

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2021031603

西沙群岛东岛湖泊沉积记录的近 1 000 年来 热带降雨与人类活动历史

张玲, 杨小强, 商圣潭, 张庭伟, 李冠华, 阮骄杨

中山大学地球科学与工程学院, 珠海 519000

摘要:近 1000 年来区域气候变化模式的研究,是在人类活动与自然变率双重影响因素之下,正确预测和评估未来气候变化趋势的基石。众多的气候载体和代用指标,揭示了热带海洋和季风变化等对中国不同地区气候的影响,但是关于热带区域的降雨特征与季风活动的关系仍然未有清晰的答案。本文选择西沙群岛东岛的牛塘湖泊,以湖泊沉积物的粒度组份含量和环境磁学参数为替代指标,探讨公元 1000—1700 年热带区域降雨变化规律及岛礁上记载的人类活动历史。结果表明,东岛的降雨受 ENSO 活动和热带辐合带移动的双重影响,ENSO 的频繁活动和热带辐合带向南回撤均会促使热带区域降雨的增多,这一变化与季风气候呈现反向模式。岛上人类活动强盛时期发生在南宋和明代晚期,该时期区域降雨较多,气候湿润。同时,公元 1000—1200 年和 1450—1600 年在中国北方发生的两次强沙尘暴事件,在西沙群岛也有相应的记录,反映了北方粉尘物质在空气中长距离运移和沉降的模式。

关键词:热带降雨;人类活动;粉尘记录;东岛湖泊

中图分类号:P532 **文献标识码:**A

Tropical rainfall variations and human activities of last 1 000 years recorded by lake deposits on the Dongdao Island, Xisha Islands

ZHANG Ling, YANG Xiaoqiang, SHANG Shengtian, ZHANG Tingwei, LI Guanhua, RUAN Jiaoyang

Department of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519000, Guangdong, China.

Abstract: A series of paleoclimate researches have been made in the South China Sea for the past 1000 years, that provided the insights to the understanding of regional climate change pattern and served as the basis to predict and evaluate the future trends of climate change under the joint actions of the human and the nature. Numerous natural archives and proxies are adopted to reveal the climate changes in different regions of China influenced by monsoon and tropical ocean processes. However, due to the lack of high-resolution climate records, our knowledge about the link between precipitation patterns and monsoon variability remains incomplete, particularly in the tropical region. In order to study the rainfall patterns and the history of anthropogenic activities in tropical zones during the time of AD 1000—1700, we studied such proxies as grain-size distribution and magnetic parameters collected from the sediments of the Cattle Pond on the Dongdao Island of the Xisha Islands. The results show that the precipitation on the Dongdao Island is mainly influenced by ENSO activities and the movements of the Intertropical Convergence Zone. Both of the factors will increase rainfall in the study area, which is opposed to the pattern of the Monsoon system. Human activities on the island were vigorous during the Southern Song Dynasty and the Late Ming Dynasty when the climate is humid and rich in rainfall. There are two periods characterized by sandstorms occurred in northern China during the time of AD 1000—1200 and AD 1450—1600 respectively in the Xisha Islands, reflecting the long-distance migration and precipitation of dust by air.

Key words: tropical rainfall; human activity; dust record; Dongdao lake

在有人类历史记载以来,气候变化模式与人类活动的相互作用备受关注。比如最受人们关注的中世纪暖期和小冰期等时期的温度和水文变化,无

数科学家已进行了大量的研究,但在区域空间变化特征和动力机制等方面,目前仍然是国内外学者讨论的焦点^[1-3]。已有的研究表明,热带辐合带的南北

资助项目:广东省重点基金项目“晚更新世以来南海南部深层洋流演化特征”(2018B030311064);中山大学科研培育专项项目“典型岛礁三维地质结构构建及其地质灾害评估”

作者简介:张玲(1994—)女,硕士研究生,主要从事第四纪地质与环境研究, E-mail: zhangl248@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:杨小强(1972—)男,教授,博士,主要从事古地磁学和第四纪地质研究, E-mail: cesyxq@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2021-03-16; **改回日期:**2021-04-13. 文凤英编辑

移动^[4-5]、海陆热力差异^[6]和 ENSO 活动的强弱^[7]等, 是影响亚洲季风区和热带区域千年以来不同降雨格局的主要因素^[7-9], 但亚洲季风动力学复杂的控制过程和多变的内在机制使得上述观点仍存在争议, 尤其是类厄尔尼诺和类拉尼娜现象对中国北方、南方、东南亚和西太平洋等不同区域降雨时空模式的影响存在诸多的不确定性^[6-7,10-12]。

历史时期, 这些不同的气候条件直接影响了区域的生态系统、农业发展、人口密度、人口迁徙和文明演变^[13-16]; 而另外一方面, 在某些情况下, 强烈的人类活动也可能会影响环境的变化, 导致水土流失、土地荒漠化^[17-19]以及沙尘暴频发等恶劣气候的出现^[20]。虽然区域内气候变化与人类活动关系的探究已屡见不鲜, 但二者之间的响应在宏观地理尺度上的联系仍知之甚少。

本文选择西沙群岛的东岛牛塘湖泊近 1 000 年以来的沉积物, 以珊瑚砂粒度组分含量和环境磁学参数为替代指标, 讨论热带区域百年时间尺度的降雨变化和可能的人类活动历史, 并通过对比中国北

方近千年以来的强沙尘暴记录, 探讨中国北方粉尘事件传输至低纬度区域的可能性及其区域气候响应特征。

1 研究材料与方法

1.1 采样位置与样品描述

东岛 (16°39'~16°41'N、12°43'~112°45'E) 位于西沙群岛东部(图 1), 是一长椭圆形的热带珊瑚岛屿, 发育在独立的礁盘上, 大约形成于全新世晚期, 海拔 3~6 m。东岛四周高, 中间低, 其东、南、西部均被沙堤包围, 沙堤高约 6 m; 沙堤之内是平坦的盆地, 海拔约 3 m。牛塘是东岛内部一个长约 120 m、最宽约 20 m 的淡水湖, 位于岛的西南侧, 距离海边的沙堤约 120 m^[21]。

2018 年在牛塘湖泊的东南部以重力活塞取样的方式钻取了 3 条长约 80 cm 的钻孔(图 1), 编号分别为 DD、DD-1 和 DD-2, 本文主要研究钻孔 DD-1。

