

DOI: 10.3724/SP.J.1140.2011.04155

湖光岩玛珉湖沉积物反映的 全新世以来古环境演化

吴旭东^{1,2}, 沈吉¹, 汪勇¹

(1 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:对广东湖光岩玛珉湖沉积物 550 °C 烧失量(loss on ignition, LOI)和 Ti、Al、Si、K 元素强度分析表明,烧失量主要反映了流域生产力水平的变化,而 Ti、Al、Si、K 4 种元素被证明主要来自于流域,反映了径流输入的变化。11 000~7 800 cal. aBP,湖光岩地区的气候温暖、湿润;7 800 cal. aBP 之后,气候迅速变冷、变干,虽然 7 800 cal. aBP 之后气候也发生了一系列的冷、暖波动,但是其温暖程度已远远不及早全新世的水平。湖光岩地区全新世千年尺度气候演化格局和亚洲季风区的其他记录基本一致,即全新世早期为气候适宜期;全新世中、晚期温度降低,气候变干。湖光岩地区全新世中期的降温程度比亚洲季风区其他地质记录的反映更剧烈,这可能是地理位置差异造成的全新世季风演化差异性的体现。湖光岩地区全新世中后期的气候演化过程可能与厄尔尼诺系统存在联系。

关键词:古环境;烧失量;元素强度;湖光岩玛珉湖;全新世

中图分类号:P595 文献标识码:A 文章编号:0256-1492(2011)04-0155-08

过去全球变化是当今全球变化研究中最活跃的领域,大量的研究表明全新世气候是不稳定的、甚至是突变^[1-6]。气候是人类赖以生存的环境条件,全新世气候波动对人类产生过重大影响^[7-11],研究全新世的古气候演变有助于我们预测未来气候发展方向^[12]。全新世气候适宜期是全新世气候研究的热点,国内学者对全新世气候适宜期做了大量的研究工作,施雅风等提出中国全新世气候适宜期在 8.5~3 kaBP 之间,其中 7.2~6 kaBP 为鼎盛阶段^[13];吴锡浩、安芷生等认为东亚季风区全新世气候适宜期的出现并非同步,东亚夏季风增强时间由西北往东南逐渐推迟^[14-15]。近年来,高分辨率石笋记录显示了早全新世为气候适宜期,中、晚全新世季风逐渐减弱的演化模式^[16-18],这显然与“中全新世大暖期”和“全新世气候适宜期的非同步性”的观点相矛盾。陈发虎等提出了全新世气候变化的“西风区模式”和“季风区模式”,认为季风区的气候适宜期出现在全新世早期,而西风区的气候适宜期出现在全新世中期^[19-20]。

湖光岩地处中国大陆最南端的雷州半岛地区,受到东亚季风、印度季风以及热带风暴的共同影响,深入探讨湖光岩地区全新世以来的古气候演化对进

一步理解全新世亚洲季风演化格局具有重要意义。中外学者已经对湖光岩玛珉湖做了大量的古气候研究工作^[21-27],但是大部分研究工作的时段都集中于末次冰期以来^[21-24],对全新世气候变化的讨论比较粗略,仅有王淑云等人的孢粉记录^[28]、Yancheva 等人的 Ti 元素记录^[29]和刘嘉麒等的干密度记录^[25]。本文通过对湖光岩玛珉湖高分辨率的烧失量(LOI)和 Ti、Al、Si、K 元素强度进行研究,试图恢复湖光岩地区全新世以来高分辨率的气候、环境演化过程,为全新世亚洲季风演化格局研究提供基础数据。

1 研究区概况

湖光岩玛珉湖(21°9'N,110°17'E)位于广东省湛江市西南方向大约 18 km 处(图 1A),是雷琼火山区中典型的玛珉湖。多年平均气温为 23.1 °C,多年平均降水量约为 1 600 mm。本区属于亚热带海洋性季风气候,热带风暴频繁,雨季、旱季变化明显。区域植被是半常绿季雨林,土壤主要是火山喷出物风化后形成的,成土母质为玄武岩,富含 Mg、Ca、Al、Fe、Ti、K 等元素和矿物质。湖光岩玛珉湖湖水面积 2.25 km²,汇水面积 3.2 km²,最大水深 22 m,平均水深 12 m。湖近似心形,一条南北走向的浅滩把湖光岩分成东西两个部分,其中东湖小,西湖大(图 1B)。浅滩在旱季时可能会露出地表。湖泊四周大部分被火山岩陡崖所环绕。

基金项目:国家自然科学基金项目(40872117)

作者简介:吴旭东(1982—),女,博士研究生,主要从事湖泊沉积与环境演化研究,E-mail:wuxudong2004916@yahoo.com.cn.

