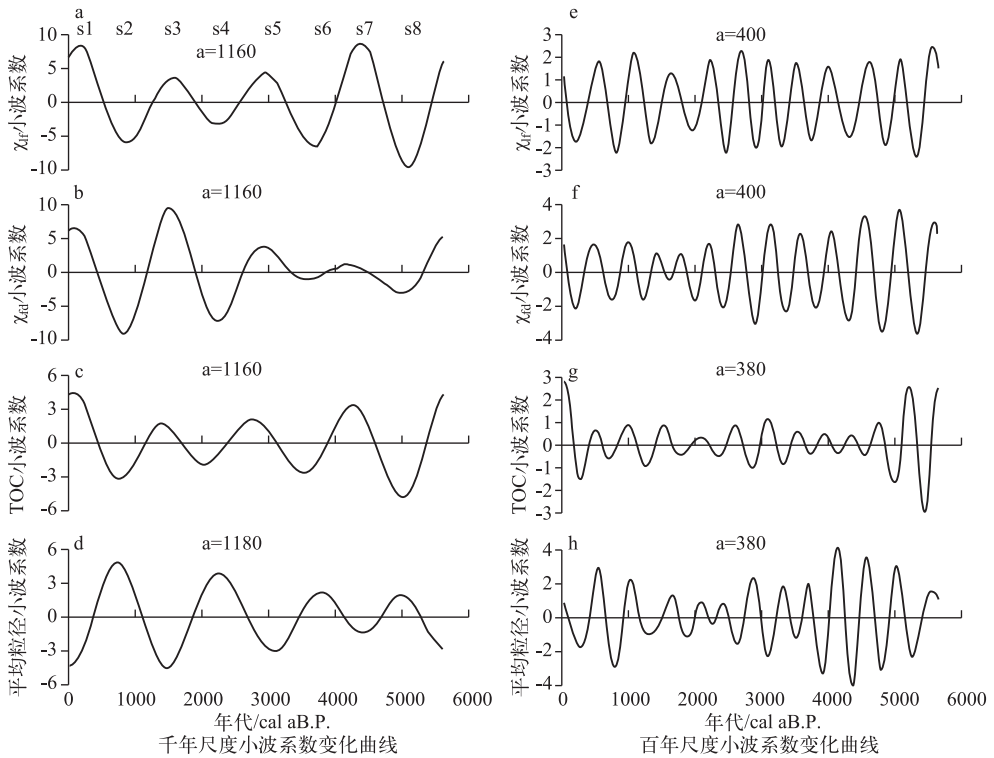


图 4 三清池剖面χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 含量和平均粒径指标千年(a~d)及百年(e~h)尺度上小波系数变化曲线

Fig.4 Wavelet coefficients course lines of χ_{lf}, χ_{fd}, TOC and average particle size at millennial(a-d) and centennial(e-h) scales in the Sanqing Chi section

周期. 小波解译出的三清池全新世气候周期与以上成果非常接近,这一结果表明除在中、低纬度带的平原地区已经发现与大西洋气候振荡存在一致的证据外,千年与百年尺度的周期变化在我国中部高海拔地区同样体现. 另一方面,也说明全新世的气候周期振荡的确存在全球的同步性,暗示出全新世气候波动现象与第四纪冰期旋回类似,存在某种大尺度上气候周期变化驱动机制,而并非是海洋-大气相互作用过程中随机波动的结果. 然而,实际周期依据研究区域与选取材料的不同而存在差异,且在有关全新世千-百年尺度的气候变化的驱动因子问题上,目前并没有一致的共识. 理论上来说,如果存在某种单一确定性的机制驱动全新世气候周期变化,则全球范围内的气候周期波动应该具有一致性. 但实际上,即使是小冰期和大暖期这种全球性现象,但因各地自然地理条件的不同,其发生的时间也存在差异. 值得注意的是,太白山沉积物结果虽然在周期数值上与全球其他地区存在一致性,但其波动相位与低纬地区相差约 400 a 左右[6],这很可能是由于高山带特殊地理位置对全新世气候驱动的独特响应. 太白山作为我国中东部最高峰,一方面封闭的湖泊沉积物能良好的记录古气候变化信息,反映出全新世以来的气候在千-百年尺度的周期振荡变化的特征;另一方面,因太白山湖泊的高海拔与所处地理位置对东亚季风响应的更加敏感,使得沉积物记录对这种气候韵律变化在中纬度地区更具代表性.