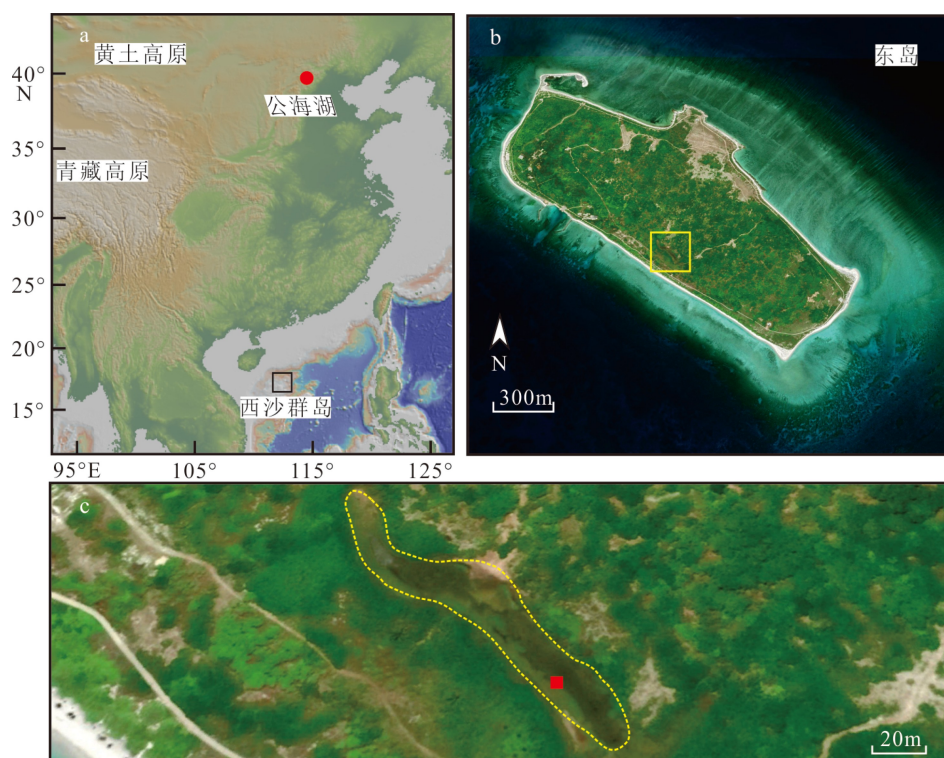


图 1 西沙群岛、采样钻孔及公海湖位置

a. 西沙群岛以及公海湖的位置(黑色方框为西沙群岛的位置, 红色圆点为公海湖的位置); b. 东岛的位置(黄色方框为牛塘湖泊的位置); c. 钻孔位置(黄色虚线为牛塘湖泊大体边界, 红色方块为钻孔位置)。

Fig.1 Map of Xisha Islands and Gonghai Lake showing the location of the boreholes

a. The location of Xisha Islands and Gonghai Lake (the black box is the location of Xisha Islands and the red dot is the location of Gonghai Lake); b. The location of the Dongdao Island (the yellow box is the location of Cattle Pond); c. Borehole location (the yellow dotted line is the boundary of Cattle Pond, the red square is the drilling location).

钻孔顶部约 5 cm 的沉积被严重扰动, 取样时没有保存。钻孔整体岩性为珊瑚砂, 顶部为浅灰色至灰褐色的黏土质珊瑚较粗砂, 含动物粪便纤维、植物残体以及微体生物, 中部为浅灰褐色细粒砂质沉积物, 底部为淡黄色较粗粒砂质沉积物, 含白色珊瑚、贝壳碎屑较多。

1.2 实验方法

对 DD-1 钻孔以 0.5 cm 为间隔进行连续取样, 共采取样品 124 个。从每个样品中取 2 g 左右用聚乙烯保鲜膜包裹, 置于规格为 2 cm×2 cm×2 cm 的无磁性塑料盒中, 压实固定后用于磁学参数测量; 同时采取平行样品冷冻干燥, 充分分散之后进行沉积物粒度测试。

对所有盒装样品进行如下环境磁学实验。首先在卡帕桥 MFK1-FA 磁化率仪进行高、低频磁化率测试, 测试频率分别为 15 616 和 976 Hz, 场强为 200 A/m。对测量完磁化率的所有样品, 施加 80 mT 的交变场和 0.05 mT 的直流场, 测量非磁滞剩磁 (ARM); 之后, 对样品分别施加 1000、-100 和 -300 mT 的脉冲场, 测量相应的等温剩磁 (IRM), 两项实验均利用 2G-760 超导磁力仪测量。1000 mT 场强时的剩磁视为饱和等温剩磁 (SIRM)。用 $(SIRM+IRM_{-300mT})/2$ 计算得到 HIRM, 一般表示样品中赤铁矿的含量, $S_{300}=(IRM_{-300mT}/SIRM)$ 一般表示样品中高矫顽力矿物的相对含量 (IRM_{-300mT} 指的是 -300 mT 时的剩磁), $ARM/SIRM$ 表示磁性矿物粒度的相对大小。根据 SIRM 的变化, 分别选择其高、低值处的代表性样品进行磁滞回线以及磁化率随温度变化的实验, 识别磁性矿物的类型。磁滞回线在 MicroMag3900 振动磁强计完成, 最大磁场为 1 T。磁化率随温度变化实验在 MFK1-FA 磁化率仪完成, 温度区间为室温至 700 °C。

采用振动筛析法对样品进行粒度分析。将冻干分散后的样品置于分析筛上, 充分振荡进行筛分。筛子直径分别为 5、2、1、0.5、0.25、0.125、0.063 mm, 分别对筛分后各个粒级的物质进行称重。

ARM 和 IRM 实验在中国地质大学(武汉)古地磁实验室完成, 其他实验在中山大学地球科学与工程学院磁学实验室进行。

2 钻孔沉积物年代框架

在 3 个钻孔中挑选粒径 > 0.125 mm 的底栖有孔虫、植物种子和贝壳共 20 个样品, 加入 500 μL 乙

醇放置在超声波振荡仪中清洗 30 s, 并用纯水清洗之后, 送往 Beta 实验室进行 AMS ^{14}C 测年, 测量结果见表 1。测年数据用 Calib 704 软件校正至日历年龄, 由于东岛“牛塘”为淡水湖泊, 校正曲线采用 Intcal 13。

由表 1 可见, 3 个钻孔的测量年龄均存在倒转现象, 甚至同一层位植物种子和有孔虫的年龄也存在很大差异。为建立可靠的沉积物年龄模式, 首先基于沉积物岩性和磁化率的变化, 对 3 个钻孔进行对比, 确定不同钻孔沉积物的对比方案, 然后对 3 个钻孔的年龄进行综合分析, 挑选合适的测年数据进行年龄框架的重建。3 个钻孔为相邻的平行钻孔, 岩性变化代表了相同的沉积过程, 而磁化率的相对大小变化是岩性变化的良好反映。以显著的岩性变化为标志、以磁化率值的高、低变化为可对比层位, 建立 3 个钻孔沉积物的分布模式 (图 2)。根据 3 个钻孔磁化率的对比, DD-1 钻孔 21.5 cm 和 50 cm 两个层位的测量数据 900 ± 30 a、 700 ± 30 a 应该为异常数据, 在建立年龄模式时删除。根据前人在同一湖泊沉积顶部 ^{210}Pb 的测量结果, 顶部约 13 cm 的沉积年代为 1861—2003 年, 约 20~21 cm 处的 AMS ^{14}C 年龄为 1476—1661AD (2 sigma)^[22]。可能由于打钻过程中的压实作用, DD-1 钻孔在约 10 cm 处的 AMS ^{14}C 测年结果与前人在 20~21 cm 处的基本相同, 沉积厚度减小一半, 估算近 100 年来的沉积可能只有约 5~6 cm 厚。而在打钻的过程中顶部约 5 cm 的样品由于扰动未取样, 故无法对沉积钻孔顶部进行年龄限定。对 DD-1 钻孔其他数据, 使用基于 R 语言的 Bacon 程序建立年龄-深度模型 (图 3)^[23]。