通讯作者:沈吉,E-mail:jishen@niglas.ac.cn

收稿日期:2010-12-13;改回日期:2011-04-11. 文凤英编辑

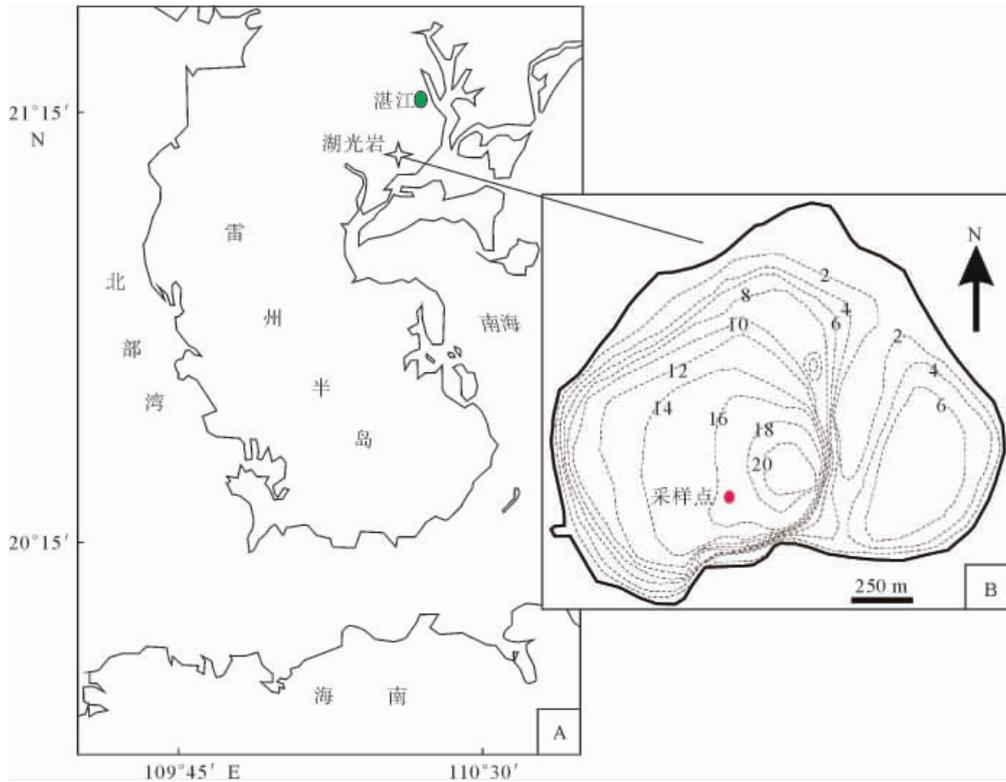


图1 湖光岩玛珉湖位置(A)、等深线(m)及采样点位置(B)

Fig. 1 Geographical location of the Huguangyan maar lake(A), Isobath map (m) and coring sites(B)

2 样品采集与分析

2009年11月用UWITEC型水上平台和活塞取心设备在湖光岩玛珉湖西湖水深16.2 m处(图1B)采集了两根平行岩心(21°08′38.28″N、110°16′45.66″E),岩心总长855 cm。

首先把岩心沿中轴线剖开,然后在同济大学海洋地质国家重点实验室利用岩心扫描X荧光光谱仪进行元素强度(Ti、Al、Si、K)扫描,分析间距为1 cm。由于岩心顶部22 cm的含水量太高,元素扫描数据缺失。元素扫描后的岩心以1 cm为间距分样,共取得样品855个。

取适量样品置于10 mL坩埚内,在105℃下烘干称重,然后放入马弗炉中在550℃下煅烧5 h后密封冷却称重,计算烧失量的公式为:

$$LOI\% = [(W_{105^\circ\text{C}} - W_{550^\circ\text{C}}) / W_{105^\circ\text{C}}] \times 100\%$$

其中, $W_{105^\circ\text{C}}$ 为105℃下烘干的样品质量, $W_{550^\circ\text{C}}$ 为550℃下煅烧后的样品重量。

3 钻孔岩性描述与年代标尺的建立

3.1 钻孔岩性

岩心基本上是质地比较均匀有机质含量较高的

浅灰黑色—黑色泥,偶有几个厘米长颜色较浅的层插入,但总体上岩心的颜色和岩性变化不大。整个剖面可以大致分为以下几段:

- (1)0~10 cm,黑色稀泥。
- (2)10~220 cm,浅灰黑色泥。
- (3)220~425 cm,灰黑色泥。
- (4)425~530 cm,浅灰黑色泥。
- (5)530~574 cm,灰黑色泥。
- (6)574~584 cm,深灰黑色泥。
- (7)584~635 cm,灰黑色泥。
- (8)635~855 cm,黑色泥。

3.2 年代标尺

首先默认顶端的样品年龄是采样时间,再将测试得到的Ti元素强度与Yancheva等人已经发表的Ti元素强度^[29]进行对比(图2),获得若干年代控制点,经过内插和外推得到了整个岩心的年代标尺。为了证明平移得到的年代标尺是可靠的,把两根岩心的Ti元素强度变化根据年代标尺作图(图3)。从图3可以看出两根岩心Ti元素强度随年代的变化是完全同步的。因此,通过对比平移方法获得的年代标尺是可靠的。参考文献中的年龄误差是160 a,通过平移得到的年龄误差也可以近似认为是160 a。