4 结论

本研究采用小波分析对太白山湖泊沉积物的χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 和粒度气候代用指标进行了分析,结果显示出晚全新世以来太白山气候环境演变具有明显的阶段性变化,对全新世中冷事件与中世纪暖期气候在代用指标中有良好体现,反映出湖泊沉积物对全新世气候变化的响应机制在太白山同样存在. 千年尺度上,三清池剖面χ_{lf}、χ_{fd}、TOC 和平均粒径参数序列所显示出的实际周期分别为 1427、1427、1427 和 1452 a,并给出晚全

新世 5410 cal aB.P.以来,气候存在 8 次冷暖交替振荡变化. 在百年尺度上,χ_{lf} χ_{fd}、TOC 和平均粒径参数序列揭示出分别为 492、492、467 和 467 a 周期的次一级变化,且整体上经历了近似 10 次的短期冷暖波动. 据小波过线变化曲线,可以判断目前太白山正处于暖湿大背景下的较为寒冷时期,预计未来太白山的暖湿环境背景仍会维持一段时间,在百年尺度上,气候会开始有所好转. 最后,太白山全新世气候周期与全球范围内气候振荡有着较好的一致性,表明我国东部高海拔地区对全新世气候振荡同样具有相似的响应.

致谢:感谢张彩娜、程颖同学在野外工作中的帮助,感谢北京大学第四纪实验室周力平老师、北京大学分析测试中心王智贤老师、中国科学院地理科学与资源研究所杨京蓉老师在室内实验中的指导.

5 参考文献

[1] Jin Liya, Chen Fahu, Zhu Yan. Holocene climatic periodicities recorded form lake sediments in the arid-semiarid areas of northwestern China. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2004, **24**(2): 101-108(in Chinese with English abstract). [靳立亚, 陈发虎, 朱 艳. 西北干旱区湖泊沉积记录反映的全新世气候波动周期性变化. 海洋地质与第四纪地质, 2004, **24**(2): 101-108.]

[2] Campbell ID, Campbell C, Apps MJ *et al*. Late Holocene similar to 1500yr climatic periodicities and their implications. *Geology*, 1998, **26**(5): 471-473. DOI 10.1130/0091-7613(1998).

[3] Bond G, Showers W, Cheseby M *et al*. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates. *Science*, 1997, **278**(5341): 1257-1266. DOI 10.1126/science.278.5341.1257.

[4] Fang Xiuqi, Ge Quansheng, Zheng Jingyun. Cold events during Holocene and millennial climate rhythm. *Progress in Natural Science*, 2004, **14**(4): 456-461(in Chinese with English abstract). DOI 10.3321/j.issn:1002-008X.2004.04.015. [方修琦, 葛全胜, 郑景云. 全新世寒冷事件与气候变化的千年周期. 自然科学进展, 2004, **14**(4): 456-461.]

[5] Liu Jiaqi, Lü Houyuan, Negendank J *et al*. Periodicity of Holocene climatic variations in the Huguangyan Maar Lake. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(11): 1190-1195(in Chinese with English abstract). DOI 10.3321/j.issn:0023-074X.2000.11.015. [刘嘉麒, 吕厚远, Negendank J 等. 湖光岩玛珥湖全新世气候波动的周期性. 科学通报, 2000, **45**(11): 1190-1195.]

[6] Zhou Weijian, Lu Xuefeng, Wu Zhenkun *et al*. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoigê Plateau and AMS radiocarbon dating. *Chinese Science Bulletin*, 2001, **46**(12): 1040-1044(in Chinese with English abstract). DOI 10.3321/j.issn:0023-074X.2001.12.018. [周卫建, 卢雪峰, 武振坤等. 若尔盖高原全新世气候变化的泥炭记录与加速器放射性碳测年. 科学通报, 2001, **46**(12): 1040-1044.]

[7] Xue Jibin, Zhong Wei. Holocene climate variation denoted by Barkol Lake sediments in northeastern Xinjiang and its possible linkage to the high and low latitude climates. *Science China*:*Series D*: *Earth Sciences*,2011, **41**(1): 61-73(in Chinese with English abstract). DOI 10.1007/s11430-010-4111-z. [薛积彬, 钟巍. 新疆巴里坤湖全新世气候环境变化与高低纬间气候变化的关联. 中国科学:D 辑: 地球科学, 2011, **41**(1): 61-73.]

[8] Liu Hongyan, Wang Hongya, Cui Haiting. Climatic changes and timberline responses over the past 2 000 years on the alpine zone of Mt. Taibai. *Quaternary Sciences*, 2003, **23**(3): 299-308(in Chinese with English abstract). [刘鸿雁, 王红亚, 崔海亭. 太白山高山带 2000 多年以来气候变化与林线的响应. 第四纪研究, 2003, **23**(3): 299-308.]