3 实验结果

3.1 沉积物粒度分布及湖泊水动力条件变化

沉积物颗粒物主要为珊瑚砂, 含有介形虫和有孔虫等微体生物。通过体视显微镜观察, 当有机质含量高时, 微体生物含量低, 而当珊瑚砂等含量高时, 微体生物的含量也相对增加, 其在珊瑚砂中的占比基本不变。从测试结果可见 (图 4), 沉积物主要为 1~0.063 mm 的珊瑚砂 (平均含量约 81%), 仅有个别样品存在 > 5 mm 的成分, < 0.063 mm 的珊瑚砂含量低于 25%。5~0.125 和 < 0.063 mm 两个端元的组分呈相反的变化趋势, 代表了两种不同的水动力条件。前者表示水动力条件较大, 后者表示水动力条件较小。水动力条件的变化可以分为

表 1 DD-1、DD-2 和 DD 钻孔样品 AMS ^{14}C 年龄测定结果Table 1 AMS ^{14}C dating results of core DD-1, DD-2 and DD

钻孔	样品编号	实验室编号	深度/cm	材料	常规年龄/aBP	校正年龄/ $(2\sigma, \text{cal aAD})$
DD-1	DD-1018	521 063	10	有孔虫	300±30	1490—1602
	DD-1039	513 103	21.5	有孔虫	900±30	1115—1210
	DD-1072	513 104	36	贝壳	720±30	1246—1302
	DD-1074	546 086	40.5	有孔虫	900±30	1115—1210
	DD-1080	546 088	43.5	有孔虫	880±30	1117—1221
	DD-1086	521 064	46.5	有孔虫	960±30	1063—1154
	DD-1086	546 089	46.5	有孔虫	970±30	1063—1154
	DD-1093	546 090	50	有孔虫	700±30	1262—1308
	DD-1114	513 105	57	贝壳	980±30	1075—1154
	DD-1117	513 106	62	有孔虫	990±30	989—1052
	DD-1120	517 595	63.5	有孔虫	990±30	989—1052
DD-2	DD-286.5	546 096	36.5	有孔虫	940±30	1026—1158
	DD-260.5	546 095	49	种子	720±30	1246—1302
	DD-221-2	546 094	69	有孔虫	1450±30	561—651
	DD-221	546 093	69	种子	960±30	1063—1154
	DD-24.5	546 092	77.5	种子	1130±30	860—998
DD	DD 121	513 108	5	有孔虫	340±30	1470—1639
	DD 61.5	546 098	34.75	种子	690±30	1226—1312
	DD 37	546 097	47	种子	880±30	1117—1221
	DD 017	513 107	57	有孔虫	1600±30	400—538

3 个过程, 即公元 1000—1100、1100—1400 年和 1400 年之后, 水动力从强-弱-较强的变化。

3.2 磁性参数与碎屑物质输入量变化

典型样品的磁滞回线结果表明, 沉积物中磁性矿物类型的变化分为两大类(图 5)。第一种类型的沉积物具有软磁性物质主导的磁滞回线特征, 在 200 mT 时可以达到闭合, 矫顽力(B_c)为 9~17 mT, 这种类型的沉积物具有较高的 SIRM 值; 而另一种类型为抗磁性物质主导, 饱和磁化强度(M_r)为负值, 这种类型的沉积物具有很低的 SIRM 值。平行样品的磁化率随温度变化曲线进一步表明, 对第一种类型的沉积物, 加热曲线的磁化率在约 585 °C 有明显的快速衰减, 表明了磁铁矿的存在。两种类型的沉积物(顶部具有最高 SIRM 值的沉积物除外)加热曲线在 200~400 °C 之间随温度升高磁化率均显著下降, 有可能是样品中的抗磁性物质随温度变化对磁化率的影响加大, 但不能排除沉积物中可能含

有磁赤铁矿。冷却曲线在约 585 °C 有明显的升高, 之后变化相对平缓, 其值低于初始磁化率值, 或者基本相等, 表明在加热过程中没有明显的新的磁铁矿产生, 样品中磁铁矿的信息应该来自原始沉积物。

非磁滞剩磁(ARM)和饱和等温剩磁(SIRM)表示沉积物中磁性矿物浓度的变化, 前者对稳定单畴的细粒物质更为敏感^[24]。柱状剖面中, 磁性参数最显著的变化在约 1600 AD 之后, SIRM 和 HIRM 比前期高两个数量级以上, 显示磁性矿物浓度的快速增加; S_{300} 比值保持在 0.9 以上, 没有明显的降低, ARM/SIRM 减小, 表示磁性矿物的类型没有发生大的变化^[25], 粒度有所变粗^[26]。SIRM 另一比较明显的较高值发生在 1120—1250 AD, 同样 ARM/SIRM 也减小。这两处磁性参数明显变化的时期, 反映了陆源的碎屑物质输入量增加, 与中国历史文献记录中强风尘天气发生频次较高的记录一致^[27], 该时期伴随着湖泊粗颗粒物质的减小。整个钻孔中沉积物 ($\text{SIRM}+\text{IRM}_{100\text{mT}}$)/SIRM 与 HIRM/SIRM 呈现基本