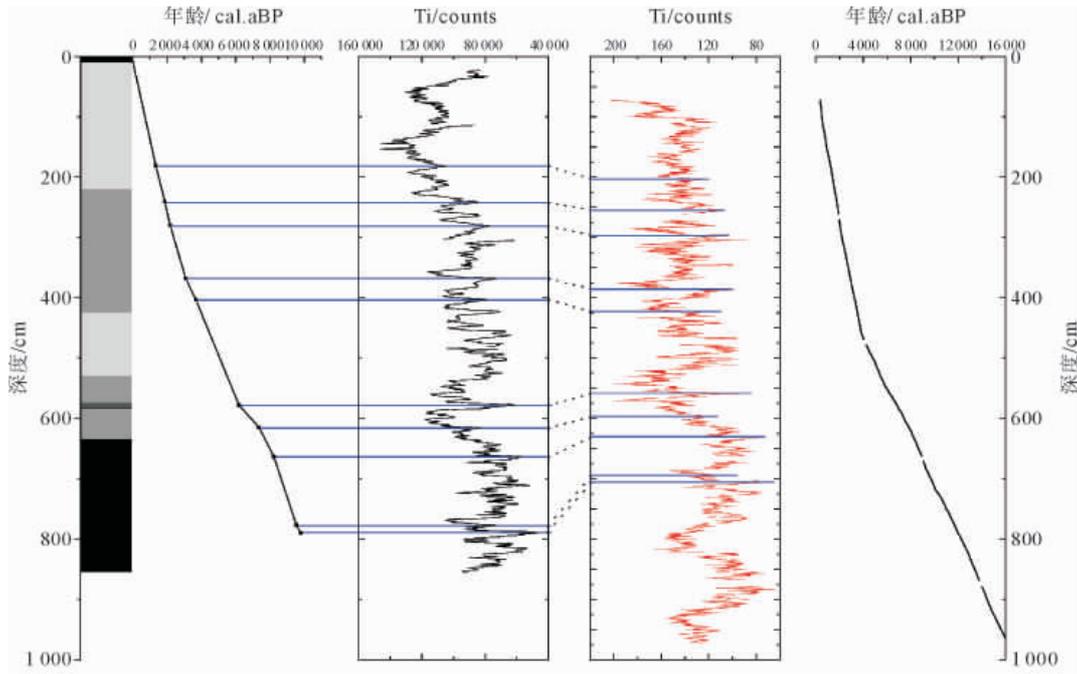


图 2 湖光岩玛珉湖两根岩心 Ti 元素强度变化趋势对比及年龄与深度关系(红色为引用数据^[29],黑色为测试数据)

Fig. 2 Ti intensity variations in the two cores with age and depth (the red line is from reference 29, and the black line from the measured data)

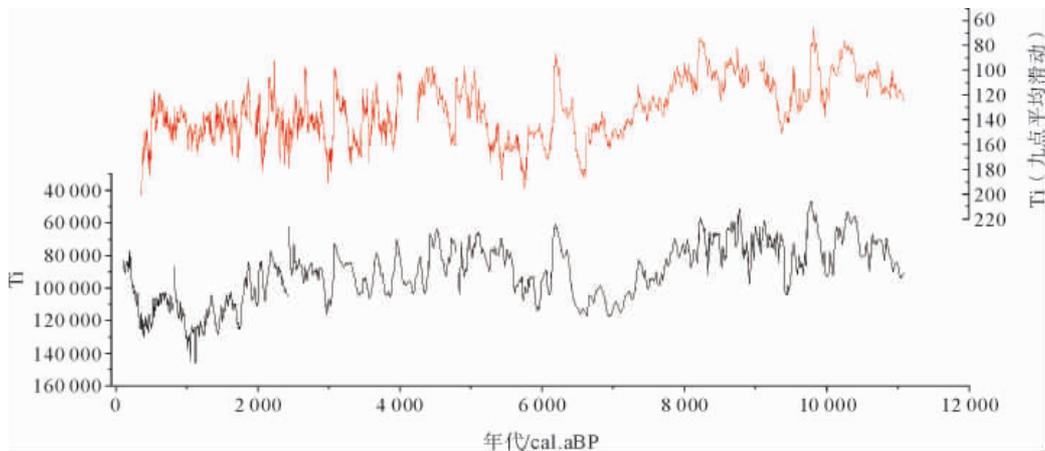


图 3 湖光岩玛珉湖两根岩心 Ti 元素强度与年代(红色为引用数据^[29],黑色为测试数据)

Fig. 3 Ti intensity variation with age in the two cores (the red line is from reference 29, the black line from the measured data)

4 结果

4.1 烧失量与元素的环境意义

550 °C 烧失量可以较为方便和准确地代表沉积物中的有机质含量^[30-31],沉积物中有机质则反映了湖泊和流域的生产力水平,因而烧失量可以通过反映湖泊生产力水平而间接反映流域气候条件的变化。较高的烧失量通常反映湖泊和流域的生产力水

平高,气候温暖、湿润;较低的烧失量则反映湖泊和流域的生产力水平低,气候寒冷、干燥^[32]。烧失量在 11%至 36%之间变化,平均值是 21% (图 4)。11 000~7 800 cal. aBP,烧失量最高,反映湖泊的生产力水平高;7 800~5 600 cal. aBP,烧失量明显降低,指示湖泊生产力水平降低、流域的风化作用减弱;6 400~6 000 cal. aBP 是 7 800~5 600 cal. aBP 之间烧失量相对较高的阶段,反映了较冷气候条件下也有相对温暖的阶段;5 600~4 000 cal. aBP,烧失量较 7 800~5 000 cal. aBP略有升高,反映了气

