

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

王淑云^① 吕厚远^① 刘嘉麒^① Jörg F. W. Negendank^②

(^① 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029; ^② GeoForschungsZentrum (GFZ), Section 3.3, Telegrafenberg, Potsdam D-14473, Germany. E-mail: wshy@mail.iggcas.ac.cn)

摘要 通过对广东湛江湖光岩玛珉湖 B 孔顶部 8~0.6 m 岩芯较高分辨率的孢粉分析, 揭示了该区全新世植被、气候变化的历史: 早全新世(约 11600~7800 cal a BP), 木本植物花粉含量为 56.0%, 其中热带木本植物花粉含量占优势, 最多的时期发生在 9500~8000 cal a BP 左右, 达到木本植物花粉的 60.2%, 反映气候温暖潮湿; 中全新世(7800~4200 cal a BP), 热带-亚热带植物花粉含量明显下降, 而草本植物和山地针叶植物花粉含量增加, 指示了中全新世温度下降; 晚全新世 4200 cal a BP 开始, 草本植物和山地针叶植物花粉明显增多, 揭示出晚全新世湖光岩地区温度、湿度明显下降。研究结果表明, 中国南方热带-亚热带地区高温湿润的全新世适宜期发生在早全新世(9500~8000 cal a BP), 与全球低纬地区全新世气候变化格局一致。初步认为, 全新世早期, 在岁差周期的控制下, 北半球较强的太阳辐射驱动了热带辐合带(ITCZ)和副热带锋面季风降水带同时向北推移, 造成中国热带低纬度地区早全新世最适宜期。湖光岩地区中晚全新世气候干旱趋势和气候波动除了与北半球夏季太阳辐射强度减弱有关外, 可能与该时期 ENSO 的活跃也有一定的联系。

关键词 全新世 最适宜期 孢粉分析 湖光岩玛珉湖

全新世适宜期不仅与中国古代文明的发展和演化关系密切, 而且对理解东亚季风区气候变化规律、预测未来气候演变趋势具有重要意义, 一直受到考古学、古气候学、全球变化等许多领域的关注和重视^[1~8]。早在 1972 年, 竺可桢^[1]通过对中国历史文献记录、考古学、物候学等证据的分析, 认为在距今约 5000~3100 a, 黄河中下游地区年均温度和冬季温度分别比现在高 2 和 3~5°C 左右, 之后气温逐渐下降; 后来, 施雅风等人^[2]根据大量的地质记录, 提出中国全新世大暖期(Holocene Megathermal Period)发生在约 8500~3000 a BP 期间, 其中最温暖湿润期出现在 7200~6000 a BP; 随着不同地区地质记录的增多和年代学的进展, 吴锡浩等人^[3,4]指出, 中国全新世温暖湿润期(季风降水)在空间上具有明显的穿时性, 自中国的东北、华北、长江中下游到华南地区, 温暖湿润期出现的时间逐渐滞后。

最近, 湖北山宝洞的石笋记录等揭示出夏季风信号在全新世早期就十分强盛, 到中全新世开始衰

退^[7,8], 与“中全新世大暖期”或“温暖湿润期的穿时性”模式^[3,4]并不吻合, 有必要深入探讨中国全新世大暖期时空分布特点。到目前为止, 无论是考古、历史文献资料, 还是高分辨率地质记录, 多数来自中国中部和北部地区, 南方低纬度地区具有可靠年代控制的高分辨率全新世环境记录并不多, 可能是产生上述不同认识的主要原因之一。本文通过对有可靠年代控制的广东湛江湖光岩玛珉湖全新世沉积物进行较高分辨率的孢粉分析, 试图探讨中国南方热带-亚热带地区全新世气候变化过程和气候最适宜期, 为深入理解东亚季风区全新世气候变化的过程和机制提供新的证据。

1 材料和方法

湖光岩玛珉湖(21°9'N, 110°17'E)位于广东省湛江市西南约 14 km (图 1(a)), 是雷琼火山区中一个典型的玛珉湖, 湖水面积约 2.3 km², 最大水深 20 m 左右。该地区位于亚热带-热带北部的气候过渡区, 受东南夏季风和西南夏季风的共同影响, 干湿季明

2007-01-10 收稿, 2007-05-15 接受

国家杰出青年科学基金(批准号: 40325002)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(批准号: KZCX3-SW-145 和 KZCX2-YW-117)、国家重点基础研究发展计划(编号: 2005CB422002-2)和国家自然科学基金重点项目(批准号: 40331011)资助