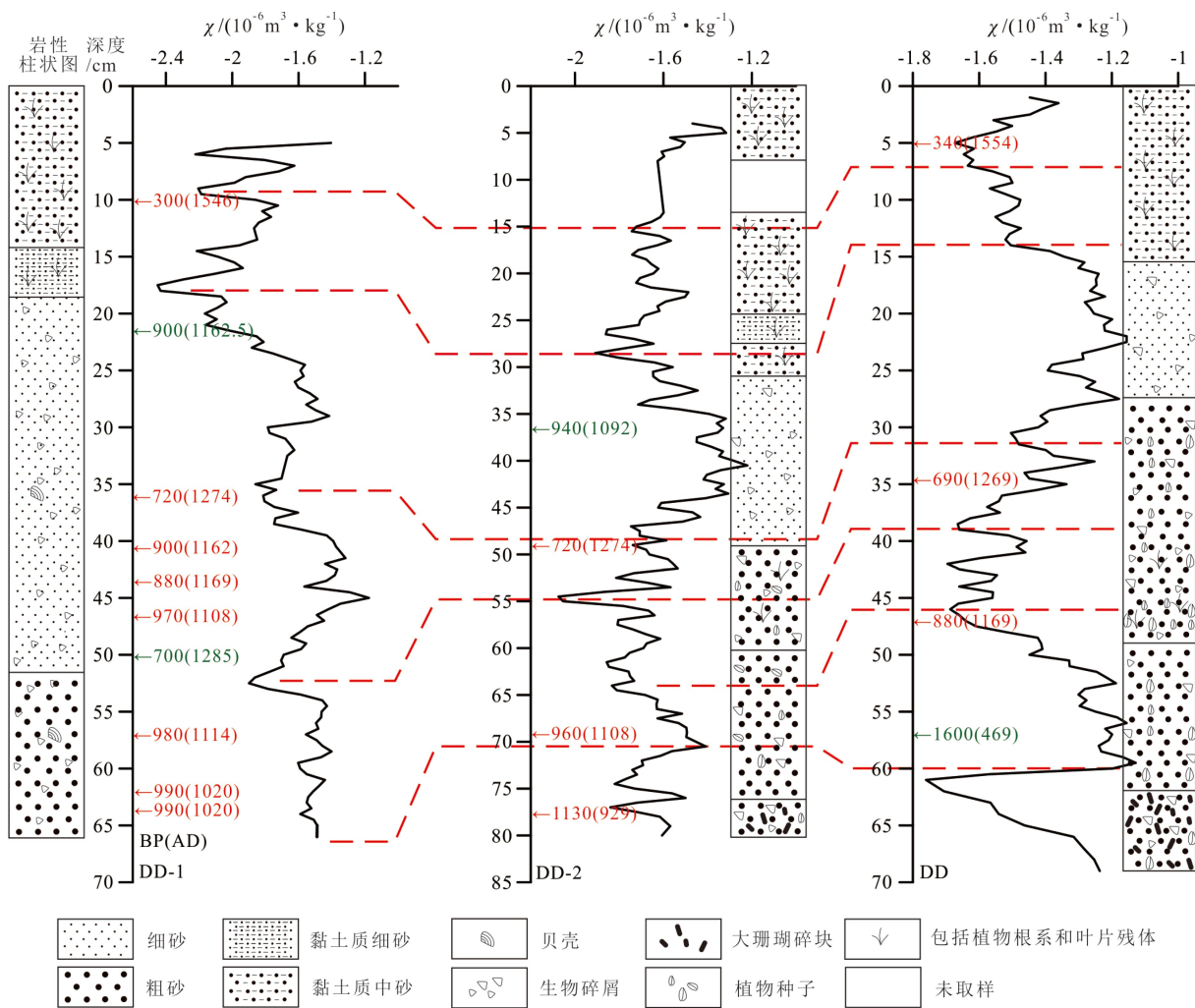


图2 3条钻孔岩性和磁化率对比

绿色数字为异常年龄点,红色数字为正常测定年龄;红色虚线代表3条钻孔对应的沉积层位。

Fig.2 Comparison of lithology and magnetic susceptibility of core DD-1, DD-2 and DD

The red numbers represent the normal ages while the green numbers represent the uncertain ages; The red dotted lines show the correlation depositional horizons among three boreholes.

一致的趋势,表明沉积物中矫顽力大于 100 mT 的磁性矿物主要是高矫顽力矿物(图6)。

4 讨论

4.1 过去近千年西沙群岛降雨与季风气候的反向变化

一般情况下,封闭性湖泊的沉积物粒度能够反映湖泊水位的上升或下降,粒度越细表示湖泊水位越高^[28]。但是牛塘湖泊位于珊瑚礁之上,湖泊四周为珊瑚砂,具有较高的孔隙度,水体易与海水之间相互渗透,使得牛塘的水位持续保持在 0.5 m 左右的状态^[21],湖泊沉积物的粒度可能并不反映湖泊水位的变化,而是表示将珊瑚砂从四周汇水面积区搬

运至沉积区的水动力强度的大小^[22,29]。在降雨期间,来自于沙堤的漫流将坡面及周边物质搬运至湖泊中沉积^[22]。由于沙堤的阻隔,当海平面低于湖泊沙堤之下时,一般正常的海浪对湖泊的珊瑚砂不产生影响。同时,整个钻孔沉积物主要由白色的珊瑚砂组成,沉积物呈现贫有机质的特征,说明沙堤植被覆盖变化不大,对源区沉积物粒度变化的影响较小。整条钻孔中,沉积物中主要为 1~0.063 mm 的珊瑚砂,部分样品 >0.5 mm 百分含量非常低,部分样品无 >1 mm 的珊瑚砂,0.125~0.5 mm 主要为珊瑚砂和微体生物壳体。由此可以认为排除微体生物壳体的影响之后,湖泊沉积物中颗粒珊瑚砂的含量(这里用 0.125~0.5 mm 的珊瑚砂含量表示),可以作为搬运水动力强弱指标,其值越大,说明水动力较强,降雨量较大。而一些特别突然的粗颗粒

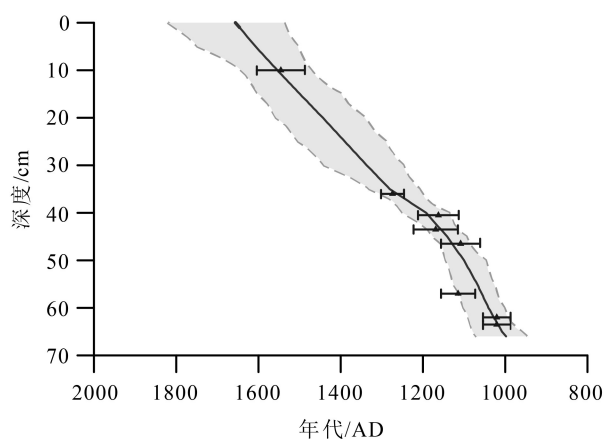


图 3 牛塘湖泊沉积 DD-1 柱状样年龄-深度模型

实线代表平均年龄, 左侧虚线代表最小年龄, 右侧虚线代表最大年龄, 三角形点代表校正后的测量数据, 三角形点所在的线代表年龄误差。

Fig.3 Age-Depth model of borehole in Cattle Pond

The solid line represents the mean age; The left and right dotted lines represent the minimum and the maximum age respectively; The triangle symbols represent the calibrated AMS¹⁴C ages, and the line on the triangle represents the age error.

含量沉积段(图 4, 这里用 > 5 mm 表示), 可能表示异常风暴潮等海洋因素对珊瑚砂的影响。

对比东岛湖泊沉积物粒度 0.125~0.5 mm 颗粒含量的变化, 同一湖泊的介形虫壳体氧同位素和相邻的海南岛玛珥湖沉积物的粉砂物质含量(图 7 a, b, c), 可以发现近 1000 年以来, 西沙群岛区域的热带降雨呈现 3 个阶段, 即在约 1000—1100 年降雨较多

(图 7 A 段), 在 1100—1400 年降雨减少(图 7 B 段), 而 1400 年之后是降雨最丰沛时期(图 7 C 段)。较多的降雨使湖泊之中介形类壳体的氧同位素偏轻。其中 1000—1100 年的降雨, 强度和范围较小, 没有持续向北传送至海南岛地区, 湖泊之中的水体没有呈现明显的淡化。西沙群岛这一降雨特征与印度季风和东亚季风强度均呈现反向的变化^[30]。1000—1100 年是中世纪暖期中后期全球气温较高时期, 西沙群岛降雨较多而亚洲季风区降雨较少, 主要的驱动因素可能在于该时期为 ENSO 频发时期^[31], 其给热带和陆地季风区域带来了不同的降雨过程。在 1100—1400 年期间, ENSO 活动减弱, 热带辐合带的向北移动促使了季风的加强, 使季风区域降雨增多而热带区域降雨减少。1400 年之后, 小冰期时期全球气温下降, ENSO 活动较弱, 热带辐合带回撤, 季风减弱而热带区域降雨增加。热带和季风区域这种在百年尺度的空间降雨变化, 表明不同的热带海洋过程对热带和季风区域的降雨变化有不同的模式, ENSO 活动较强时, 会在一定程度上抑制季风的强度。

4.2 西沙群岛区域人类活动记录

1100—1200 年 SIRM 值相对前后时期的增加(图 5), 表示陆源碎屑物质输入量的增加。由于其对应粗颗粒物含量减少时期, 由强烈的波浪运动输送海洋悬浮搬运碎屑物质的可能性较小。同时