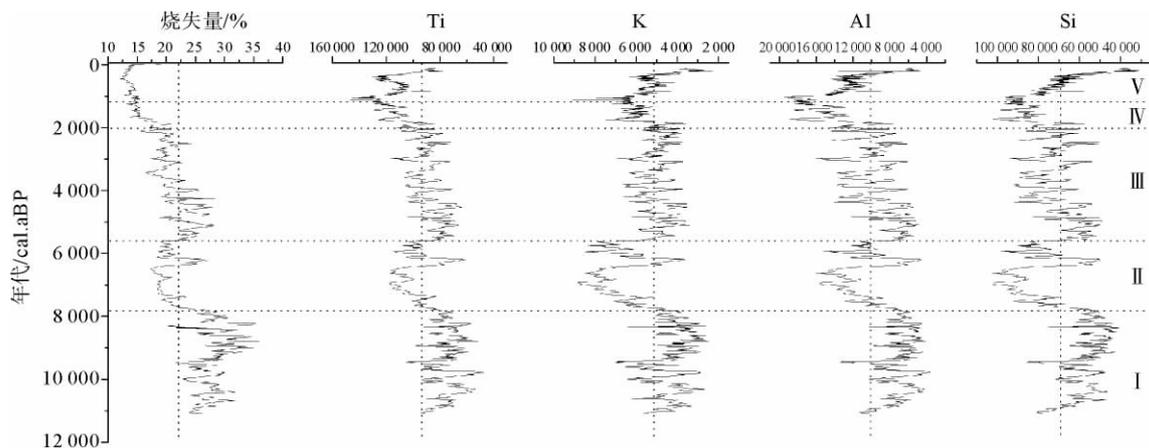


图4 湖光岩玛珥湖烧失量(LOI)和Ti、Al、Si、K元素强度变化

Fig. 4 LOI and Ti, Al, Si, K intensity variations of the Huguangyan Maar Lake

候的回暖;4 000~400 cal. aBP 之间,烧失量逐渐变小,一方面是气候条件影响下湖泊生产力水平降低的结果,一方面也受到沉积速率变高稀释作用的影响;400 cal. aBP 之后,烧失量又有逐步回升的趋势。

在风化过程中, Ti、Al 属于比较稳定的惰性元素, Al 主要以铝硅酸盐矿物及其风化产物存在, Ti 风化后形成不溶性化合物,两者一般都在风化产物中富集,以碎屑矿物形式被搬运^[33-35]。Ti、Al、Si、K 元素强度在全新世内的变化趋势基本一致,说明它们的来源相同。湖光岩玛珥湖是一个封闭的火山口湖,补给范围只涉及环形围墙内,外源的物质只能有两个来源:一是风尘沉积,二是补给区域内的径流输入。湖光岩的纬度低,气候温暖湿润,风化作用和径流搬运能力强。虽然沉积物内部分细颗粒物可能来自于风尘沉积,但是大部分的前人研究认为湖光岩沉积物的主体是近源的陆源物质^[21, 25, 36-38]。雷州半岛地区的新生代玄武岩为碱性橄榄玄武岩,富含 Ti、Al、Si、K 等元素^[39],而周厚云等通过对湖光岩沉积物中 Sr、Nd 同位素以及大量微量元素特征研究也指出沉积物与当地的火山碎屑岩和土壤的成分相似^[40]。韩玉林等通过对湖光岩表层沉积物的粒度和磁性特征分析得到,决定湖光岩沉积物近代沉积物磁性矿物种类、含量变化的因素可能主要还是水文特征,湖光岩玛珥湖周边小流域是现代沉积物中磁性矿物的主要来源^[41]。以上的研究结果说明湖光岩沉积物中外源的部分主要是来自于流域的。

湖泊沉积物有内外两个源。当气候条件适宜时,湖泊微生物大量繁殖,内源沉积物增加,反之内源沉积物减少。外源输入一方面受到降雨量影响,降雨量越大,径流输入越多,沉积速率越高;另一方面也受到植被覆盖程度的影响:植被发育较好,侵蚀

作用弱,沉积速率降低;反之则相反。湖光岩地处南亚热带地区,全新世阶段的降雨量虽然有波动,但降雨量水平整体较高。因此,植被覆盖状况应该是影响径流输入变化的控制因子。

Ti、Al、Si、K 4 种元素强度的变化趋势非常相似。Ti 元素强度为 40 000~160 000,平均值为 92 686; Al 元素强度为 2 000~20 000,平均值为 10 007; Si 元素强度为 30 000~110 000,平均值为 69 726; K 元素强度为 2 000~10 000,平均值为 5 136。整根岩心的沉积速率变化幅度比较大,平均沉积速率是 7.7 cm/100 a。11 000~7 800 cal. aBP, Ti、Al、Si、K 元素强度为整个剖面中最低,平均沉积速率是 6.5 cm/100 a,反映径流输入比例最低,气候条件适宜,内源沉积物比例高,外源沉积物比例低; 7 800~5 600 cal. aBP, Ti、Al、Si、K 元素强度明显升高,平均沉积速率却是整根岩心中最低的,仅为 4.8 cm/100 a,反映气候条件恶化使湖泊内源沉积物减少,径流输入物质的比例升高,最低的沉积速率说明这一阶段植被覆盖程度较好,降雨量较低,侵蚀速率也较低,但是 6 400~6 000 cal. aBP 是 7 800~5 600 cal. aBP 之间 Ti、Al、Si、K 元素强度相对较低的阶段,反映这一阶段的气候条件相对较好; 5 600~2 000 cal. aBP, Ti、Al、Si、K 元素强度有所降低,但仍高于全新世早期的水平,平均沉积速率是 7.8 cm/100 a,反映了这一阶段气候回暖,内源沉积物比例升高,径流输入比例有所下降,但是沉积速率增加了,反映流域的植被覆盖状况变差,侵蚀速率增大了; 2 000~1 130 cal. aBP, Ti、Al、Si、K 元素强度迅速升高,平均沉积速率是 11.9 cm/100 a,说明内源沉积物比例下降,径流输入比例迅速增加,植被破坏严重,侵蚀速率迅速加大; 1 130 cal. aBP 至今, Ti、

