# 雷州半岛南部湖相沉积揭示的全新世早中期 气候环境演变

汤文坤, 王 永, 董 进, 田 飞, 刘 瑾, 江 南 TANG Wenkun, WANG Yong, DONG Jin, TIAN Fei, LIU Jin, JIANG Nan

中国地质科学院地质研究所,北京100037

Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China

摘要:对雷州半岛南部徐闻县九亩村一段1.54m厚的湖相沉积剖面进行粒度、磁化率、色度及有机碳氮分析,结合AMS"C测年结果,重建了该地区10.5~6.5cal ka BP的气候环境变化。共分为3个阶段:①10.5~9.5cal ka BP,湖泊水体较浅,气候较干燥;②9.5~7.2cal ka BP,湖泊水位较高,环境稳定,气候较湿润;③7.2~6.5cal ka BP,湖水相对变浅,气候相对阶段②干燥。雷州半岛地区降水变化与印度季风演变模式一致,可与北半球夏季平均太阳辐射及其影响下热带辐合带(ITCZ)的移动进行对比,指标时间序列的红外噪声谱分析结果表明,存在千年—百年的准周期,反映了研究区气候环境变化对太阳活动的响应。

关键词:雷州半岛;全新世早中期;环境变化

中图分类号:P534.63<sup>+</sup>2 文献标志码:A 文章编号:1671-2552(2017)09-1625-10

Tang W K, Wang Y, Dong J, Tian F, Liu J, Jiang N. Early-Middle Holocene paleoenvironmental evolution revealed by a lacustrine sediment sequence in Leizhou Peninsula. *Geological Bulletin of China*, 2017, 36(9):1625–1634

**Abstract:** This study presents the record of paleoenvironmental evolution results from a radiocarbon—dated 1.54m—long lacustrine sediment sequence in south Leizhou Peninsula. Measurement of grain size, magnetic susceptibility (MS), total nitrogen (TN), total organic carbon (TOC), atomic TOC/TN (C/N) and color reflectance values was carried out in order to reconstruct the climate spanning the interval 10.5~6.5cal ka BP. Three distinct stages can be identified as follows: ①10.5~6.5 cal ka BP, a shallow lake level and relatively dry climate dominated this area. ②The interval from 9.5~7.2cal ka BP was characterized by a relatively high lake level and humid climate. ③During 7.2~6.5cal ka BP, lake level was relatively shallow with a relatively dry climate. Indian monsoon was more responsible for precipitation variability in this area, which was interconnected with average monthly solar radiation in summer and ITCZ migration. Red noise spectrum analysis of proxies shows centennial to millennia time scale cycles, which suggests that the environmental evolution was probably sensitive to the secular solar activity.

Key words: Leizhou Peninsula; Early-Middle Holocene; paleoenvironmental evolution

受太阳辐射变化等影响,全新世气候变化存在周期性波动[1-3]。作为与人类活动联系最密切的时期,全新世高分辨率的古气候环境及其变化机制研究,有助于了解未来全球变化趋势,现已成为当前研究的热点。中低纬度地区的厄尔尼诺-南

方涛动(ENSO)和亚洲季风(AM)在亚非地区的降水乃至全球气候变化中扮演了重要角色[4-6]。研究表明,中全新世ENSO活动性很弱,到晚期ENSO活动性逐渐增强[7-10]。亚洲季风主要包括东亚季风和印度季风2个单元,对于不同尺度两者的变化关系

仍存在争议。

中国南方热带全新世研究在海南双池玛珥湖<sup>[11-15]</sup>、湛江湖光岩玛珥湖<sup>[16-26]</sup>、沿岸珊瑚礁<sup>[27-28]</sup>,以及南海<sup>[29-30]</sup>等地区做了大量的工作,在气候环境演变、海平面变化、海水温度重建等方面取得了诸多研究成果,但全新世以来的环境演化过程及其机制还存在不同的认识。受东亚季风和印度季风的共同影响,雷州半岛全新世以来湖相沉积发育,但其南部全新世缺乏高分辨率的研究资料。湖泊沉积具有连续性好、储存信息量大、沉积速度快、时间分辨率高等优点,在古气候研究中具有重要地位<sup>[31]</sup>。本文以雷州半岛南部湖相沉积物为载体,通过粒度、磁化率、色度、总有机碳、总氮含量等指标探讨该地区早中全新世以来的气候环境演变,为中国热带地区全新世气候研究提供资料。

# 1 研究区概况与分析方法

#### 1.1 研究区概况

研究区位于雷州半岛南部徐闻县境内(图1-

a、b),属热带-亚热带季风气候区,年平均气温约23℃,年平均降水约1400mm,集中于5~10月(图2),多雷阵雨和暴雨。主要植被类型为热带季雨林<sup>[33]</sup>。

剖面地点位于九亩村东侧约200m(北纬20°22′8.54″、东经110°01′58.90″),海拔高度约5m,表层覆有约5cm的耕植土。研究区基岩主要为玄武质火山岩<sup>[34]</sup>。全新世以来海平面在该地区的最高变幅为2~3m<sup>[27-28]</sup>,因此认为剖面未受到海平面变化的影响。