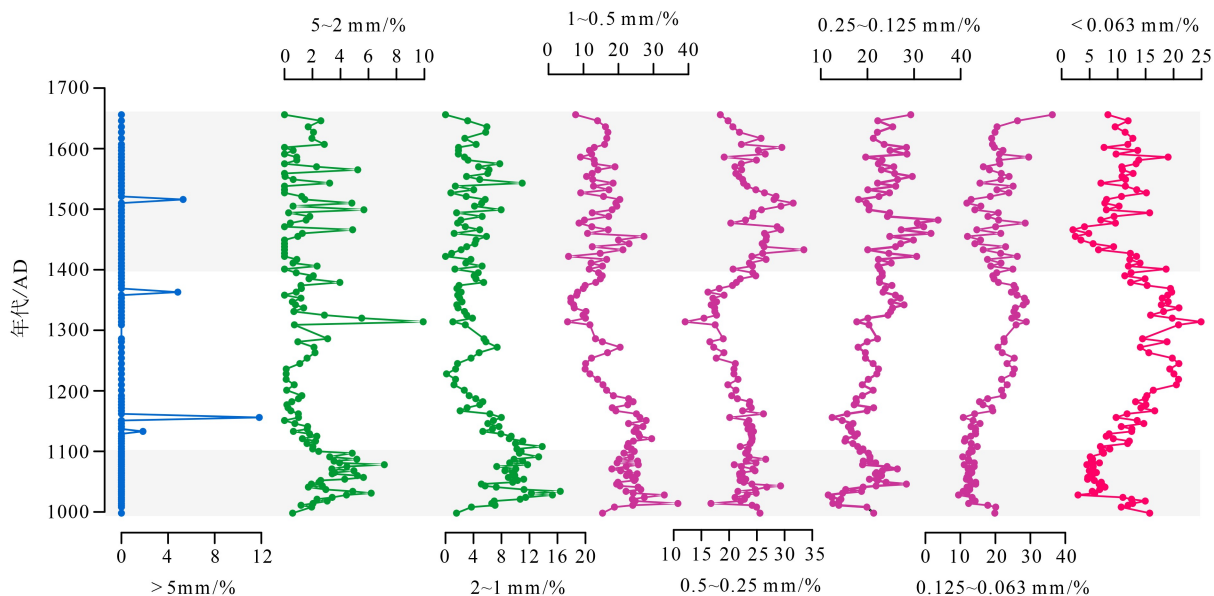


图 4 钻孔沉积物粒度组分变化

灰色阴影表示水动力条件较强。

Fig.4 The fraction variations of the different grain particle size of the borehole sediments

The gray bar marked the stronger hydrodynamics condition.

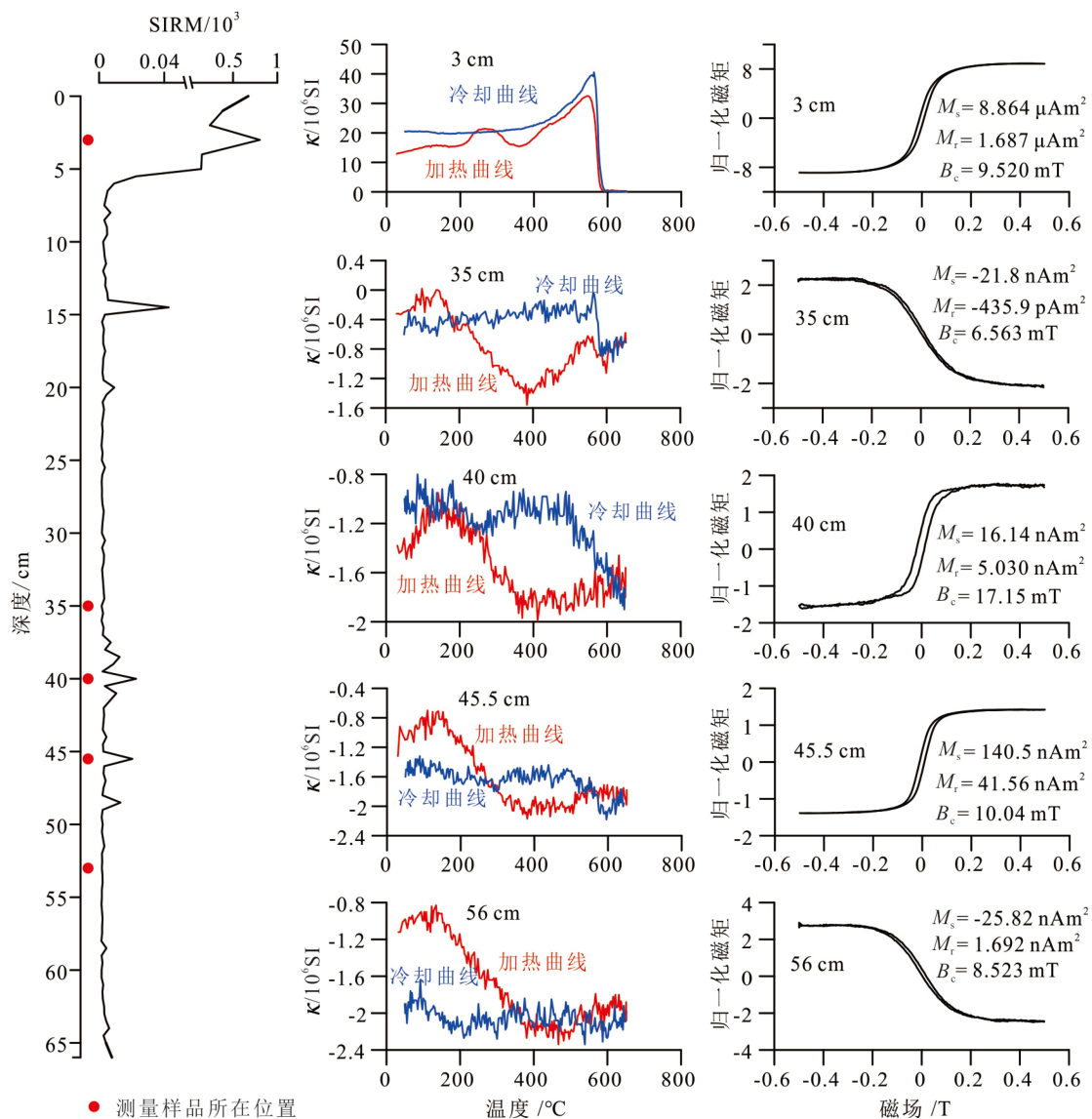


图5 典型样品磁性矿物类型

Fig.5 Typical magnetic minerals in samples

该时期处于夏季风较强时期,由季风搬运远源物质而使碎屑物质输入增多的贡献也不可能十分显著。较多的碎屑物质来源,应该反映了岛上近1000年来早期较强的人类活动。南宋时期,我国经济重心已经移至江南地区,“南重北轻”的经济格局导致海上贸易的蓬勃发展,泉州、广州、温州等是海上贸易的重要港口,而南海又是古代“海上丝绸之路”贸易的必经之处,西沙群岛地处南海贸易航线^[34-35],西沙群岛可能成为过往船只的重要休憩地。西沙华光礁一号沉船的考古工作,发现一大批产自南方地区的外销瓷器,说明华南沿海地区宋代以来制瓷手工业的兴盛和外向型生产特征^[34-35],东岛牛塘人类活动的记录证明了海上丝绸之路在南宋的繁荣发展。

在1200年之后,随着元朝建立、海上贸易活动

的减弱,西沙群岛人类活动也相对减弱。公元1600年以后,SIRM表示磁性矿物浓度急剧增加,沉积物中的有机质含量明显增高,反映了在该时期之后,岛上人类活动快速增加,可能与明代海上贸易的再次繁盛有关^[36-37]。在西沙群岛北礁的水下考古调查中,发现了大量明代的文化遗址^[38],证明了该时期西沙群岛是海上贸易的重要通道。此外,东岛至今留存着明朝时期渔民祭祀的祭坛^[39]。同时,前人研究表明明末清初野牛被带入东岛以及对鸟粪进行开采用于农业^[40],这些都证明了在明朝时期人类已经在西沙群岛活动。