Al、Si、K 元素强度明显降低,平均沉积速率是 13.5 cm/100 a,反映了内源沉积物比例上升,最高的沉积速率说明植被覆盖程度较差,侵蚀速率高,虽然径流输入在沉积物中的比例下降,但是总量还是增加了。

4.2 全新世气候环境变化

根据 550 °C 烧失量和 Ti、Al、Si、K 4 种元素强度的变化趋势,湖光岩地区全新世期间的气候演化过程可分为以下几个阶段:

(1)阶段 I:11 000~7 800 cal. aBP(855~640 cm):烧失量最高,Ti、Al、Si、K 元素强度最低,尤其是在 9 500~8 400 cal. aBP 之间,烧失量和 Ti、Al、Si、K 元素强度分别达到峰值和谷值,平均沉积速率较低。反映了全新世早期湖光岩地区的气候温暖、湿润,适宜的气候条件使生产力水平提高,流域内的植被覆盖状况好,侵蚀作用弱,内源沉积物比例高,外源沉积物的比例低。

(2)阶段 II:7 800~5 600 cal. aBP(640~537 cm):烧失量明显降低,Ti、Al、Si、K 元素强度明显升高,平均沉积速率是整个剖面中最低的。这反映了自 7 800 cal. aBP 开始,湖光岩地区的气候条件迅速变干、变冷,水、热配置条件变差使得生产力水平显著降低,但是流域的植被覆盖状况仍然较好,侵蚀作用较弱,径流输入较少。但是由于生产力水平下降而使内源沉积物比例下降,造成了外源沉积物的比例相对升高。

(3)阶段 III:5 600~2 000 cal. aBP(537~257 cm):烧失量有所回升,Ti、Al、Si、K 元素强度降低,平均沉积速率迅速升高。说明这一阶段气候又向暖、湿的方向发展,生产力水平升高,内源沉积物比例升高,流域植被覆盖程度明显变差,外源沉积物的比例虽然下降了但是总量却增多了。尤其是在本阶段的后期,气候因素和人类活动的共同影响使流域的植被覆盖程度恶化,侵蚀速率大幅度增加,进而增加了湖泊的沉积速率。

(4)阶段 IV:2 000~1 130 cal. aBP 至今(257~153 cm):烧失量降低,Ti、Al、Si、K 元素强度迅速升高,平均沉积速率继续升高。说明气候转干,生产力水平降低,内源沉积物比例下降,外源沉积物比例增加,人类活动的影响使流域的植被覆盖继续恶化,侵蚀速率加大。

(5)阶段 V:1 130 cal. aBP 至今(153~0 cm):1 130 cal. aBP 至今,烧失量缓慢增加, Ti、Al、Si、K 元素强度有逐步降低趋势,平均沉积速率最高。反映了 1 130 cal. aBP 以来气候有所回暖,内源沉积物

比例升高,外源沉积物比例下降,但是高沉积速率表明流域的植被覆盖程度仍较差。

5 讨论

湖光岩沉积物烧失量和 Ti、Al、Si、K 元素强度记录的全新世以来的环境演化与王淑云等用植物花粉恢复的湖光岩地区全新世以来的气候环境演化格局是基本一致的;即全新世早期水热配比最佳,为气候适宜期;全新世中晚期气候开始逐渐干旱^[28],这也进一步证明了通过平移得到的年代标尺是可靠的。湖光岩玛珥湖烧失量和 Ti、Al、Si、K 元素强度反映的气候演化格局与亚洲季风区的石笋记录^[16-18]、泥炭记录^[42]反映的全新世气候演化格局是一致的,属于全新世气候演化的“季风区模式”^[19-20](图 5)。

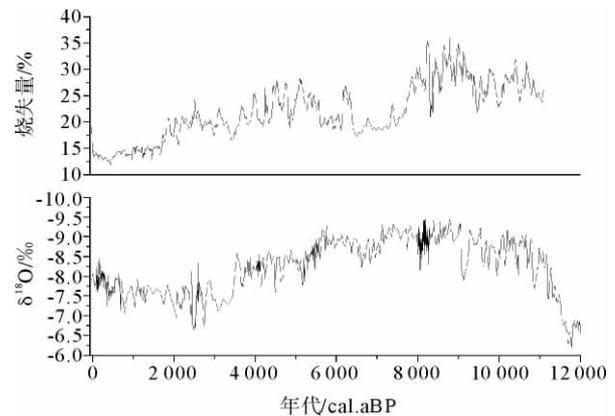


图5 湖光岩玛珥湖 550 °C 烧失量(LOI)与董哥洞石笋氧同位素记录的对比^[17]

Fig. 5 Comparison between LOI of Huguangyan Maar Lake and oxygen isotopic ratios of Dongge Cave^[17]