#### 1.2 分析方法

去除表层耕作层后,人工挖掘深1.54m的湖相 沉积剖面(JM剖面)(图1-c),从顶部开始以2cm 间隔连续采样77个,同时用边长为2cm 的标准古 地磁塑料方盒采集古地磁样品。室内对样品的粒 度、色度、总有机碳(TOC)、总氮(TN)指标进行分 析测试。

粒度分析按照常规方法进行<sup>[35]</sup>,去除有机质和碳酸盐,加入分散剂震荡后,采用英国 Malvern 公司的 Mastersizer 2000型激光粒度仪测试,测试范围为0.02~2000μm。磁化率测试使用英国 Bartington 公

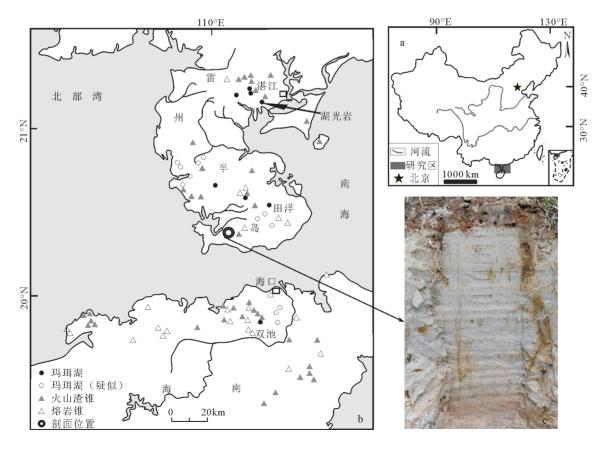


图 1 研究区位置(a)、剖面位置(b,据参考文献[26]修改)和剖面照片(c)

Fig. 1 Location of the study area (a), location of JM section (b) and photo of JM section (c)

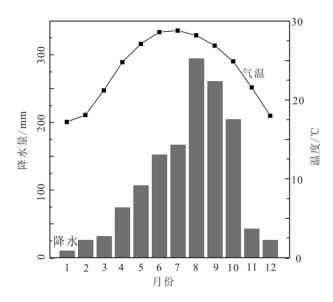


图 2 徐闻月平均气温与降水图(1981—2010年)[32]

Fig. 2 Mean monthly temperature and precipitation in Xuwen County during AD1981–2010

司生产的 MS2 型高低频磁化率测量仪测量样品的低频磁化率,通过计算得到其质量磁化率。样品干燥研磨后,采用柯尼卡美能达公司 CM-700D 分光测色计测试色度指标。研磨样品加酸后冲洗至中性,冷冻干燥后称量 15~20mg 样品于锡杯中,采用意大利 Costech 公司生产的元素分析仪 (Costech 4024)进行总有机碳和总氮含量测试。

# 2 分析结果

#### 2.1 地层与年代

JM剖面自上而下可分为8层(图3):0~10cm,灰白色粉砂,与上覆耕作层界线清楚,无层理,顶部含有现代植物根系和细粒炭屑;10~48cm,青灰色含粘土粉砂,水平层理发育;48~56cm,浅棕色粘土质粉砂,略具水平层理;56~90cm,杂色含粘土粉砂,层理略显水平;90~114cm,杂色含粘土粉砂,无层理;114~148cm,浅红棕色粘土质粉砂;148~152cm,青灰色砂质粘土质粉砂;152~154cm,灰褐色砂质粘土质粉砂(未见底)。

选取剖面中4个样品送至美国Beta实验室进行<sup>14</sup>C年代测定,应用OxCal4.2软件采用IntCal13校准曲线<sup>[56]</sup>对测年结果进行校正,测年及校正结果见表1。应用基于R语言的Bacon包<sup>[57]</sup>构建JM剖面的年龄-深度模型(图3),采用的计算方法为区间

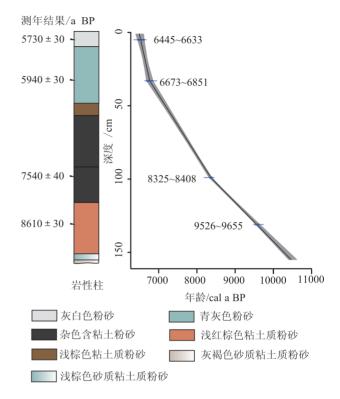


图3 JM剖面沉积年龄与深度对应关系

Fig. 3 Relationship between age and depth for JM section

线性差值。根据 <sup>14</sup>C测年结果, JM 剖面校正后年龄范围为 10.5~6.5cal ka BP, JM 剖面 0~32cm 沉积速率为 0.12cm/a, 33~98cm 为 0.04cm/a, 98~154cm 为 0.03cm/a。剖面平均沉积速率为 0.04cm/a。

# 2.2 粒度组分及参数

JM剖面粒径以粉砂为主,最低含量为44.62%,最高含量为91.87%,平均含量达82.44%;粘土含量范围为7.05%~37.78%,平均含量为13.90%;砂含量

表 1 JM 剖面沉积物 <sup>14</sup>C 测年结果
Table 1 AMS radiocarbon dates for JM section

样品编号	实验室编号	深度/cm	测年材料	¹4C年龄/a BP	校正年龄/cal a BP
13jm-3	Beta-416459	5~6	沉积物	5730±30	6445~6633
13jm-27	Beta-434636	53~54	沉积物	5940±30	6673~6851
13jm-50	Beta-434638	99~100	沉积物	7540±40	8325~8408
13jm-66	Beta-416461	131~132	沉积物	8610±30	9526~9655