4.3 北方沙尘暴事件在西沙群岛的记录

近些年来,众多学者探讨在中国北方频繁发生的沙尘暴事件和人类活动之间的关系。在地质历

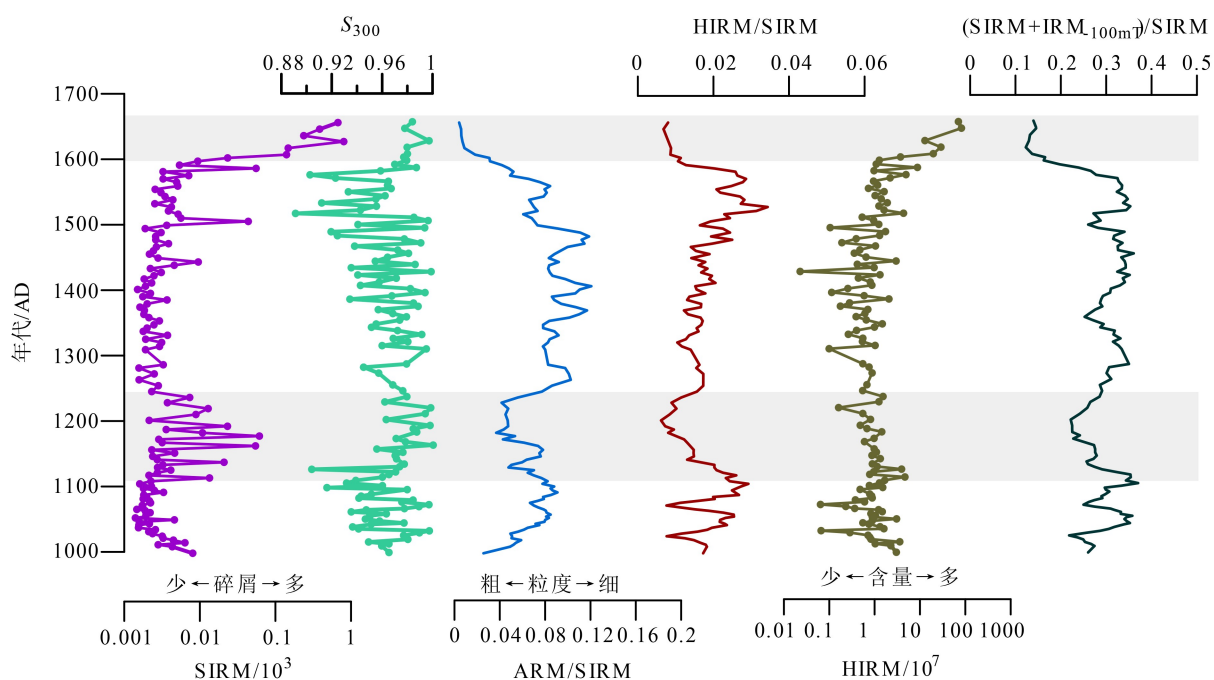


图 6 沉积物环境磁学参数随时间变化特征

点线为原始数据, 折线为 5 点滑动平均数据, 灰色阴影表示陆源碎屑输入增加。

Fig.6 Environmental magnetic proxies variations along with the age profile

The dots and line represent the original data, and broken lines display the 5-point adjacent average smoothing data; the gray bar mark more terrigenous input.

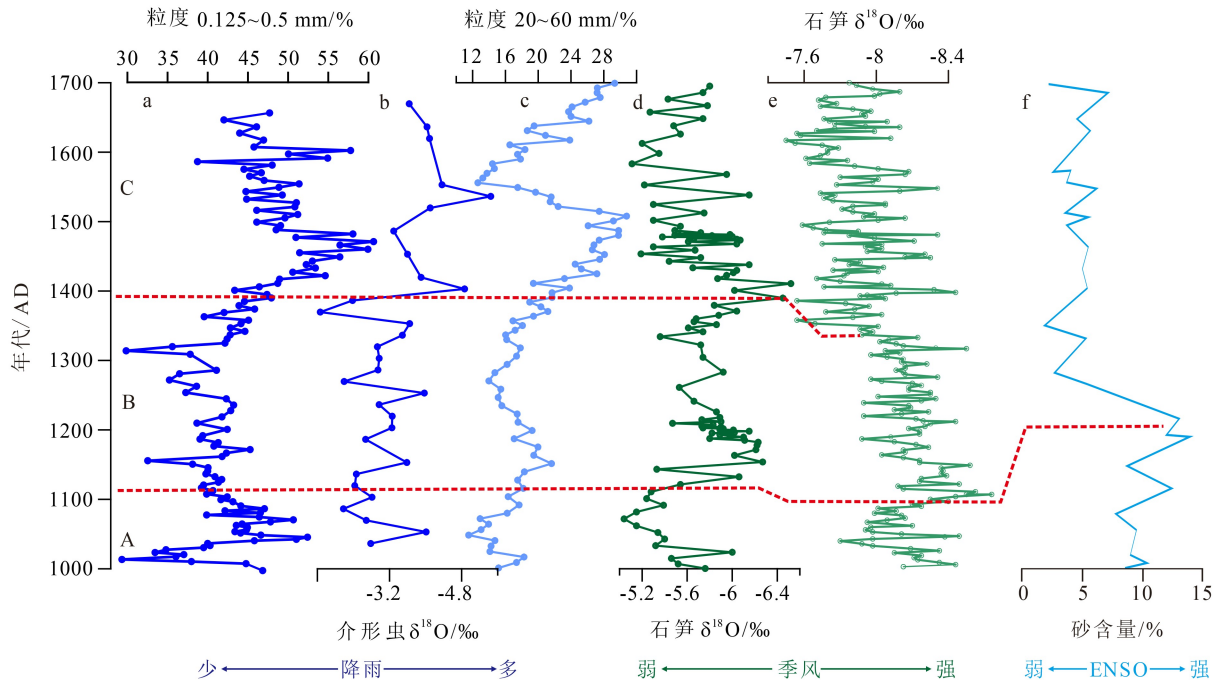


图 7 西沙群岛东岛牛塘湖泊表示的热带降雨与季风气候对比

a. 牛塘湖泊沉积物粒度, b. 牛塘湖泊介形虫壳体氧同位素^[22], c. 海南岛双池岭玛珉湖沉积物粒度^[32], d. 泰国 Kiang 洞石笋氧同位素记录^[33], e. 中国万象洞石笋氧同位素记录^[30], f. 东太平洋加拉帕戈斯群岛 El Junco 湖砂记录^[31]。年龄范围由 4 个全岩有机碳样品碳十四年龄测定限定。

Fig.7 Correlation of tropical rainfall and monsoon climate in Cattle Pond, Dongdao Island, Xisha Islands

a. Grain size of sediments in Cattle Pond, b. Oxygen isotope of Ostracoda shells in Cattle Pond^[22], c. Grain-size of sediments in Maar Lake, Shuangchiling, Hainan Island^[32], d. Oxygen isotope records of stalagmite in Kiang Cave, Thailand^[33], e. Oxygen isotope records of stalagmites from the Wanxiang Cave, China^[30], f. El Junco sand record, Galapagos Islands, eastern tropical Pacific^[31]. The age range was restricted by AMS¹⁴C of four bulk sediment samples.