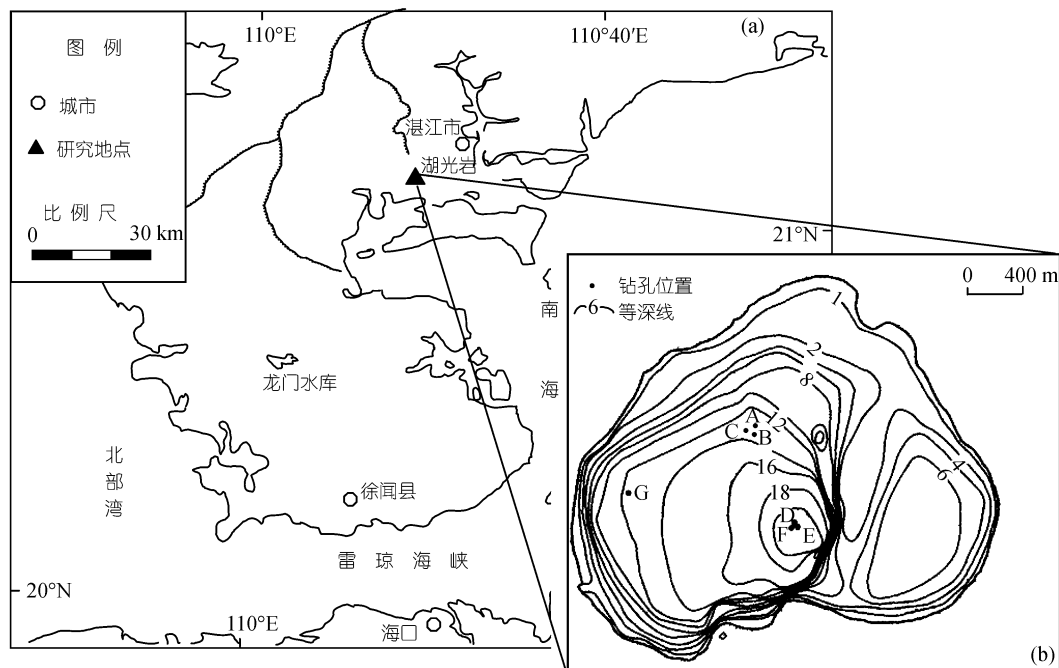


图1 湖光岩玛珥湖地理位置(a)、钻孔位置和等深线(b)

显。此外热带辐合带 (ITCZ) 对该区的影响也很明显, 常造成该区热带气旋增多, 降雨量增加 [9]。该区年平均温度为 22~23℃, 年平均降水量约 1600 mm。区域植被多为半常绿季雨林。

关于湖光岩玛珥湖沉积物的研究, 近年来发表了许多成果 [10~19]。本文研究的B孔水深 13.4 m(图 1(b)), 岩芯总长 23.7 m。利用 22 个AMS¹⁴C年龄 [13,15,17] (已利用CalPal软件<http://www.calpal.de>/校正为日历年, 其中 16 个年龄是利用植物种子和阔叶树的叶子分析获得)和 1 个火山灰年龄 [18]作为年龄控制点, 采用线性内插方法获得整个岩芯的年代序列, 与深度关系如图 2 所示。结果表明B孔岩芯年代跨度为 79~0.35 cal ka BP, 顶部 8~0.6 m年代为 13000~350 cal a BP。

此次研究对顶部 8~0.6 m岩芯以 10 cm间距分析孢粉样品 75 个, 样品分辨率约为 170 a。孢粉分析采用常规HF酸处理法 [13]。所有样品孢粉含量丰富, 60%以上的样品孢粉浓度达到 25 万粒/克。每个样品的孢粉统计数量 500~1000 粒, 同时对样品中盘星藻 (*Pediastrum*)的含量进行了统计。

2 结果

2.1 湖光岩玛珥湖 13000 cal a BP 以来典型孢粉类型

此次研究共鉴定出 150 多个孢粉类型, 根据生态

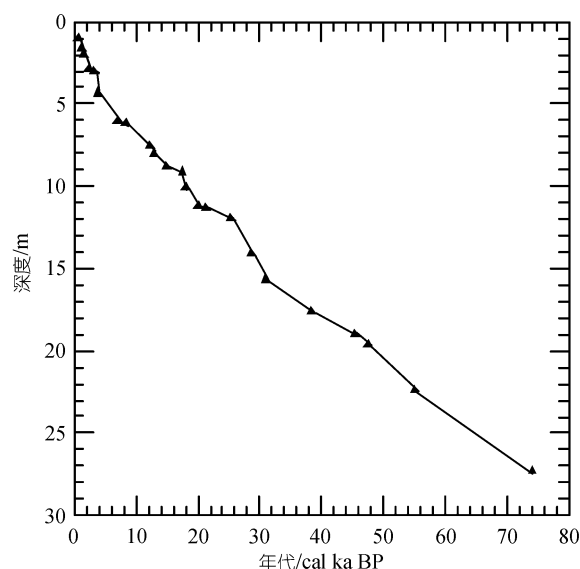


图2 湖光岩玛珥湖岩芯测年结果与深度的关系

类型, 将典型孢粉类型划分为 5 个组, 分别是: (i) 热带山地针叶乔木, 包括罗汉松(*Podocarpus*)、泪杉(*Dacrydium*); (ii) 热带低地或沟谷雨林的木本植物花粉类型, 常见有: 榕树属(*Ficus*)、杜英属(*Elaeocarpus*)、桑科(*Moraceae*)、野桐属(*Mallothus*)、叶下珠属(*Phyllanthus*)、山黄皮属(*Randia*)、老虎刺属(*Pterolobium*)、棕榈科(*Palmae*)、银柴属(*Aporosa*)、