变化范围为 0~26.65%, 平均含量为 3.66%。平均粒径(Mz)变化范围为 4.70~6.86 Φ, 变化幅度小;标准偏差(σ)变化范围为 1.19~2.63, 分选性差;偏度(SK)变化范围为-0.50~1.92, 除底部少部分样品为负偏外, 其余都是正偏, 偏幅较大, 沉积物粒径趋向粗粒。尖度(K)变化范围为 2.06~7.34, 变化范围较大, 尖度很尖-极尖。

根据剖面不同深度各级粒径含量及粒径参数的变化(图4),将剖面自下而上分为4段。

154~130cm,粘土、极细粉砂、粗粉砂含量为剖面的最高值,细粉砂和中粉砂含量为剖面中低值且总体呈上升趋势,砂质组分含量为1.13%~30.82%,砂质组分存在较大幅度的波动,但总体向上粒级趋向细粒。中值粒径和平均粒径均呈现大幅度的波

动。标准偏差为剖面高值段,平均可达 1.85,偏度由负偏转向正偏,呈增大趋势, 尖度为剖面低值。粒径频率分布曲线基 本呈现出双峰,但变化较大。在136~ 132cm处极细砂和细砂组分含量的突然 增加,使得其他各粒度组分含量和粒径参 数突变,如粘土、细粉砂等含量突然降低, 粗粉砂含量、标准偏差突然升高。

130~107cm,粘土、极细粉砂含量为剖面中的相对高值且向上呈下降趋势,细粉

砂在130~116cm 呈稳定高值,之后迅速下降,中粉砂和粗粉砂含量较低且向上呈增加趋势,无砂质组分的存在。平均粒径和中值粒径向上趋向粗粒,频率曲线为单峰,正偏,尖度逐渐增加至剖面最大,最高可达7.34,标准偏差逐渐降低。

107~53cm,以细粉砂和中粉砂含量为主,各组分含量相对稳定,无显著波动,无砂质组分段。中值和平均粒径无明显变化,频率曲线为单峰,偏度和尖度逐渐降低,标准偏差较稳定。

53~0cm,以中粉砂为主,平均含量达34.8%,细粉砂含量有增加趋势,粗粉砂含量相应减少,出现砂质组分段,各砂质组分近同步变化,该段粘土和粉砂质组分存在较大波动。中值粒径和平均粒径

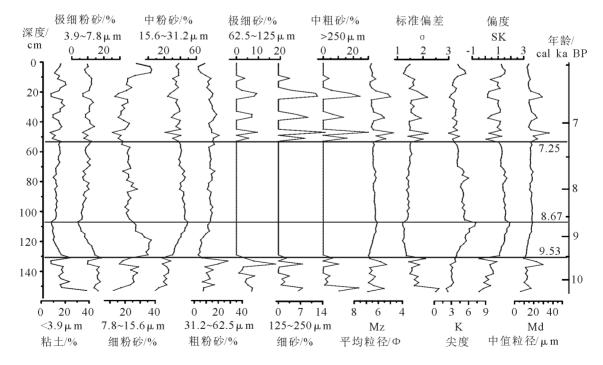


图 4 JM剖面粒度组分及粒度参数

Fig. 4 Grain size composition and parameter of JM section

呈下降趋势,偏度、标准偏差和尖度整体与107~53cm阶段变化一致,但因砂质组分的波动变化,使得频率曲线由单峰变为双峰,标准偏差突然增大,偏度突然降低。

#### 2.3 TOC, TN, TOC/TN和磁化率、色度

JM剖面TOC和TN含量均较低。TOC含量的变化范围为0.18%~0.55%,平均值为0.29%;TN含量小于0.10%,变化范围为0.036%~0.087%,平均值为0.054%;两者在JM剖面中的变幅不大,约10cm处向上含量明显增加。TOC/TN值变化范围为3.7~7.9,平均值为5.5。

质量磁化率  $(10^{-8} \text{m}^3/\text{kg})$  变化范围为  $0.91 \sim 19.43$ ,以 130 cm 和 53 cm 为界,自下而上分为明显的高-低-高值3段,平均值分别为 9.54 、2.78 和 6.90。

亮度L\*变化范围为71.5~84.7,95~125cm为最高值段,平均高达83.47,至上呈"阶梯式"下降;红度 a\* 变化范围为0.08~8.45; 黄度 b\*变化范围为10.04~22.13,两者变化相似,均呈现出先增后减少的变化趋势。130~150cm 色度值存在近"V"形的大幅波动,在135cm左右L\*值达到剖面最低,a\*和b\*值为剖面最高。