但是,湖光岩地区全新世气候演化格局与“季风区模式”下的其他地质记录之间也存在一定的差异(图 5)。首先是全新世中期,约 7 800 cal. aBP 以后,湖光岩地区迅速降温,且降温持续时间长,而董哥洞的石笋记录显示的降温幅度远不如湖光岩强烈,且持续时间也相对较短;其次,董哥洞石笋记录显示 2 000 cal. aBP 以后气候有所回暖,但是湖光岩的记录中显示的气候回暖发生在 1 130 cal. aBP 以后;再次,湖光岩与董哥洞石笋记录所展示的气候冷暖变化并不能一一对应。这可能是由不同的地理位置造成的全新世季风演化差异性的体现^[43]。

湖光岩地处亚热带低纬度区,受厄尔尼诺和季风等低纬过程的影响明显;厄尔尼诺年登陆的热带

气旋和台风减少^[44],降雨量减少。湖光岩玛珉湖烧失量和 Ti、Al、Si、K 元素强度记录显示了 5 000~1 130 cal. aBP 期间气候逐渐干旱化的趋势,尤其以 2 000~1 130 cal. aBP 干旱化程度发展得最快,1 130 cal. aBP 以后,干旱化程度又有所缓解。南美的湖泊沉积物记录显示厄尔尼诺活动从 7 000 cal. aBP 开始,尤其是 5 000 cal. aBP 以后迅速增强,并在 1 200 cal. aBP 达到最强,随后厄尔尼诺活动减弱^[45]。湖光岩沉积物记录到的气候干旱化趋势与南美湖泊记录的厄尔尼诺演化过程具有很强的相似性,尤其是结束的时间非常一致,说明湖光岩地区全新世中后期的气候演化过程可能与厄尔尼诺系统存在着密切的联系。

6 结论

(1) 烧失量主要反映了流域生产力水平的变化,而 Ti、Al、Si、K 4 种元素主要来自于流域,反映了径流输入的变化。

(2) 11 000~7 800 cal. aBP,湖光岩地区的气候温暖、湿润;7 800 cal. aBP 之后,气候迅速变冷、变干。湖光岩地区全新世以来千年尺度的气候演化格局与全新世气候演化的“季风区模式”基本一致;全新世早期是气候适宜期,全新世中期开始气候逐渐变干。

(3) 湖光岩地区全新世气候演化格局与“季风区模式”下的其他地质记录之间也存在一定的差异,降温程度更加剧烈,这可能是由地理位置的差异造成的全新世季风演化差异性的体现。

(4) 湖光岩地区全新世中后期的气候演化过程与厄尔尼诺系统可能存在着一定的联系。

致谢:感谢中国科学院南京地理与湖泊研究所的张恩楼老师和袁和忠博士以及南京大学地球科学与工程学院的张朝晖教授和潘银华、王星辰在野外采样给予的帮助,感谢同济大学海洋地质国家重点实验室的谢昕老师在试验分析中的指导。

参考文献 (References)

- [1] Denton G H, Karlén W. Holocene climate variations; their pattern and possible cause [J]. *Quaternary Research*, 1973, 3: 155-174.
- [2] O'Brien S R, Mayewski P A, Meeker L D, et al. Complexity of Holocene climate as reconstructed from a Greenland ice core [J]. *Science*, 1995, 270: 1962-1964.
- [3] Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A pervasive millennial-scale cycle in North Atlantic Holocene and glacial climates [J]. *Science*, 1997, 278: 1257-1266.
- [4] Frank McDermott, David P Matthey, Chris Hawkesworth. Centennial-scale Holocene climate variability revealed by a high-resolution speleothem $\delta^{18}\text{O}$ record from SW Ireland [J]. *Science*, 2001, 294: 1328-1331.
- [5] 陈发虎,朱艳,李吉均,等. 民勤盆地湖泊沉积记录的全新世百年尺度夏季风快速变化[J]. *科学通报*, 2001, 46: 1414-1419. [CHEN Fahu, ZHU Yan, LI Jijun, 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*, 46(23): 1942-1947.]
- [6] 周卫健,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[J]. *科学通报*, 2001, 46(12): 1040-1044. [ZHOU Weijian, LU Xuefeng, WU Zhengkun, et al. Peat record reflecting Holocene climatic change in the Zoigê Plateau and AMS radiocarbon dating [J]. *Chinese Science Bulletin*, 47(1): 66-70.]
- [7] 吴文祥,刘东生. 4 000 aBP 前后降温事件与中华文明的诞生 [J]. *第四纪研究*, 2001, 21(5): 443-451. [WU Wenxiang, LIU Tungsheng. 4 000 aBP event and its implications for the origin of ancient Chinese civilization [J]. *Quaternary Sciences*, 2001, 21(5): 443-451.]
- [8] 吴文祥,刘东生. 5 500 aBP 气候事件在三大文明古国古文明和古文化演化中的作用 [J]. *地质前沿*, 2002, 9(1): 156-162. [WU Wenxiang, LIU Tungsheng. 5 500 aBP climatic event and its implications for the emergence of civilizations in Egypt and Mesopotamia and Neolithic cultural development in China [J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(1): 156-162.]
- [9] Michael W Binforda, Alan L Kolatab, Mark Brenner, et al. Climate variation and the rise and fall of an Andean Civilization [J]. *Quaternary Research*, 1997, 47:235-248.
- [10] Cullen H M, deMenocal P B, Hemming S, et al. Climate change and the collapse of the Akkadian empire: Evidence from the deep sea [J]. *Geology*, 2000, 28(4): 379-382.
- [11] Courty M A, Coldberg P, Macphall R. Soil and Micromorphology in Archaeology [M]. Cambridge University Press, Cambridge (1989).
- [12] Y He, Wilfred H Theakstone, Zhang Zhonglin, et al. Asynchronous Holocene climatic change across China [J]. *Quaternary Research*, 2004, 61:52-63.
- [13] 施雅风,孔昭宸,王苏民,等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件 [J]. *中国科学 B 辑*, 1992, 22(12): 1300-1305. [SHI Yafeng, KONG Zhaochen, WANG Sumin, et al. The climate fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China [J]. *Science in China (Series B)*, 1992, 22(12): 1300-1305.]
- [14] 吴锡浩,安芷生,王苏民,等. 中国全新世气候适宜期东亚夏季风时空变迁 [J]. *第四纪研究*, 1994, 14(1): 24-37. [WU Xihao, AN Zhisheng, WANG Sumin, et al. The temporal and spatial variation of East Asia summer monsoon in Holocene optimum in China [J]. *Quaternary Sciences*, 1994, 14