大戟科(Euphorbiaceae)、山麻杆属(*Alchornea*)、黑面神属(*Breynia*)等; (iii) 亚热带常绿阔叶树花粉, 包括栲栎属(*Castanopsis-Lithocarpus*)、常绿栎属(*Quercus*) (< 25 μm)、蕁树属(*Altingia*)、枫香属(*Liquidambar*)、金缕梅科(Hamamelidaceae)、杨梅属(*Myrica*)、芸香科(Rutaceae)、冬青属(*Ilex*)、木犀科(Oleaceae)、漆树科(Anacardiaceae)、黄杞属(*Engelhardia*)等; (iv) 温带落叶乔木, 包括落叶栎属(*Quercus*) (>25 μm)、栗属(*Castanea*)、桦木属(*Betula*)、桤木属(*Alnus*)、鹅耳枥属(*Carpinus*)、胡桃属(*Juglans*)、榆(*Ulmus*)等; (v) 草本植物花粉, 以禾本科(Poaceae)、蒿属(*Artemisia*)、莎草科(Cyperaceae)为主, 含少量菊科(Compositae)、藜科(Chenopodiaceae)等. 此外还见有一些蕨类植物孢子.

2.2 孢粉组合特征

图 3 是主要孢粉类型的百分含量变化图式, 根据孢粉组合特征, 自下而上可划分为 4 个孢粉带:

P1 带(8.04~7.5 m, 13000~11600 cal a BP): 该阶段木本植物花粉占优势, 含量为 50.1%~63.8%, 平均含量为 59%, 以 *Quercus* (>25 μm) (17.4%~29.1%, 平均 24.1%, 下同), *Castanopsis-Lithocarpus* (5.9%~16.5%, 10.1%), *Castanea* (0.6%~10.7%, 6.4%), *Quercus* (<25 μm) (2.6%~8.1%, 5.8%) 等为主, 另外还含有 *Mallothus*, *Podocarpus*, *Altingia-Liquidambar*, *Elaeocarpus*, *Hamamelidaceae*, *Carya*, *Ulmus* 等植物花粉,

但含量均<1%; 草本植物花粉以 Poaceae 和 *Artemisia* 为主, 含量为 35.3%~49.7%, 平均含量为 40.6%.

P2 带(7.5~6.0 m, 11600~7800 cal a BP): 该带仍以乔灌木花粉占优势, 含量为 46.6%~72.2%, 平均 56.0%, 但其组合特征却明显改变, 以 Moraceae, *Mallothus*, *Ficus*, Palmae, Euphorbiaceae, *Elaeocarpus*, *Podocarpus*, *Dacrydium*, Anacardiaceae, *Aporosa* 等热带-亚热带植物花粉明显增加, *Quercus* (<25 μm), *Quercus* (>25 μm), *Castanea* 等大量减少为主要特征. 其中热带木本植物花粉含量占优势, 最高的时期发生在 9500~8000 cal a BP 左右(图 4), 达到木本植物花粉的 60.2%; 草本植物花粉以禾本科占优势, 含量一般在 30%左右.

P3 带(6.0~4.5 m, 7800~4200 cal a BP): 本阶段草本植物花粉含量增加, 期间呈现多次波动, 以 Poaceae 和 Cyperaceae 为主; 3 种不同生态类型的乔灌木植物花粉含量呈逐渐降低的趋势, 总的含量小于草本植物花粉, 但木本植物花粉仍保持相当的含量, 并且在 5600~4200 cal a BP 又有所增加. 本阶段热带山地针叶植物含量有一定的增加, 早期盘星藻属含量爆发性增多(图 4).