# 3 讨论

# 3.1 各指标的环境指示意义

湖泊沉积物的粒度分布蕴含运输动力和沉积 环境变化的信息,碎屑物质入湖主要来自水力和 (或)风力搬运[35,41-44]。对于湖面有较大波动的湖相 沉积,粗颗粒含量的增加代表低水位时的干旱气 候条件,反之则代表高水位的湿润气候条件。而 当湖面相对稳定时,湖相沉积物主要受控于入湖 径流量及其强度,常受降雨及集水区植被状况的 控制[45-47]。IM 剖面粒度组分反映了湖面变化引起 的水动力变化,粗粒指示了较低湖面,有效降水较 少。湖泊磁性矿物来源一般认为以外源为主,其代表 的环境意义需要结合其他指标综合判定[13,23,48]。IM 剖面湖泊沉积物磁化率与砂质组分正相关(r=0.523, P<0.01, n=77),与标准偏差呈现出同步变化趋势 (r=0.695, P<0.01, n=77),表明当湖泊水面较低时, 湖泊水动力较强,带来大量较粗颗粒组分,沉积物 分选差,磁化率高。即磁化率高值反映有效降水较 少的干旱气候条件。

沉积物L\*主要受碳酸盐、有机质、硅藻含量等影

响<sup>[49-52]</sup>。JM剖面沉积物的碳酸盐含量极低,无法用气量法测试,可忽略其对 L\*的影响,剖面 L\*值与TOC 无显著相关性,这可能与剖面碳含量过低有关。剖面含有较丰富的硅藻,镜下硅藻个体为 20~40  $\mu$  m, L\*与 20~40  $\mu$  m 粒级含量呈显著正相关(r=0.533,P<0.01,n=77),与磁化率呈显著负相关(r=0.617,P<0.01,n=77),推测JM剖面 L\*主要受硅藻含量的影响,高值指示较好的水热条件,适宜硅藻生长;a\*和 b\*具有显著的强正相关(r=0.924,P<0.01,n=77),研究中常用 a\*指示环境变化信息,a\*主要与沉积物中磁铁矿、针铁矿等主要致色矿物的含量有关,能够反映沉积时的氧化还原条件<sup>[48-52]</sup>,当水深较浅时,湖底处于相对氧化的环境,a\*具有较高值。

湖泊 TOC来源包括内源和外源,沉积环境对有机质的保存能力对其影响显著,JM剖面低 TOC含量类似于双池玛珥湖底部 12~7.2ka BP的测试结果<sup>[12]</sup>,这可能是因为湖底处于相对氧化的环境,有机质沉积后被大量分解,难以保存。JM剖面 TOC和TN呈现显著正相关性(r=0.504,P<0.01,n=77),剖面 TOC/TN值变化范围为 3.7~7.9,平均为 5.5,一般低等植物的碳氮比小于 10,硅藻为 5.5~7.0<sup>[54-55]</sup>,表明沉积物中有机质主要来自水生藻类,TOC含量反映了湖泊生产力的变化。

# 3.2 剖面的环境记录

根据剖面的各个指标变化(图5),自下而上可以分为3个变化阶段。

第一阶段,154~130cm(10426~9527cal a BP),粘 土含量为相对高值且呈降低趋势,粉砂含量为相对 低值,呈上升趋势,平均含量71%,砂含量波动较大 且向上粒径减小,频率曲线呈双峰且变化较大,均 指示了较强的水动力环境。a\*值为剖面中的最高 段,代表当时为相对氧化的环境,可能是因为较浅 的水体环境。磁化率值剖面最高,呈现减少的趋 势,表明整体有效降水较少,但有效降水呈增加的 趋势。亮度L\*平均值为75,为剖面中的低值,TOC 含量为相对低值段,有增加的趋势,平均值为 0.25%,湖泊生产力较低,气候条件较差。综上表 明,本阶段湖泊水深较浅,气候较干燥,有效降水 较少,但有向湿润方向发展的趋势。该时期可对 应周缘多个地区的环境记录,如湖光岩玛珥湖叶 绿素a、磁化率等指标呈现季风降水增强期的低值 段,相对干燥[18-19,23],海南双池玛珥湖记录的该时期

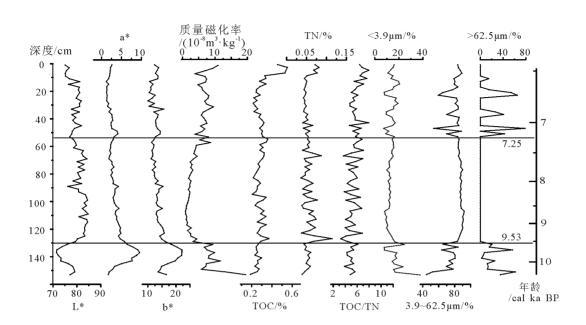


图 5 JM剖面色度、质量磁化率、TOC、TN及粒度组分 Fig. 5 Color reflectance values, magnetic susceptibility, total organic carbon (TOC) total nitrogen (TN), atomic TOC/ TN(C/N) and grain size composition of JM section

为降水相对较多的气温回升期[11-13],雷州半岛下录地区泥炭孢粉指示早全新世以来的降水逐渐增加[56],福建盆地钻孔孢粉揭示的9cal ka BP之前为降水增加期[57],云南西北部的天才湖粒度等指标指示10ka BP左右气候偏干[58]。