[9] Wang H, Liu H, Liu Y *et al*. Mineral magnetism and other characteristics of sediments from an alpine lake (3, 410 m a. s. l.) in central China and implications for late Holocene climate and environment. *Journal of Paleolimnology*, 2010, **43**(2): 345-367. DOI 10.1007/s10933-009-9335-6.

[10] Zhang Junpai, Tong Min, Wang Shubing *et al*. Palaeoclimatic reconstruction of sporoppllon recorded in Fangxiangsi profile, Taibaishan Mountain. *Journal of Geomechanics*, 2001, **7**(4): 315-320(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1006-6616.2001.04.005. [张俊牌, 童敏, 王书兵等. 太白山芳香寺剖面孢粉记录的古气候重建. 地质力学学报, 2001, **7**(4): 315-320.]

[11] Liu Gengnian, Fu Hairong, Cui Zhijiu *et al*. An 8000 years environmental change record of lacustrine deposits of foyechi Lake at Taibai Mountain. *Research of Soil and Water Conservation*, 2005, **12**(4): 1-4(in Chinese with English abstract). [刘耕年, 傅海荣, 崔之久等. 太白山佛爷池湖泊沉积理化分析反映的 8000 aB.P.以来环境变化. 水土保持研究, 2005, **12**(4): 1-4.]

[12] Cui Zhijiu, Tang Xinyuan, Li Jianjiang *et al*. Information of Holocene environmental change from lacustrian deposits of the

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

Foyechi Lake section, Taibai mountain. *Journal of Geomechanics*, 2003, **9**(4): 330-336(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1006-6616.2003.04.004. [崔之久, 唐元新, 李建江等. 太白山佛爷池剖面的全新世环境变化信息. 地质力学学报, 2003, **9**(4): 330-336.]

[13] Cazelles B, Chavez M, Berteaux D *et al*. Wavelet analysis of ecological time series. *Oecologia*, 2008, **156**(2): 287-304. DOI 10. 1007/s00442-008-0993-2.

[14] Fu Zhijun. The conservations and the characteristics of Glacial Lake resources in Taibaishan Mountai. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2008, **22**(2): 102-104(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1009-4490.2008.02.025. [傅志军. 太白山冰川湖泊资源的特征及其保护. 山西师范大学学报:自然科学版, 2008, **22**(2): 102-104.]

[15] Li Yu, Wang Naiang, Li Zhuolun *et al*. Reworking effects in the Holocene Zhuye Lake sediments: A case study by pollen concentrates AMS ^{14}C dating. *Science China: Earth Sciences*, 2012, **42**(9): 1429-1440(in Chinese with English abstract). DOI 10.1007/s11430-012-4482-4. [李育, 王乃昂, 李卓仑等. 通过孢粉浓缩物 AMS^{14}C 测年讨论猪野泽全新世湖泊沉积物再沉积作用. 中国科学: 地球科学, 2012, **42**(9): 1429-1440.]

[16] Cao Jianting, Shen Ji, Wang Sumin *et al*. A preliminary study of climate change during the little ice age inferred from lacustrine sediments in Daihai Lake, Inner Mongolia. *J Lake Sci*,2000, **12**(2): 97-104(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2000.0201. [曹建廷, 沈吉, 王苏民. 内蒙古岱海湖泊沉积记录的小冰期气候环境. 湖泊科学, 2000, **12**(2): 97-104.]

[17] Thompson R, Oldfield F. Environmental magnetism. London: Allen & Unwin, 1986.

[18] Li Zhuolun, Wang Naiang, Li Yu *et al*. Precipitation changes during the Early Holocene and Middle Holocene implicated by exogenetic detrital mineral changes in Huahai Lake, Hexi Corridor of NW China. *Journal of Desert Research*, 2014, **34**(6): 1480-1485(in Chinese with English abstract). DOI 10.7522/j.issn.1000-694X.2014.00004. [李卓仑, 王乃昂, 李育等. 花海古湖泊外源碎屑矿物含量揭示的河西走廊早、中全新世降水变化. 中国沙漠, 2014, **34**(6): 1480-1485.]

[19] Li Chunmei, Wang Meihua, Wang Hongya. Mineral magnetic characteristics of sediments from Maigang Reservoir, Guizhou Province and their implications on soil erosion. *Geographical Research*, 2010, **29**(11): 1971-1980(in Chinese with English abstract). DOI 10.11821/yj2010110006. [李春梅, 汪美华, 王红亚. 贵州麦岗水库沉积物的矿物磁性特征及其土壤侵蚀意义. 地理研究, 2010, **29**(11): 1971-1980.]