P4 带(4.5~0.6 m, 4200~350 cal a BP): 本带是沉积速率最快的一个时期. 草本植物花粉含量明显增加, 平均含量为 57.3%; 乔灌木植物花粉则继续表现

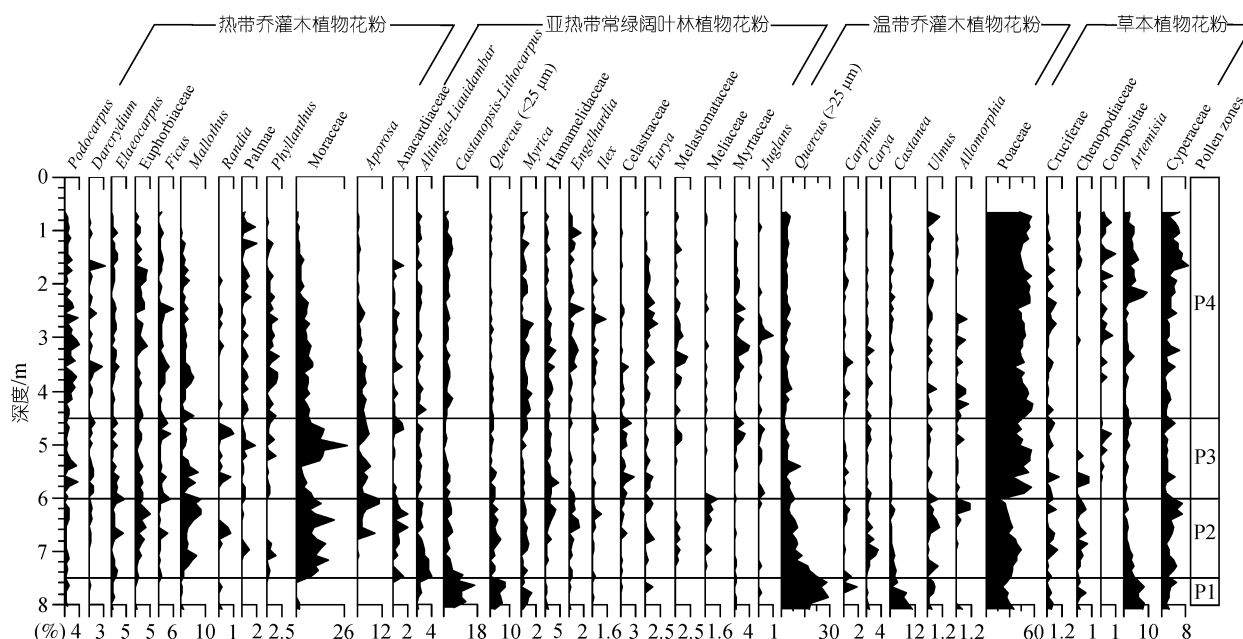


图 3 主要孢粉类型百分含量变化图式

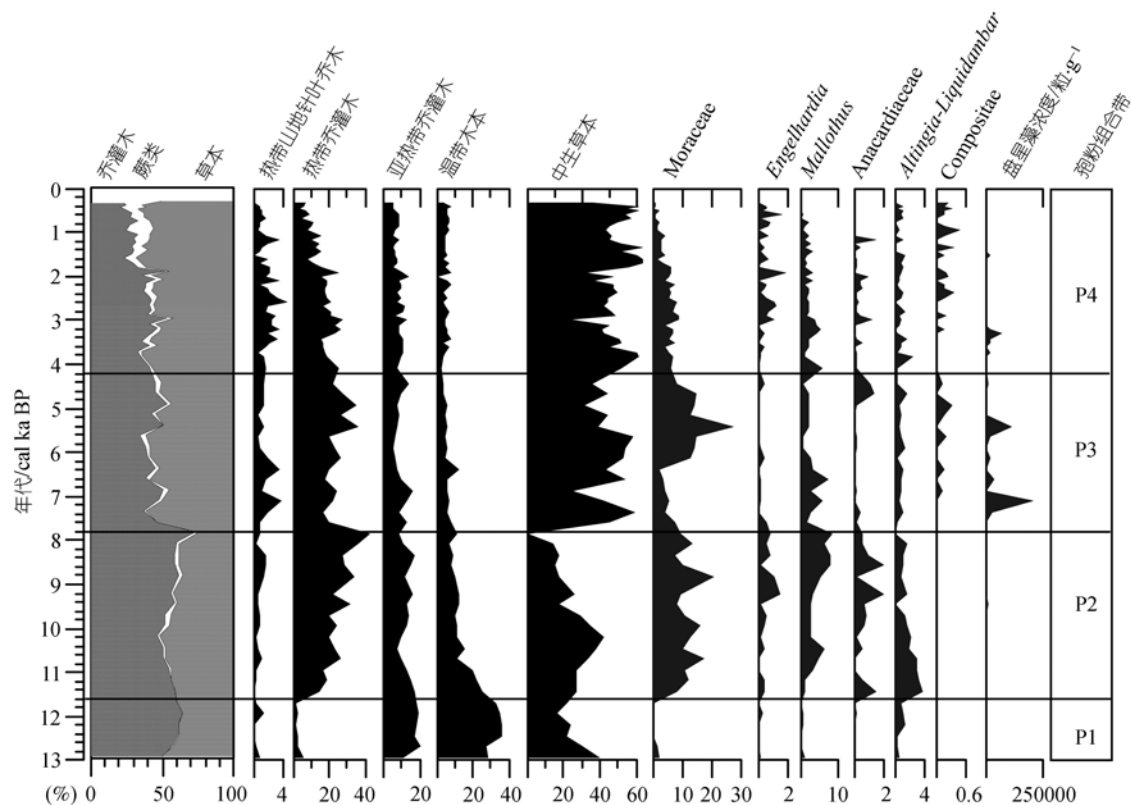


图4 湖光岩玛珥湖孢粉含量和盘星藻浓度变化

为降低的趋势。2000 cal a BP 以来, *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Compositae* 和蕨类植物孢子含量增加明显(图 3, 4)。