第二阶段,130~53cm(9527~7250cal a BP),各指标总体较为稳定。粘土平均含量12.47%,为相对低值,粉砂含量87.63%,为剖面的高值段,无砂质粗粒组分,频率曲线单峰且稳定,反映较弱的水动力和稳定的沉积环境。磁化率值为剖面低值段,有效降水较多。L\*值为剖面的高值段,平均达81.74,TOC平均含量为0.29%,为相对高值段,该阶段硅藻较丰富,指示湖泊水热条件较好,生产力较高。推测该时期湖泊水位较高,环境稳定,气候较湿润,有效降水较多。这种相对湿润的气候环境在中国南方有多处记录,福州盆地钻孔孢粉数据指示在9~7.5calka BP为暖湿的气候条件[57],与湖光岩地区[18-19]和亚洲季风区的石笋[3.59-60]揭示的强降水记录一致,天才湖在8.7~7.2calka BP指示气候最湿润[58]。

第三阶段,53~1cm(7250~6495cal a BP),粘土含量平均值为13.98%,有增加趋势,粉砂平均含量79.53%,较上一段略有降低,砂含量呈波动变化,粒

径参数延续上阶段变化,含砂质组分频率曲线都呈 现出较一致的双峰类型,总体反映较强的水动力条 件,沉积环境相对稳定。磁化率值较第二阶段增 加,为相对高值,表明有效降水相对上阶段减少。a\* 值为剖面最低,且有降低的趋势,表明氧化条件不 断减弱。L\*值相对上阶段较低,TOC含量在20cm 之前是下降趋势,20cm到顶部呈快速上升的趋势, 顶部的高值可能受到耕植的影响,不能准确反映环 境变化信息,总体上该段湖泊水热条件较上阶段 差,生产力低,推测本阶段湖泊水深相对上一阶段 变浅,有效降水相对降低。该阶段的气候环境变化 可能代表了中国南方全新世中期以来的气候干燥 期,如天才湖粒度指示7.2~2.7ka BP降水偏少,气 候干旱[8],湖光岩玛珥湖孢粉研究表明在7.8~ 4.2ka BP温度湿度呈现降低趋势[16],基于南方石笋 氧同位素重建的湿润指数也呈现下降的趋势[6]。

总之,JM剖面磁化率、粒度等指标指示 10.5~6.5ka BP雷州半岛南部干-湿-干的变化格局,与中国南方地区的环境记录一致,但在起止转换时间上存在一定的差异。干湿变化主要受温度和降水的控制,进而反映季风的变化趋势。剖面 L\*整体上以109cm(8740cal a BP)为界呈现出先增后减的变化趋

势, 而以 107cm(8665cal a BP) 为界, 粒度组分、粒径 参数及磁化率发生了较明显的转折变化,向上标准 偏差逐渐增加,粉砂含量逐渐降低,磁化率则缓慢 增加.反映有效降水在8.7cal ka BP 开始可能呈现 缓慢降低趋势(图6-a、b)。湖光岩玛珥湖磁化 率,叶绿素a等反映季风强弱变化的指标也表现 出相似的变化<sup>[19]</sup>(图6-c、d),表明整个雷州半岛地 区全新世早中期的气候整体呈同步变化。最近研 究表明,中国南方地区石笋δ¹8O变化可能并不能反 映东亚季风演变,而是受西南季风降雨的影响[62-63], 通过对研究剖面和湖光岩玛珥湖的气候指标与董歌 洞[59]和阿曼石笋[59]的δ[8O记录对比,可以看出其 变化趋势近乎一致(图6-a~f),因此雷州半岛全新 世早中期的气候变化可能主要受印度季风的影 响。另外,贵州茂兰石笋[6]、古里雅冰心[6]记录的 约 8.27ka BP 的降温事件(Bond 事件 5),以及 6.7~ 7.2cal ka BP之间雷州半岛珊瑚所揭示的高频率、短 尺度的"雷州事件"[66],在IM剖面指标上并没有明显 的表现,其中L\*和TOC在8.2cal ka BP左右的低值 期,可能与"8.2ka事件"相对应。

#### 3.3 气候变化的驱动

剖面磁化率指标揭示的有效降水变化与北纬 20°夏季平均太阳辐射变化整体一致,即在全新世 早期呈增加趋势,9ka BP 左右达到最大值,之后逐 渐减小[67-68](图 6-b、h)。北半球夏季太阳辐射的 增加会使热带辐合带(ITCZ)位置向北移动,而一 般ITCZ北移会导致北半球热带地区季风降雨增 加[17-18,69]。研究区气候环境在全新世早中期的变 化趋势同 Cariaco 盆地中 Ti 含量所指示的 ITCZ 移 动相一致,即全新世早期ITCZ向北移动,雷州半 岛地区降水呈现增加的趋势,在8~9ka BP之后 ITCZ呈现向南移动的趋势,雷州半岛地区的降水 也随之减少(图6-a~d、h)。用 redfit 方法[70]对剖面 指标的时间序列进行红色噪声谱分析(图7),其 中L\*存在3个明显的周期:2597a,862a,112a(95% 置信度),在其他指标分析中还发现了1298a, 259a,105a周期。这些千年一百年的周期变化虽 然与石笋[3]、泥炭[71]、湖泊[21]、海洋[72]中记录的1450a, 1150a, 250a, 206a, 102/84a 等周期存在差异, 但总体 上反映太阳活动变化。