- (1): 24-37.]
- [15] An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19 (8): 743-762.
- [16] 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.
- [17] Yuan D Cheng, Edwards H, Dykoski R L, et al. Timing, duration, and transitions of the last interglacial Asian monsoon [J]. *Science*, 2004, 304: 575-578.
- [18] Shao X H, Wang Y J, Cheng H, et al. Long-term trend and abrupt events of the Holocene Asian monsoon inferred from a stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record from Shennongjia in Central China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51:221-228.
- [19] Fahu Chen, Zicheng Yu, Meilin Yanga, 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: 351-364.
- [20] 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——以新疆博斯腾湖记录为例[J]. *第四纪研究*, 2006, 26 (6): 881-887. [CHEN Fahu, HUANG Xiaozhong, YANG Meilin, et al. Westerly dominated Holocene climate model in arid central Asia—case study on Bosten lake, Xinjiang, China [J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26 (6): 881-887.]
- [21] Fuhrmann A, Mingram J, L cke A, et al. Variations in organic matter composition in sediments from Lake Huguang Maar (Huguangyan), South China during the last 68 ka; implications for environmental and climatic change [J]. *Organic Geochemistry*, 2003, 34: 1497-1515.
- [22] Mingram J, Schettler G, Nowaczyk N, et al. The Huguang maar lake—a high-resolution record of palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes over the last 78 000 years from South China [J]. *Quaternary International*, 2004, 122: 85-107.
- [23] 刘强, 顾兆炎, 刘嘉麒, 等. 62 kaBP 以来湖光岩玛珉湖沉积物有机碳同位素记录及古气候环境意义[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2005, 25(2): 115-126. [LIU Qiang, GU Zhaoyan, LIU Jiaqi. Bulk organic carbon isotope record of Huguangyan maar lake, southeastern China and its paleoclimatic and paleoenvironmental significance since 62 kaBP [J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 2005, 25(2): 115-126.]
- [24] 吕厚远, 刘嘉麒, 储国强, 等. 末次冰期以来湛江湖光岩玛珉湖孢粉记录及古环境变化[J]. *古生物学报*, 2003, 42(2): 284-291. [LU Houyuan, LIU Jiaqi, CHU Guoqiang, et al. A study of pollen and environment in the Huguangyan maar lake since the last glaciations [J]. *Acta Palaeontologica Sinica*, 42 (2) :284-291.]
- [25] 刘嘉麒, 吕厚远, Negendank J, 等. 湖光岩玛珉湖全新世气候波动的周期性[J]. *科学通报*, 2000, 45 (11): 1190-1195. [LIU Jiaqi, LU Houyuan, Negendank J, et al. Periodicity of Holocene climatic variations in the Huguangyan Maar Lake [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(18): 1712-1717.]
- [26] 王文远, 刘嘉麒, Negendank J, 等. 热带湖光岩玛珉湖记录的末次冰消期东亚季风两部式的变化[J]. *科学通报*, 2000, 45 (8): 860-864. [WANG wenyuan, LIU Jiaqi, Negendank J, et al. The two-step monsoon changes of the last deglaciation recorded in tropical Maar Lake Huguangyan, southern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 45(16): 1529-1532.]
- [27] CHU Guoqiang, LIU Jiaqi, SUN Qing, et al. The Mediaeval Warm Period' drought recorded in Lake Huguangyan, tropical South China [J]. *The Holocene*, 2002, 12(5): 511-516.
- [28] 王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒, 等. 湖光岩玛珉湖高分辨率孢粉记录揭示的早全新世适宜期环境特征[J]. *科学通报*, 2007, 52 (11): 1285-1291. [WANG Shuyun, LU Houyuan, LIU Jiaqi, et al. The early Holocene optimum inferred from a high-resolution pollen record of Huguangyan Maar Lake in southern China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2007, 52 (20): 2829-2836.]
- [29] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon [J]. *Nature*, 2007, 445: 74-77.
- [30] Dean W E Jr. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition; Comparison with other methods [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1974, 44:242-248.
- [31] Heiri, O, Lotter, A F, Lemcke, G. Loss on ignition as a method for estimating organic and carbonate content in sediments; Reproducibility and compatibility of results [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2001, 25:101-110.
- [32] 张佳华, 孔昭宸, 杜乃秋. 烧失量数值波动对北京地区过去气候和环境的特征响应[J]. *生态学报*, 1998, 18(4): 343-347. [ZHANG Jiahua, KONG Zhaochen, DU Naiqiu. The response of loss-on-ignition range to past climate and environment in Beijing [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1998, 18(4): 343-347.]
- [33] Nesbitt H W, Wilson R E. Recent chemical-weathering of basalts [J]. *American Journal of Sciences*, 1992, 292: 740-777.
- [34] Weaver C E, Postassium. Illite and the Ocean [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1967, 31 (11): 2181-2196.
- [35] Nesbitt H W, Markovics G, Price R C. Chemical process affecting alkalis and alkaline earths during continental weathering [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1980, 44(11): 1659-1666.
- [36] 王文远. 中国南方湖光岩玛珉湖高分辨率的古气候记录[D]. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质研究所, 1998. [WANG Wenyuan. High-resolution paleoclimatic record in the Huguangyan Maar Lake in South China [D]. Dissertation for the Doctoral Degree. Beijing: Institute of Geology, CAS, 1998.]
- [37] 张国平. 广东湖光岩玛珉湖沉积物粒度特征及其所记录的二万年来古环境变迁[D]. 硕士学位论文. 北京: 中国科学院地质研究所, 1999. [ZHANG Guoping. Characteristics of the sediment particle sizes and their paleoenvironmental implications in the past 20 000 years in Huguangyan Maar Lake,