2.3 孢粉记录的生态和气候变化

从图 3 和 4 可以看出, 13000~11600 cal a BP 期间, 木本植物花粉稍占优势, 以亚热带和温带木本植物花粉为主, 其中落叶栎 *Quercus* (>25 μm) 含量最多, 表明在 13000~11600 cal a BP 期间湖光岩地区为相对凉湿的气候环境, 与同样位于华南地区的大湖泥炭剖面的研究结果 [8] 表现出一致性。从时间上看可能对应了 Younger Dryas (YD) 事件的发生期 [20], 但其表现形式却与高纬地区冷干的 YD 时期气候环境不同 [21]。

早全新世(11600~7800 cal a BP), 11600 cal a BP 过后, 热带-亚热带花粉含量迅速增加, 尤其是 *Moraceae*, *Mallothus*, *Elaeocarpus*, *Aporosa*, *Altingia-Liquidambar*, *Ficus*, *Anacardiaceae*, *Hamamelidaceae* 等增加明显(图 3, 4), 并在 9500~8000 cal a BP 达到最高含量。其中 *Moraceae*, *Mallothus*, *Ficus* 和 *Aporosa* 等多为热带季雨林或沟谷雨林的常见种类, 适应在终年炎热湿润的地区生长 [13,22], 热带花粉含

量增加表明早全新世湖光岩地区温度高, 降水量相对较大, 揭示了温暖湿润的气候环境。该段时期 TOC 值表现为全新世以来的最高峰 [14], $\delta^{13}\text{C}_{\text{TOC}}$ 值为一低值 [16], 可能反映了适宜的暖湿气候条件有利于热带季雨林 [13] 的生长和大量有机质的输入。

中全新世(7800~4200 cal a BP): 该时期热带-亚热带植物花粉含量明显下降, 山地针叶植物花粉 (*Podocarpus* 和 *Dacrydium*) 含量增加, 一些层位出现了铁杉属 (*Tsuga*), 草本植物花粉含量呈快速增加的趋势。 *Podocarpus* 和 *Dacrydium* 一般分布在南方海拔 400~1600 m 的山地雨林中 [23], *Tsuga* 是典型山地针叶树植物 [13], 这些属的含量变化表明中全新世温度下降的趋势。

根据盘星藻生态习性和指示意义 [24,25], 7800 cal a BP 以后盘星藻含量急剧增加可能说明当时湖光岩地区湖面水位变浅; 同时出现少量反映气候相对干旱的 *Compositae* (图 4), 可能指示了在中全新世气温下降的过程中, 湿度也相对降低。

4200 cal a BP 开始, 草本类的禾本科花粉明显增多, 显示在湖光岩地区林下或湖岸边草本植被发育

的特点. 特别是在 2000 cal a BP 以后, *Artemisia*, *Chenopodiaceae*, *Compositae* 和 *Pinus* 含量明显增加, 山地雨林针叶植物花粉含量增多, 揭示了晚全新世湖光岩地区温度、湿度明显下降的过程. 蕨类孢子在后期明显增加, 除了气候变化的因素外, 与人类砍伐森林和农业活动也不无关系 [15].

3 讨论

全新世大暖期 (Megathermal), 又被称为气候最适宜期 (Climatic Optimum) [4] 或者是高温期 (Hypsithermal) [26], 在中国相关文献中更多的使用全新世大暖期一词. 尽管全新世气候变化在世界不同地区有区域性差别 [26-29], 但低纬度季风区全新世降水的变化显示了较好的一致性. 在印度西南部地区, 夏季风自 11 ka BP 前后加强, 季风降水增多 [30]. 西亚和非洲东部也表现出相似的气候变化规律 [31]. 中国江西定南地区的泥炭记录显示早全新世气候温暖湿润, 为全新世最适宜期 [8]. 湖光岩花粉记录揭示中国低纬度热带地区具有相同的早全新世气候最温暖期, 中全新世开始季风衰退、气候变干的变化过程, 与亚洲季风区记录 [7,8,29,30,32-34] 显示的全新世期间气候变化格局是一致的.

陈发虎等人 [35] 最近提出了亚洲季风区全新世气候变化模式, 认为亚洲季风区全新世期间具有大同小异的气候变化格局, 即末次冰期后, 季风快速加强, 早全新世季风强盛、随后季风衰退, 中全新世季风变弱, 气候变干. 位于季风区低纬度的湖光岩花粉记录的气候变化过程与陈发虎总结的季风模式是吻合的.