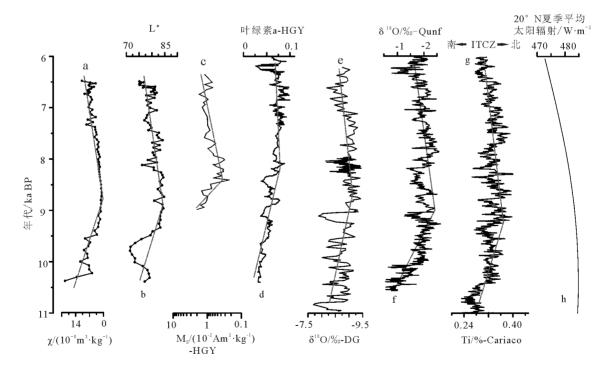


图 6 不同区域指标综合对比图

Fig. 6 Comprehensive comparison of proxies in different areas a—剖面磁化率;b—剖面亮度;c—湖光岩玛珥湖饱和磁化强度<sup>[19]</sup>;d—湖光岩玛珥湖叶绿素 a 吸收<sup>[18]</sup>;e—董哥洞石笋 δ <sup>18</sup>O<sup>[60]</sup>;f—Oman 南部 Qunf cave 石笋 δ <sup>18</sup>O 指示 ISM 变化<sup>[50]</sup>;g—Cariaco 盆地 Ti 含量指示的 ITCZ 的移动(高值指示向北移动)<sup>[60]</sup>;h—20°N 夏季平均太阳辐射<sup>[68]</sup>

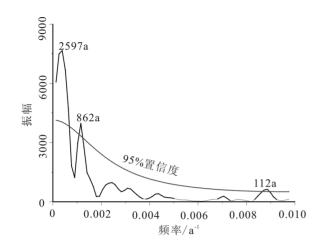


图7 JM剖面亮度时间序列红色噪声谱分析 Fig. 7 Red noise spectrum analysis of L\* in JM section

# 4 结 论

雷州半岛东南部徐闻九亩村东 1.54m 深的湖相 沉积剖面能够反映该地区 10.5~6.5ka BP 的气候环 境变化。通过对粒度、磁化率、色度和有机碳氮指 标分析,得出以下结论。

- (1)剖面粒度和磁化率指示沉积动力变化,进而代表了有效降水的变化,结合色度和有机碳氮指标,表明在9.5cal ka BP之前,湖泊水体较浅,气候较干燥;9.5~7.2cal ka BP,水体环境稳定,气候较湿润;7.2cal ka BP之后,水面下降,气候变干。
- (2)剖面磁化率等指标反映研究区降水先增加后缓慢降低的变化趋势。综合湖光岩等地区的研究资料,雷州半岛在全新世早一中期的气候变化主要受印度季风的影响。研究剖面对快速气候变化事件表现不明显。
- (3)雷州半岛气候与北半球夏季太阳辐射及其影响下的ITCZ位置移动同步变化,对剖面各指标时间序列的周期分析表明存在2597a,862a,1298a,259a,112a,105a周期,总体反映研究区气候环境变化受太阳活动的影响。

致谢:感谢中国地质科学院水文地质环境地质研究所杨劲松助理研究员在野外工作中给予的帮助,感谢中国地质科学院地质研究所袁路朋研究实习员在实验过程中给予的帮助。

#### 参考文献

[1]Bond G, Showers W, Cheseby M, et al. A Pervasive Millennial-

- Scale Cycle in North Atlantic Holocene and Glacial Climates[J]. Inorganic Chemistry, 1997, 278:1257–1266.
- [2]Bond G, Bonani G. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene[J]. Science, 2001, 294:2130–2136.
- [3]Wang Y, 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.
- [4]Judson W. Partin et al, Millennial—scale trends in west Pacific warm pool hydrology since the Last Glacial Maximum[J].Nature, 2007,449: 452–456
- [5]Kerr R A. The tropics return to the climate system[J]. Science, 2001, 292: 660–661.
- [6]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 12 000 years and paleo—El Niño[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2005, 231(3):337–346.
- [7]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.
- [8]Chen S, Hoffmann S S, Lund D C, et al, A high–resolution speleothem record of western equatorial Pacific rainfall: Implications for Holocene ENSO evolution[J]. Earth and Planetary Science Letters, 2016, (442): 61–71.
- [9]Rodbell D T, Newman J H. An ~15,000-Year Record of El Niño-Driven Alluviation in Southwestern Ecuador[J]. Science, 1999, 283: 516-520.
- [10]闻新宇, 王绍武, 朱锦红. 古 ENSO 的研究进展[J]. 地球物理学报, 2007, 50(2):387-396.
- [11]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纪录[I]. 科学通报, 2003, 48(3):282-286.
- [12]白雁, 刘春莲, 郑卓,等. 海南岛双池玛珥湖沉积中的碳、氮地球化学记录及其环境意义[J]. 古地理学报, 2003, 5(1):87-93.
- [13]罗攀, 郑卓, 杨小强. 海南岛双池玛珥湖全新世磁化率及其环境意义[]]. 热带地理, 2006, 26(3):211-217.
- [14]张华, 郑卓, 王建华,等. 海南岛近 2500a 来盘星藻记录的周期性 气候变化[J]. 热带地理, 2004, 24(2):109-112.
- [15]Yang X, Wei G, Yang J, et al. Paleoenvironmental shifts and precipitation variations recorded in tropical maar lake sediments during the Holocene in Southern China[J]. Holocene, 2014, 24(10):1216–1225.
- [16]王淑云, 吕厚远, 刘嘉麒,等. 湖光岩玛珥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.
- [17] Yancheva G, Nowaczyk N R, Mingram J, et al. Influence of the intertropical convergence zone on the East Asian monsoon. [J]. Nature, 2007, 445(7123):74–77.
- [18]Wu X, Zhang Z, Xu X, et al. Asian summer monsoonal variations during the Holocene revealed by Huguangyan maar lake sediment record[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2012, 323(1):13–21.