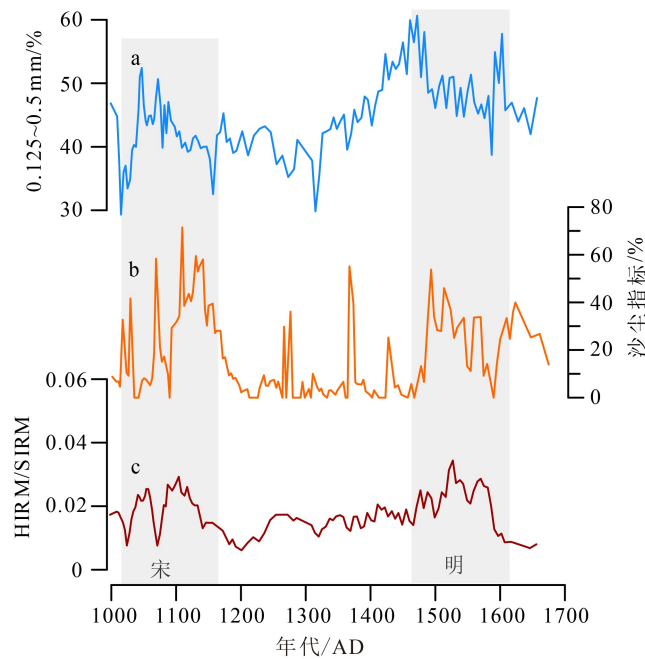


图8 西沙东岛牛塘湖泊记录的两次北方沙尘暴事件

a 牛塘湖泊沉积物粒度, b 公海湖泊沙尘暴记录^[20], c 东岛粉尘记录指标(HIRM/SIRM)。灰色阴影表示两次沙尘暴发生的时期。

Fig.8 Two dust storm events recorded in the lake deposits on Xisha Islands

a. Grain size of sediments in Cattle Pond, b. Dust storm record of Gonghai Lake^[20], c. Dust record proxy of Dongdao Island (HIRM/SIRM). Gray bars represent the periods during which the two dust storms occurred.

史记录中,部分学者利用东部黄土高原上湖泊沉积的粒度指标重建了过去近2000年的沙尘暴历史,表明在北宋末年至南宋以及明朝发生重大沙尘暴事件。他们认为沙尘暴发生在北方降雨相对丰沛时期,提出人类活动是该时期中国东部沙尘暴的主要控制因素^[20]。

在牛塘湖泊的沉积物记录中,在1000—1200 AD和1450—1600 AD期间,HIRM/SIRM呈现两次明显的波动(图8),表明碎屑物质中赤铁矿含量相对增多。在这两次事件发生时期,西沙地区降雨量较多,气候湿润,原地风化作用形成赤铁矿的贡献应该相对较小,相对更多含量的赤铁矿应该来源于外部的输入。从湖泊介形类的氧同位素值相对偏轻的特征分析,湖泊水体此时偏淡水,波浪作用引起的海水入侵可以忽略,相对更多含量的赤铁矿最大的来源应该是输入的粉尘中含量的变化,即HIRM/SIRM的两次波动,是北方同一时期沙尘暴事件在西沙地区的记录。

在北方沙尘暴发生时期,较细的粉尘物质经过空气对流,进入到对流层甚至平流层,随空气的流动而长距离的搬运。对流层低层850 hPa风场处于海拔1200~1900 m的高度上,是近地面摩擦层的界面,与地面之间有很强的相关性。850 hPa风场是

粉尘物质远距离传输的关键层位^[41]。前人通过对中国华南地区不同高度的水平风场进行合成分析,结果显示粉尘物质输送至中国东南沿海的风场是850 hPa风场^[42]。当空气中的粉尘物质输送到西沙地区时,充足的水汽一方面有利于细颗粒的粉尘物质发生凝聚,同时粉尘物质也是大气颗粒物形成云凝结核、促使降雨形成的有利条件,两个方面的综合作用使粉尘物质随降雨进入到湖泊沉积之中。

5 结论

(1)对位于西沙群岛东岛的牛塘湖泊钻取3根短柱状样品,通过AMS¹⁴C测年和基于岩性、磁化率变化的钻孔对比,建立钻孔地层公元1000—1700年间的年代框架。

(2)对湖泊沉积物高分辨率的粒度分析和环境磁学参数的测试结果分析表明,湖泊沉积物中0.125~0.5 mm珊瑚砂含量代表了该地区降雨量的变化,其反映的降雨规律与季风气候呈现相反的模式,即西沙地区降雨较多时,季风强度较弱。这种变化反映了ENSO活动和热带辐合带的移动对热带降雨和季风气候的综合作用结果。

(3)沉积物中环境磁学参数记录了岛上人类活

动的历史, 公元 1100—1200 年和 1600 年之后的两次磁性矿物浓度的显著增加, 是南宋时期海上贸易活动繁荣和明末社会更替的反映; 而 1000—1200 年和 1450—1600 年两次赤铁矿含量的相对增多, 是北方强沙尘暴事件在西沙群岛的记录。

参考文献 (References)