- Guangdong Province [D]. Master Thesis. Beijing: Institute of Geology, CAS, 1999.]
- [38] 王淑云. 广东湛江湖光岩玛珥湖 80 kaBP 以来孢粉记录及古植被、古气候变化研究[D]. 博士学位论文. 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所, 2007. [WANG Shuyun. Paleovegetation and paleoenvironment history recorded by pollen assemblages from Huguangyan Maar Lake, Southern China since the last 80 kaBP [D]. Dissertation for the Doctoral Degree. Beijing: Institute of Geology, CAS, 2007.]
- [39] 周新民, 陈图华. 我国东南沿海新生代玄武岩的成分和演化特征[J]. 地质学报, 1981(1): 29-40. [ZHOU Xinmin, CHEN Tuhua. Composition and evolution of Cenozoic basaltic rocks in southeastern coastal provinces of China [J]. Acta geologica Sinica, 1981(1): 29-40.]
- [40] Zhou Houyun, Wang Bo Shian, Guan Huazheng, et al. Constraints from strontium and neodymium isotopic ratios and trace elements on the sources of the sediments in Lake Huguang Maar [J]. Quaternary Research, 2009, 72: 289-300.
- [41] 韩玉林, 谈晓冬, 陈忠, 等. 湖光岩玛珥湖表层沉积物磁性粒度特征及其来源[J]. 科学通报, 2010, 55(3): 261-267. [HAN Yulin, TAN Xiaodong, CHEN Zhong, et al. Magnetic granulometry of recent sediments from the Huguang Maar and its implication for provenience [J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(4-5): 418-424.]
- [42] Zhou W J, Yu X F, Jull A J T, et al. High-resolution evidence from southern China of an early Holocene optimum and a mid-Holocene dry event during the past 18 000 years [J]. Quaternary Research, 2004, 62(1): 39-48.
- [43] Wang Pinxian. Global monsoon in a geological perspective [J]. Chinese Science Bulletin, 2009, 54(7): 1113-1136.
- [44] 黄静. 影响广东的热带气旋与 ENSO 的关系[J]. 气象, 2006, 32(9): 55-59. [HUANG J. Impact of ENSO on the tropical cyclones affecting Guangdong [J]. Meteorol Monthly, 2006, 32(9): 55-59.]
- [45] Moy C M, Seltzer G O, Rodbell D T, et al. Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial timescales during the Holocene epoch [J]. Nature, 2002, 420: 162-165.

HOLOCENE PALEOENVIRONMENTAL EVOLUTION OF THE HUGUANGYAN MAAR LAKE

WU Xudong^{1, 2}, SHEN Ji¹, WANG Yong¹

(1 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China)

(2 Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: LOI 550 °C (loss on ignition at 550 °C) and Ti, Al, Si, K intensities of the sediments from the Huguangyan Maar Lake were analyzed for reconstruction of the Holocene paleoenvironmental evolution. LOI mainly reflects the production changes within the drainage basin, whereas Ti, Al, Si, K mainly depend upon the runoff input of the drainage basin. During the period of 11 000~7 800 cal. aBP, the climate at the Huguangyan district was warm and wet. After 7 800 cal. aBP, it quickly became dry and cold. Though there were a series of climatic fluctuations since 7 800 cal. aBP, they were much weaker than those in the early Holocene. Millennial-scale Holocene paleoenvironmental evolution recorded by the sediments of the Huguangyan Maar Lake is consistent with other records in the Asia monsoon area; the climate was optimum in early Holocene, and became relatively colder and drier since the Mid-Holocene. The Mid-Holocene temperature falling reflected by the Huguangyan Maar Lake sediment was much bigger than that from other records in the Asia monsoon area, due to the differentiation of Holocene climatic evolution in different geographical locations. The Mid-late Holocene climatic evolution in the Huguangyan district may have some relationship with the El Niño system.

Key words: Holocene; paleoenvironment; loss on ignition; element intensity; the Huguangyan Maar Lake