- [19]Duan Z, Liu Q, Yang X, et al. Magnetism of the Huguangyan Maar Lake sediments, Southeast China and its paleoenvironmental implications[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 2013, 395(1):158–167.
- [20]Jia G, Bai Y, Yang X, et al. Biogeochemical evidence of Holocene East Asian summer and winter monsoon variability from a tropical maar lake in southern China[J]. Quaternary Science Reviews, 2015, 111:51-61.
- [21]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.
- [22]吴旭东, 沈吉, 汪勇. 湖光岩玛珥湖沉积物反映的全新世以来古 环境演化[[]. 海洋地质与第四纪地质, 2011, (4):155-162.
- [23]吴旭东, 沈吉, 汪勇. 广东湛江湖光岩玛珥湖全新世磁化率变化 特征及其环境意义[J]. 热带地理, 2011, 31(4):346-352.
- [24] 巩伟明, 张朝晖. 湖光岩玛珥湖全新世时期沉积物碳氮同位素组成的环境指示意义[]]. 高校地质学报, 2014, (4):582-589.
- [25] 匡欢传, 周浩达, 胡建芳,等. 末次盛冰期和全新世大暖期湖光岩 玛珥湖沉积记录的正构烷烃和单体稳定碳同位素分布特征及其 古植被意义[J]. 第四纪研究, 2013, 33(6):1222-1233.
- [26]Fuhrmanna 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[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34 (11):1497–1515.
- [27]余克服,钟晋梁,赵建新,等. 雷州半岛珊瑚礁生物地貌带与全新世多期相对高海平面[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2002, 22(2): 27-33
- [28]时小军, 余克服, 陈特固,等. 中一晚全新世高海平面的琼海珊瑚礁记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008, 28(5):1-9.
- [29]Huang J, Li A, Wan S. Sensitive grain—size records of Holocene East Asian summer monsoon in sediments of northern South China Sea slope[J]. Quaternary Research, 2011, 75(3):734–744.
- [30]Yan H, Sun L, Shao D, et al. Seawater temperature seasonality in the South China Sea during the late Holocene derived from highresolution Sr/Ca ratios of Tridacna gigas[J]. Quaternary Research, 2015, 83(2):298–306.
- [31]沈吉. 湖泊沉积研究的历史进展与展望[J]. 湖泊科学, 2009, 21 (3):307-313.
- [32]中国地面累年值月值数据集(1981—2010年)[EB/OL](2012-08-28)[2016-05-26]中国气象数据网. http://data.cma.cn.
- [33]Zheng Z, Lei Z Q. A 400000 year record of vegetational and climatic changes from a volcanic basin, Leizhou Peninsula, southern China[J]. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 1999, 145(4):339–362.
- [34]陈俊仁, 姚伯初, 吴能友. 湛江田洋玛珥湖的形成与演化[J]. 广东 地质, 2002, 17(1):12-18.
- [35]Peng Y, Xiao J, 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 & Planetary Science Letters, 2005, 233(3/4):467-479.