- [1] Oppo D W, Rosenthal Y, Linsley B K. 2, 000-year-long temperature and hydrology reconstructions from the indo-pacific warm pool [J]. *Nature*, 2009, 460 (7259): 1113-1116.
- [2] Mann M E, Zhang Z H, Rutherford S, et al. Global signatures and dynamical origins of the little ice age and medieval climate anomaly [J]. *Science*, 2009, 326 (5957): 1256-1260.
- [3] Yan H, Sun L G, Wang Y H, et al. A record of the southern oscillation index for the past 2, 000 years from precipitation proxies [J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4 (9): 611-614.
- [4] Yan H, Wei W, Soon W, et al. Dynamics of the intertropical convergence zone over the western pacific during the little ice age [J]. *Nature Geoscience*, 2015, 8 (4): 315-320.
- [5] 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 (5723): 854-857.
- [6] Gu Y S, Liu H Y, Traoré D D, et al. ENSO-related droughts and ISM variations during the last millennium in tropical southwest China [J]. *Climate Dynamics*, 2020, 54 (1): 649-659.
- [7] Tan L C, Cai Y J, Cheng H, et al. High resolution monsoon precipitation changes on southeastern tibetan plateau over the past 2300 years [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2018, 195: 122-132.
- [8] Yamoah K A, Chabangborn A, Chawchai S, et al. A 2000-year leaf wax-based hydrogen isotope record from southeast asia suggests low frequency ENSO-like teleconnections on a centennial timescale [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 148: 44-53.
- [9] 陈德亮, 徐柏青, 姚檀栋, 等. 青藏高原环境变化科学评估: 过去、现在与未来[J]. *科学通报*, 2015, 60 (32): 3023-3035. [CHEN Deliang, XU Baiqing, YAO Tandong, et al. Assessment of past, present and future environmental changes on the tibetan plateau [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2015, 60 (32): 3023-3035.]
- [10] Roxy M K, Ritika K, Terray P, et al. Drying of Indian subcontinent by rapid Indian ocean warming and a weakening land-sea thermal gradient [J]. *Nature Communications*, 2015, 6: 7423.
- [11] Kumar K K, Rajagopalan B, Hoerling M, et al. Unraveling the mystery of Indian monsoon failure during el niño [J]. *Science*, 2006, 314 (5796): 115-119.
- [12] Zhang J P, Lu H Y, Jia J W, et al. Seasonal drought events in tropical east asia over the last 60, 000 y [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117 (49): 30988-30992.
- [13] Weiss H, Courty M A, Wetterstrom W, et al. The genesis and collapse of third millennium north mesopotamian civilization [J]. *Science*, 1993, 261 (5124): 995-1004.
- [14] Kidder T R, Henry E R, Arco L J. Rapid climate Change-induced collapse of hunter-gatherer societies in the lower mississippi river valley between ca. 3300 and 2780 cal yr BP [J]. *Science China Earth Sciences*, 2017, 61 (2): 178-189.
- [15] Chen F H, Dong G H, Zhang D J, et al. Agriculture facilitated permanent human occupation of the tibetan plateau after 3600 B.P [J]. *Science*, 2015, 347 (6219): 248-250.
- [16] Young K R. Biogeography of the anthropocene: domestication [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2016, 40 (1): 161-174.
- [17] Heitkamp F, Sylvester S P, Kessler M, et al. Inaccessible andean sites reveal human-induced weathering in grazed soils [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2014, 38 (5): 576-601.
- [18] Vannièrè B, Blarquez O, Rius D, et al. 7000-year human legacy of elevation-dependent european fire regimes [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2016, 132: 206-212.
- [19] Yasuda Y, Kitagawa H, Nakagawa T. The earliest record of major anthropogenic deforestation in the Ghab Valley, northwest Syria: a palynological study [J]. *Quaternary International*, 2000, 73-74: 127-136.
- [20] Chen F H, Chen S Q, Zhang X, et al. Asian dust-storm activity dominated by Chinese dynasty changes since 2000 BP [J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 992.
- [21] 赵三平. 南海西沙群岛海鸟生态环境演变[D]. 中国科学技术大学硕士学位论文, 2006:1-117. [ZHAO Sanping. Evolution of seabird eco-environment on Xisha Islands of South China Sea[D]. Master Dissertation of University of Science and Technology of China, 2006:1-117.]
- [22] Yan H, Sun L G, Oppo D W, et al. South China Sea hydrological changes and Pacific Walker Circulation variations over the last millennium [J]. *Nature Communications*, 2011, 2: 293.
- [23] Blaauw M, Christen J A. Bacon Manual-v2.3.3[Z]. 2013: 1-15.
- [24] Thompson R, Oldfield F. Environmental Magnetism[M]. London, Boston: Allen & Unwin, 1986:1-237.
- [25] Liu Q S, Roberts A P, Torrent J, et al. What do the HIRM and S - ratio really measure in environmental magnetism? [J]. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2007, 80 (9): Q09011.
- [26] Evans M E, Heller F. Environmental Magnetism: principles and applications of enviromagnetics[M]. Amsterdam: Academic Press, 2003:1-299.
- [27] Zhang D E. Evidence for the existence of the medieval warm period in China [J]. *Climatic Change*, 1994, 26 (2-3): 289-297.
- [28] Chen J A, Wan G J, Zhang D D, et al. Environmental records of lacustrine sediments in different time scales: sediment grain size as an example [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2004, 47 (10): 954-960.
- [29] 孙立广, 晏宏, 王玉宏. 南海西沙过去千年降雨变化及其影响因素 [J]. *科学通报*, 2012, 57 (19): 1730-1738. [SUN Liguang, YAN Hong, WANG Yuhong. South China Sea hydrological changes over the past millennium [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57 (19): 1730-1738.]

- [30] Zhang P Z, Cheng H, Edwards R L, et al. A test of climate, Sun, and Culture relationships from an 1810-Year Chinese cave record [J]. *Science*, 2008, 322 (5903): 940-942.
- [31] Conroy J L, Overpeck J T, Cole J E, et al. Holocene changes in eastern tropical pacific climate inferred from a galápagos lake sediment record [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2008, 27 (11-12): 1166-1180.
- [32] Yang X Q, Wei G J, Yang J, et al. Paleoenvironmental shifts and precipitation variations recorded in tropical maar lake sediments during the Holocene in southern China [J]. *The Holocene*, 2014, 24 (10): 1216-1225.
- [33] Tan L C, Shen C C, Löwemark L, et al. Rainfall variations in central Indo-Pacific over the past 2, 700 y [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2019, 116 (35): 17201-17206.
- [34] 孟原召. 华光礁一号沉船与宋代南海贸易[J]. *博物院*, 2018 (2): 11-26. [MENG Yuanzhao. Research on Huaguang reef shipwreck I and overseas trade on the maritime silk road in the song dynasty [J]. *Museum*, 2018 (2): 11-26.]
- [35] 包春磊. 南海“华光礁 I 号”沉船水下考古试析[J]. *南海学刊*, 2015, 1 (3): 55-59. [BAO Chunlei. An archaeological analysis of underwater wreck of Huaguang Reef I in South China Sea [J]. *The Journal of South China Sea Studies*, 2015, 1 (3): 55-59.]
- [36] 陈冲. 南澳 I 号沉船所见景德镇民窑青花瓷的生产年代[J]. *华夏考古*, 2018 (4): 85-96. [CHEN Chong. The year of production of blue-and-white porcelain made in Civilian Kiln in Jingdezhen Discovered on the Shipwreck Nan'ao I [J]. *Huaxia Archaeology*, 2018 (4): 85-96.]
- [37] 崔勇. 广东汕头市“南澳 I 号”明代沉船[J]. *考古*, 2011 (7): 39-46. [CUI Yong. The Sunken Ship "Nan'ao I" of the Ming dynasty in Shantou City, Guangdong [J]. *Archaeology*, 2011 (7): 39-46.]
- [38] 中国国家博物馆水下考古研究中心, 海南省文物局. 西沙群岛北礁 19 号水下遗存的考古调查[J]. *中国国家博物馆馆刊*, 2011 (11): 47-53. [Underwater Archaeology Research Centre of National Museum of China, Hainan Provincial Bureau of Cultural Relics. Archaeological survey of the Beijiao 19 underwater site in the parcel islands [J]. *Journal of National Museum of Chinese History*, 2011 (11): 47-53.]
- [39] 刘晓瞳, 葛晨东, 邹欣庆, 等. 西沙群岛东岛潟湖沉积物碳、氮元素地球化学特征及其指示的环境变化[J]. *海洋学报*, 2017, 39 (6): 43-54. [LIU Xiaotong, GE Chendong, ZOU Xinqing, et al. Carbon, Nitrogen geochemical characteristics and their implications on environmental change in the lagoon sediments of the Dongdao Island of Xisha Islands in South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39 (6): 43-54.]
- [40] 孙立广, 赵三平, 刘晓东, 等. 西沙群岛生态环境报告[J]. *自然杂志*, 2005, 27 (2): 79-84. [SUN Liguang, ZHAO Sanping, LIU Xiaodong, et al. An eco-environmental report on xisha archipelago, South China Sea [J]. *Chinese Journal of Nature*, 2005, 27 (2): 79-84.]
- [41] Iwasaka Y, Minoura H, Nagaya K. The transport and spacial scale of asian dust-storm clouds: a case study of the dust-storm event of april 1979 [J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1983, 35 (3): 189-196.
- [42] Liu Y, Sun L G, Zhou X, et al. A 1400-year terrigenous dust record on a coral island in South China Sea [J]. *Scientific Reports*, 2014, 4: 4994.