[20] Hu Pengxiang, Liu Qingsong. The production and transformation of magnetic minerals during pedogenesis and its paleoclimate significance. *Quaternary Sciences*, 2014, **34**(3): 458-473(in Chinese with English abstract). DOI 10.3969/j.issn.1001-7410.2014.03.02. [胡鹏翔, 刘青松. 磁性矿物在成土过程中的生成转化机制及其气候意义. 第四纪研究, 2014, **34**(3): 458-473.]

[21] Li Zhuolun, Chen Qing, Wang Naiang *et al*. Discovery of dolomite deposition during the Holocene and its environmental significance in Lake Huahai, Hexi Corridor. *J Lake Sci*, 2013, **25**(4): 558-564(in Chinese with English abstract). DOI 10.18307/2013.0414. [李卓仑, 陈晴, 王乃昂等. 河西走廊花海古湖泊全新世白云石的发现及其环境意义. 湖泊科学, 2013, **25**(4): 558-564.]

[22] Hatfield RG, Cioppa MT, Trenhaile AS. Sediment sorting and beach erosion along a coastal foreland: Magnetic measurements in Point Pelee National Park, Ontario, Canada. *Sedimentary Geology*, 2010, **231**(3): 63-73. DOI 10.1016/j.sedgeo.2010.09.007.

[23] Zhang Zhenke, Wu Ruijin, Wang Sumin. Implication of magnetic frequency dependent susceptibility on environmental variation from lacustrine sediment in Daihai Lake. *Geographical Research*, 1998, **17**(3): 297-302(in Chinese with English abstract). DOI 10.11821/yj1998030011. [张振克, 吴瑞金, 王苏民. 岱海湖泊沉积物频率磁化率对历史时期环境变化的反映. 地理研究, 1998, **17**(3): 297-302.]

[24] Yao Tandong, Shi Yafeng eds. Climatic changes of Holocene reflected in the ice core from Dunde, Qilian Mountains. The Climates and Environments of Holocene Megathermal in China. Beijing: China Ocean Press, 1992: 206-211(in Chinese). [姚檀栋, 施雅风. 祁连山敦德冰芯记录的全新世气候变化. 中国全新世大暖期气候与环境. 北京: 海洋出版社, 1992: 206-211.]

[25] Jian Zhimin, Meng Yi. Holocene paleoenvironmental changes in the Yangtze River mouth and their responses to the variations in the kuroshio current. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2002, **22**(3): 77-82(in Chinese with English ab-

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06

stract). [翦知湣, 孟翊. 长江口区全新世古环境变化及其对黑潮变动的响应. 海洋地质与第四纪地质, 2002, **22**(3): 77-82.]

[26] Wang Shaowu, Cai Jingning, Zhu Jinhong *et al*. Studies on climate change in China. *Climatic and environmental Research*, 2002, **7**(2): 137-145(in Chinese with English abstract). DOI 10.3878/j.issn.1006-9585.2002.02.02. [王绍武, 蔡静宁, 朱锦红等. 中国气候变化的研究. 气候与环境研究, 2002, **7**(2): 137-145.]

[27] Sirocko F, Garbe-SchNberg D, McIntyre A *et al*. Teleconnections between the subtropical Monsoons and high-latitude climates during the Last Deglaciation. *Science*, 1996, **272**: 526-529. DOI 10.1126/science.272.5261.526.

[28] Xian Feng, Zhou Weijian, Yu Huagui. The abrupt changes and periodicities of climate during Holocene. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2006, **26**(5): 109-115(in Chinese with English abstract). [鲜锋, 周卫健, 余华贵. 全新世气候系统的突变及周期性. 海洋地质与第四纪地质, 2006, **26**(5): 109-115.]

[29] Qin Yunshan, Li Tiegang, Cang Shuxi. Abrupt changes in earth's climate system since last interglacial. *Advance in Earth Sciences*, 2000, **15**(3): 243-250(in Chinese with English abstract). DOI 10.3321/j.issn:1001-8166.2000.03.001. [秦蕴珊, 李铁刚, 苍树溪. 末次间冰期以来地球气候系统的突变. 地球科学进展, 2000, **15**(3): 243-250.]

[30] Zhou WJ, Lu XF, Wu ZK *et al*. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoigê Plateau and AMS radiocarbon dating. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(1): 66-70. DOI 10. 1360/02tb9013.

地质测绘院 社会 0004.湖泊科学 2016-4 5 校样 张芸 成品尺寸 185×260(mm) 45 字 44 行 2016/06/06