实际上, 吴锡浩等人 [3], An 等人 [4] 在讨论中国全新世适宜期穿时性规律时, 首先定义了全新世适宜期是指有效湿度最大出现的时期, 以有利于当地植被繁茂的温度和湿度的最佳配置为标准, 以副热带北侧锋面季风降水带的迁移为线索, 很大程度上解释了中国东部全新世气候环境变化空间过程是季风锋面随太阳辐射季节性变化进退或持续的现象.

但在热带低纬度地区, 更多的降水来自热带辐合带 (ITCZ) 及与之相关的雨带的贡献 [9], 在近 20 ka 岁差周期的控制下, 10 ka BP 前后, 北半球夏季所接受的太阳辐射比现在多 8% [36]. 由于当时北半球夏季更加温暖, 大陆、特别是南亚大陆受热导致大陆低压发展, 印度次大陆、西亚和北非的季风强度远强于现在, 当时的热带辐合带 (ITCZ) 及与之相关的雨带显著向北移动 [29,37], 使热带低纬度地区降水显著增加,

并且随太阳辐射的变化 (图 5(d)) 达到水热同期, 由此形成了湖光岩地区早全新世最佳的温暖湿润期. 中国东部季风区, 全新世早期, 在岁差周期的控制下, 北半球较强的太阳辐射可能驱动了热带辐合带 (ITCZ) 和副热带北侧锋面季风降水带同时向北推移, 导致 10000~8000 a BP 在中国东北高纬度地区 [3] 和广东湛江低纬度地区同时形成了全新世的最适宜期.

在中国大部分地区, 中全新世一直以来被作为全新世气候最适宜期, 气候温暖湿润. 但湖光岩玛珣湖的孢粉记录 (图 3, 4, 5(a)) 及磁化率等指标 [19] 显示湖光岩地区 7800 cal a BP 以后冬季风加强, 气温下降, 可能伴随着湿度降低, 与华南地区的大湖泥炭剖面 [8]、董歌洞石笋记录 [32] 以及热带-亚热带地区的一些亚洲、非洲环境记录表现出的中全新世干旱趋势一致 [38,39] (图 5(b)).

湖光岩玛珣湖的孢粉记录显示在 4200 cal a BP 以来气候明显趋于干旱. 湖光岩地处亚热带低纬度区, 受 ENSO 活动的影响明显, 厄尔尼诺年登陆的热带气旋和台风减少 [40], 太平洋西岸低纬度地区气候干旱 [41], 由此这一时期内湖光岩气候波动可能与厄尔尼诺-南方涛动 (ENSO) 加强有关. 已有研究表明晚全新世以来与厄尔尼诺相似的气候事件明显增强 [42,43] (图 5(c)), 并且距湖光岩仅一峡之隔的海南岛记录 [5] 也显示 2700 a BP 左右气候模式的改变可能和 ENSO 有关. 这说明晚全新世以来华南地区的气候变化和这个时期 ENSO 系统的活跃存在着一定的联系. 当然气候变化过程可能没有这么简单, 特别是对大量来自中国中纬度地区不同气候记录的解释 [44], 需要做更深入的工作, 从年代学、记录的分辨率、环境指标的意义、特别是温度、湿度 (降水) 在不同时间尺度上的匹配关系以及气候模拟等多方面进行印证, 期望更真实地了解全新世气候变化的过程和规律.

4 结论

综上所述, 可以得出以下结论:

(i) 广东湛江湖光岩玛珣湖孢粉记录表明该区早全新世升温迅速, 达到最佳的水热配比, 是全新世最适宜期, 而中晚全新世开始气候逐渐干旱, 这与以往认识的中全新世气候最适宜期和华南地区晚全新世季风降水最大的模式并不吻合.