- [36]Reimer P J, Bard E, Bayliss A, et al. Selection and Treatment of Data for Radiocarbon Calibration: An Update to the International Calibration (IntCal) Criteria[J]. Radiocarbon, 2013, 55(4):1923– 1945
- [37]Blaauw M, Christen J A. Flexible paleoclimate age-depth models using an autoregressive gamma process[J]. Bayesian Analysis, 2011, 3 (6): 457–474.
- [38] Wentworth C K. A scale of grade and class terms for clastic sediments[J]. Journal of Geology, 1922, 30(5):377–392.
- [39] 黄思静. 用 EXCEL 计算沉积物粒度分布参数[J]. 成都理工学院 学报, 1999, 26(2): 98-100.
- [40]Folk R L, Ward W C. Brazos River bar [Texas]: a study in the significance of grain size parameters[J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1):3–26.
- [41]Xiao J, Fan J, Zhou L, et al. A model for linking grain—size component to lake level status of a modern clastic lake[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2013, 355(12):149–158.
- [42]Xiao J L, Fan J W, Zhai D Y, et al. Testing the model for linking-grain—size component to lake level status of modern clastic lakes[J]. Quaternary International, 2015, 355: 34–43.
- [43] Vandenberghe J. Grain size of fine—grained windblown sediment: A powerful proxy for process identification[J]. Earth—Science Reviews, 2013, 121(6):18–30.
- [44]孙千里,周杰,肖举乐. 岱海沉积物粒度特征及其古环境意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2001, 21(1): 93-95.
- [45] Chen J A, Wan G J, Tang D G. Recent climate changes recorded by sediment grain sizes and isotopes in Erhai Lake[J]. Progress in Natural Science, 2000, 10(1):54–61.
- [46]Xu H, Zhou X, Lan J, et al. Late Holocene Indian summer monsoon variations recorded at Lake Erhai, Southwestern China[J]. Quaternary Research, 2015, 83(2):307–314.
- [47]陈敬安, 万国江, 张峰, 等. 不同时间尺度下的湖泊沉积物环境记录——以沉积物粒度为例 [J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(6): 563-568.
- [48]王心源, 吴立, 张广胜,等. 安徽巢湖全新世湖泊沉积物磁化率与 粒度组合的变化特征及其环境意义[J]. 地理科学, 2008, 28(4): 548-553.
- [49]田庆春,杨太保,石培宏,等. 可可西里BDQ0608钻孔沉积物色度 环境意义及其影响因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2012, 32 (1): 133-140.
- [50]吴艳宏,李世杰. 湖泊沉积物色度在短尺度古气候研究中的应用[J]. 地球科学进展, 2004,19(5): 789-792.
- [51]吴健, 沈吉. 兴凯湖沉积物磁化率和色度反映的28ka BP以来区域 古气候环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, (3):123-131.
- [52]王永, 姚培毅, 迟振卿,等. 内蒙古浩来呼热湖泊沉积物色度记录的末次冰消期以来的环境演变[C]//全国古地理学及沉积学学术会议. 2012.
- [53]Ji J, Shen J, Balsam W, et al. Asian monsoon oscillations in the northeastern Qinghai Tibet Plateau since the late glacial as interpreted from visible reflectance of Qinghai Lake sediments[J]. Earth

- & Planetary Science Letters, 2005, 233(1):61-70.
- [54] Meyers P A, Lallier-Vergès E. Lacustrine sedimentary organicmatter records of late Quaternary paleoclimates [J]. Journal of Paleolimnology, 1999, 21: 345–372.
- [55]李军. 藏北高原湖泊表层沉积物有机碳、碳氮比以及有机碳同位素特征及其环境意义[D]. 兰州大学硕士学位论文, 2014.
- [56]Xue J, Zhong W, Xie L, et al. Vegetation responses to the last glacial and early Holocene environmental changes in the northern Leizhou Peninsula, south China[J]. Quaternary Research, 2015, 84(2): 223–231.
- [57]Yue Y, Zheng Z, Rolett B V, et al. Holocene vegetation, environment and anthropogenic influence in the Fuzhou Basin, southeast China[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2015, 99:85 94.
- [58]韩艳, 肖霞云, 羊向东,等. 全新世以来滇西北地区天才湖粒度特征及古降水[]]. 第四纪研究, 2011, 31(6):999-1010.
- [59]Fleitmann D, Matter A. Holocene Forcing of the Indian Monsoon Recorded in a Stalagmite from Southern Oman[J]. Science, 2003, 300(5626):1737–1739.
- [60]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[J]. Earth & Planetary Science Letters, 2005, 233(s1 - 2):71-86.
- [61]Zhang J, Chen F, Holmes J A, et al. Holocene monsoon climate documented by oxygen and carbon isotopes from lake sediments and peat bogs in China: a review and synthesis[J]. Quaternary Science Reviews, 2011, 30(15/16):1973–1987.
- [62] Chen F, Chen X, Chen J, 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.

- [63]Liu J, Chen J, Zhang X, et al. Holocene East Asian summer monsoon records in northern China and their inconsistency with Chinese stalagmite  $\delta$  <sup>18</sup>O records[J]. Earth– Science Reviews, 2015, 148:194–208.
- [64] 覃嘉铭, 袁道先, 程海,等. 新仙女木及全新世早中期气候突变事件:贵州茂兰石笋氧同位素记录术[J]. 中国科学, 2004, 34(1):69-74
- [65]王宁练, 姚檀栋, Thompson L G,等. 全新世早期强降温事件的古里雅冰芯记录证据[]. 科学通报, 2002, 47(11):818-823.
- [66]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[J]. 中国科学, 2002, 32(2):149-156.
- [67] Members C. Climatic Changes of the Last 18000 Years: Observations and Model Simulations[J]. Science, 1988, 241(4869):1043– 1052
- [68]Laskar J, Robutel P, Joutel F, et al. A long-term numerical solution for the insolation quantities of the Earth[J]. Photographic Science & Photochemistry, 2004, 428(1):101-106.
- [69]Haug G H, Hughen K A, Sigman D M, et al. Southward migration of the intertropical convergence zone through the Holocene.[J]. Science, 2001, 293(5533):1304–1308.
- [70]Schulz M, Mudelsee M. REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series[J]. Computer & Geoscience, 2002, 28: 421–426.
- [71] 薛积彬, 钟巍, 彭晓莹,等. 南岭东部大湖泥炭沉积记录的古气候[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5):105-113.
- [72]Wang L, Sarnthein M, Erlenkeuser H, et al. East Asian monsoon climate during the Late Pleistocene: high-resolution sediment records from the South China Sea[J]. Marine Geology, 1999, 156(1/ 4): 245-284.