(ii) 在解释热带低纬度的古气候变化时, 除了传统考虑的东亚季风和印度季风的影响外, 热带辐合带 (ITCZ) 的迁移是一个不可忽视的重要的影响因

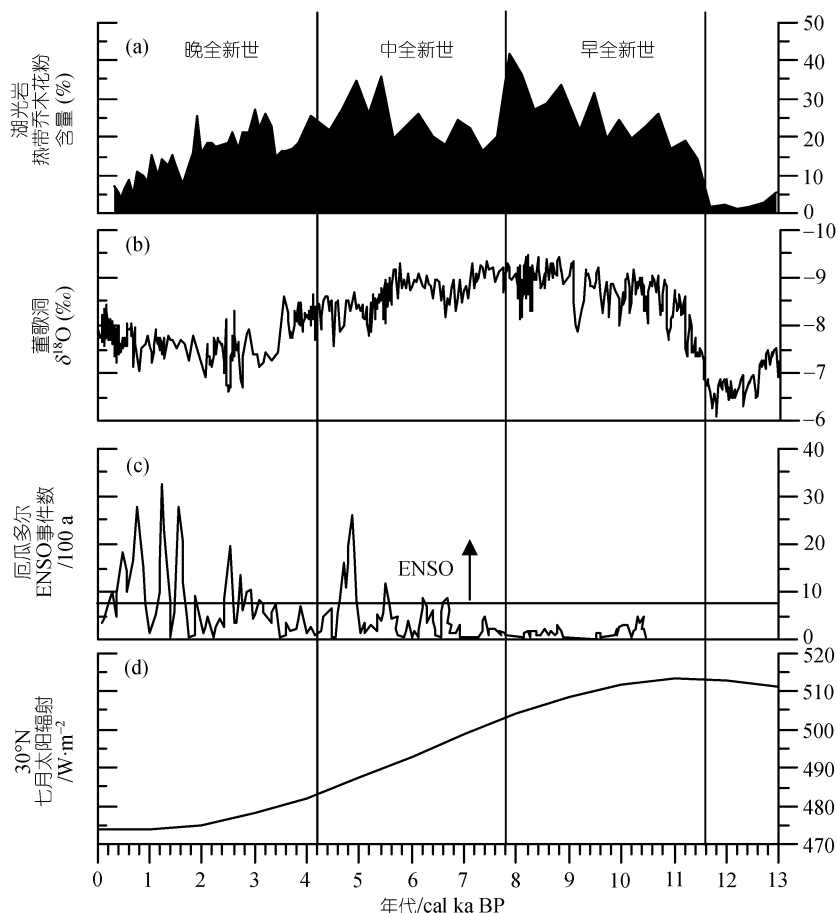


图5 全新世以来湖光岩B孔孢粉记录同其他记录的对比

(a) 湖光岩热带木本植物花粉含量; (b) 董歌洞石笋氧同位素记录^[32]; (c) 厄瓜多尔南部湖泊纹层记录的千年尺度的 ENSO 变率^[43]; (d) 30°N 七月太阳辐射变化

素。在全新世早期,在岁差周期的控制下,中国热带低纬度地区受热带辐合带(ITCZ)的影响形成了全新世的最适宜期。

(iii) 湖光岩地区中晚全新世的气候干旱趋势和气候波动除了与北半球夏季太阳辐射强度减弱的变化有关外,可能和这个时期 ENSO 的活跃存在着一定的联系。

致谢 感谢储国强、王文远、骆祥君和 Jens Mingram, Georg Schettler 博士对本项工作的帮助。

参 考 文 献

- 1 竺可桢. 中国近五千年来气候变迁的初步研究. 考古学报, 1972, (1): 15—38
- 2 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. 中国科学 B 辑, 1992, 22 (12): 1300—1308
- 3 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. 第四纪研究, 1994, (1): 24—37
- 4 An Z S, Porter S C, Kutzbach J E, et al. Asynchronous Holocene optimum of the East Asian monsoon. Quat Sci Rev, 2000, 19 (8): 743—762[DOI]
- 5 郑卓, 王建华, 王斌, 等. 海南岛双池玛珥湖全新世高分辨率环境记录. 科学通报, 2003, 48 (3): 282—286
- 6 Huang C C, Zhou J, Pang J L, et al. A regional aridity phase and its possible cultural impact during the Holocene Magathermal in the Guanzhong Basin, China. Holocene, 2000, 10 (1): 135—142[DOI]
- 7 邵晓华, 汪永进, 程海, 等. 全新世季风气候演化与干旱事件的湖北神农架石笋记录. 科学通报, 2006, 51 (1): 80—86
- 8 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 18000 years. Quat Res, 2004, 62 (1): 39—48[DOI]
- 9 杨彩福, 焦新龙, 彭灿. 热带辐合带与南海气候. 海洋通报, 2003, 22 (6): 83—87
- 10 王文远, 刘嘉麒, Negendank J, 等. 热带湖光岩玛珥湖记录的末

- 次冰消期东亚夏季风两步式的变化. 科学通报, 2000, 45 (8): 861—864
- 11 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
- 12 Chu G Q, Liu J Q, Sun Q, et al. The 'Mediaeval Warm Period' drought recorded in Lake Huguangyan, tropical South China. Holocene, 2002, 12 (5): 511—516[DOI]
- 13 吕厚远, 刘嘉麒, 储国强, 等. 末次冰期以来湛江湖光岩玛珥湖孢粉记录及古环境变化. 古生物学报, 2003, 42(2): 284—291
- 14 Fuhrmann A, Mingram J, Lücke 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. Org Geochem, 2003, 34(11): 1497—1515[DOI]
- 15 Mingram J, Schettler G, Nowaczyk N R, et al. The Huguang Maar Lake—A high-resolution record of palaeoenvironmental and palaeoclimatic changes over the last 78000 years from South China. Quat Int, 2004, 122(1): 85—107[DOI]
- 16 刘强, 顾兆炎, 刘嘉麒, 等. 62 ka BP 以来湖光岩玛珥湖沉积物有机碳同位素记录及古气候环境意义. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 115—126
- 17 王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒. 我国中低纬度末次冰消期气候转暖与高纬度气候变化的关系. 第四纪研究, 2006, 26(2): 283—292
- 18 郭正府, 刘嘉麒, 储国强. 湖光岩玛珥湖火山灰的成分及其来源. 第四纪研究, 2002, 22(3): 266—272
- 19 Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. Nature, 2007, 445: 74—77[DOI]
- 20 Wang Y J, Cheng H, Edwards R L, et al. A high-resolution absolute-dated late Pleistocene monsoon record from Hulu Cave, China. Science, 2001, 294: 2345—2348[DOI]
- 21 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. Glob Planet Change, 2005, 46(1-4): 255—279[DOI]
- 22 于革, 韩辉友. 海南岛表土花粉和热带植被模拟研究. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(3): 103—112
- 23 王伏雄, 钱南芬, 张玉龙, 等. 中国植物花粉形态. 第二版. 北京: 科学出版社, 1995. 31—32
- 24 孙湘君, 吴玉书. 云南滇池表层沉积物中花粉与藻类的分布规律及数量特征. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7 (4): 81—92
- 25 张华, 郑卓, 王建华, 等. 海南岛近 2500 a 来盘星藻记录的周期性气候变化. 热带地理, 2004, 24(2): 109—123
- 26 余克服, 陈特固, 钟晋梁, 等. 雷州半岛全新世高温期珊瑚生长所揭示的环境突变事件. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2002, 32 (2): 149—156
- 27 Xiao J L, Wu J T, Si B, et al. Holocene climate changes in the monsoon/arid transition reflected by carbon concentration in Daihai Lake of Inner Mongolia. Holocene, 2006, 16(4): 551—560[DOI]
- 28 Gasse F. Hydrological changes in the African tropics since the last glacial maximum. Quat Sci Rev, 2000, 19: 189—211[DOI]
- 29 Fleitmann D, Burns S J, Mudelsee M, et al. Holocene forcing of the Indian Monsoon recorded in a stalagmite from Southern Oman. Science, 2003, 300: 1737—1739[DOI]
- 30 Elise Van Campo. Monsoon fluctuations in two 20000-Yr BP Oxygen-isotope/pollen records off southwest India. Quat Res, 1986, 26(3): 376—388[DOI]
- 31 张兰生, 方修琦, 任国玉. 全球变化. 北京: 高等教育出版社, 2000. 180—183
- 32 Dykoski C A, Edwards R L, Cheng H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave, China. Earth Planet Sci Lett, 2005, 233(1-2): 71—86[DOI]
- 33 Hong Y T, Hong B, Lin Q H, et al. Inverse phase oscillations between the East Asian and Indian Ocean summer monsoons during the last 12000 years and paleo-El Niño. Earth Planet Sci Lett, 2005, 231(3-4): 337—346[DOI]
- 34 Gupta A K, Anderson D M, Overpeck J T. Abrupt changes in the Asian southwest monsoon during the Holocene and their links to the North Atlantic Ocean. Nature, 2003, 421: 354—357[DOI]
- 35 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. 第四纪研究, 2006, 26(6): 881—887
- 36 Wright Jr H E, Kutzbach J, Webb III E T, et al. Global climates since the last glacial maximum. Minneapolis: University of Minnesota Press, 1993. 468—513
- 37 Hastenrath S, Greischar L. Circulation mechanisms related to northeast Brazil rainfall anomalies. J Geophys Res, 1993, 98: 5093—5102
- 38 Guo Z T, Petit-Maire N, Kropelin S. Holocene non-orbital climatic events in present-day arid areas of northern Africa and China. Glob Planet Change, 2000, 26: 97—103[DOI]
- 39 Gasse F, Van Campo E. Abrupt post-glacial climate events in West Asia and North Africa monsoon domains. Earth Planet Sci Lett, 1994, 126: 435—456[DOI]
- 40 黄静. 影响广东的热带气旋与 ENSO 的关系. 气象, 2006, 32 (9): 55—59
- 41 刘锦绣, 施能. 1948~2003 年热带地区降水气候特征与变化. 南京气象学院学报, 2006, 29 (5): 627—634
- 42 Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the Intertropical Convergence Zone through the Holocene. Science, 2001, 293: 1304—1308[DOI]
- 43 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. Nature, 2002, 420: 162—165[DOI]
- 44 An C B, Feng Z D, Barton L. Dry or humid? Mid-Holocene humidity changes in arid and semi-arid China. Quat Sci Rev, 2006, 25(3-4): 351—361[DOI]