

珠江三角洲全新世海平面升降及其对全球变化的响应*

彭杰^{1,2}, 杨小强¹, 黄文娅¹, 苏志华¹

(1. 中山大学地球科学与地质工程学院, 广东 广州 510275;

2. 中国科学院边缘海地质重点实验室, 广东 广州 510640)

摘要: 高频海平面的波动与全球气候变化之间的联系, 由于区域海平面升降指标、构造沉降、降雨和沉积物年代等诸多因素的困扰, 长期难以达到统一的认识, 影响全球变化的2个重要因子——海平面升降和气候变化之间驱动与响应机制的讨论。以珠江三角洲3个代表性钻孔为例, 基于旋回沉积学和磁化率值大小变化地层对比的基础上, 以SX97钻孔记录的地磁倾角变化与从亚洲其它湖泊重建的地球磁场长期变化曲线相对比, 确定沉积物的年代学框架。进而以环境磁学参数 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 为高频海平面波动的替代性指标, 讨论珠江三角洲百年—千年尺度海平面变化与全球气候变化之间的联系。结果表明, 珠江三角洲的初次海侵发生在约9.2 ka BP, 在9.1~7.7 ka BP和4.0~3.2 ka BP分别存在2个高海平面阶段, 几次显著的低海平面时期, 如1.2~1.5, 3~3.2, 4.0~4.75, 5.25~5.75, 6.2~6.3和7.25~7.75 ka BP与全球变冷事件或东亚夏季风的减弱相一致, 说明在全球尺度, 高频海平面的波动与全球气候的变化存在同步响应的特征。

关键词: 磁化率变化地层学; 旋回沉积学; 地球磁场长期变化; 高频海平面波动; 全球变化

中图分类号: P535.53 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2014)06-0063-10

Sea-level Fluctuations and Response to Global Changes during the Holocene in the Pearl River Delta, South China

PENG Jie^{1,2}, YANG Xiaoqiang¹, HUANG Wenya¹, SU Zhihua¹

(1. School of Earth Science and Geological Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Marginal Sea Geology, CAS, Guangzhou 510640, China

Abstract: High frequency sea-level fluctuations and their response to global change in the Pearl River Delta, adjacent to South China Sea, is still an open question due to uncertain dating and complicated facies changes. In this paper, we correlate the sediments of three cores, selected from the delta, using magnetic susceptibility stratigraphic and cycle stratigraphic methods. The geomagnetic inclination change recorded in sediments of core SX97 is compared with the geomagnetic paleosecular variation profiles recorded in sediments from the Shuangchiling Lake in Hainan Island, Erhai Lake in Yunnan province and Biwa Lake in Japan. Based on this correlation, age-depth models of three cores are then established. The magnetic grain size indicator $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$, coeval with the susceptibility, is used to serve as a proxy of sea-level fluctuations during the Holocene. Two high sea-level episodes occur at 9.1–7.7 ka BP and 4.0–3.2 ka BP, and several sharp sea-level falls appear at about 1.2–1.5 ka BP, 3–3.2 ka BP, 4.0–4.75 ka BP, 5.25–5.75 ka BP, 6.2–6.3 ka BP and 7.25–7.75 ka BP, corresponding to impacts

* 收稿日期: 2014-08-10

基金项目: 国家自然科学基金(41072264), 中国科学院边缘海地质重点实验室基金(MSGL11-02), 高校业务费(13lgzd08)联合资助项目

作者简介: 彭杰(1988年生), 男; 研究方向: 第四纪地质与环境研究; 通讯作者: 杨小强; E-mail: eesyxq@mail.sysu.edu.cn

of cold climate in the North Atlantic and weakened monsoonal activity in Asia, respectively.

Key words: magnetic susceptibility stratigraphy; cyclic stratigraphy; geomagnetic paleosecular variation; sea-level fluctuations; global climate change

全新世气候特征及其一些极端气候事件的研究,为揭示现今人类生活环境的变化规律及其未来趋势,提供了不可替代的基础素材。迄今为止,在早中全新世气温升高、中晚全新世气温降低的总体趋势之下,最显著的气候事件被认为是发生在~8.2 ka 的变冷记录^[1-3],认为格陵兰淡水注入、北大西洋环流形式的突变是导致该事件发生的主要因素^[4-5]。除此之外,其它一系列气候事件也相继在高分辨率的石笋和海洋沉积中被揭示^[6-7],显示了全新世与末次冰期期间类似的气候不稳定性特征。但是对这些气候事件的认识,仍然存在一些疑问,它们的全球性特征,以及驱动机制存在诸多未解之谜。如著名的~8.2 ka 变冷事件和~4.2 ka 的干旱事件,在热带区域很难发现类似的记录,许多学者甚至质疑这些事件的真实性^[8-13]。另外一方面,作为地球环境系统中的重要一员,全球海平面的波动规律及其机制,以及它与这些千年、百年尺度的气候事件之间的联系更是甚少比较系统的讨论^[14-21]。其中最大的难题在于短尺度海平面波动指标的建立以及高分辨率年代学标尺的确定。

河流三角洲通常具有很高的沉积速率,沉积体系随海侵或海退过程而发生明显变化,是研究海平面波动和古气候变化的良好载体。珠江三角洲毗邻南海,位于东亚季风影响区域,沉积始于晚更新世,全新世沉积厚度一般在8~20 m 波动。前期沉积学、地球化学、微体古生物学、矿物学等方面的工作,揭示沉积物可以记录短尺度的南海海平面的变化过程和陆地降雨变化规律^[22-26]。但是由于沉积相的复杂性和地层年代学工作的不确定性,不同区域钻孔地层的对比及其对沉积物记录的海平面变化规律的认识,存在较大争议,从而影响深入探讨区域短尺度海平面变化与全球气候变化之间的关系及其可能的驱动机制。

对珠江三角洲一些代表性钻孔,如位于广州番禺的PD 钻孔和深圳的SX97 钻孔,已有的岩石磁学和环境磁学工作揭示,沉积物中磁性矿物的类型、组份和粒度的变化,与海平面的升降密切相关^[24,27]。但遗憾的是,在这些前期工作中由于沉积物年龄的不确定性,导致甚少涉及海平面变化历史的讨论。本文主要应用旋回沉积学和磁化率变化相联系的方法,进行区域地层的对比;应用地球磁

场长期变化,确定沉积物的年代框架,进而讨论高频海平面波动及其与全球变化的联系。

1 地质背景

珠江三角洲位于热带、亚热带过渡区域,面积约1.1万 km²,现代气候主要受亚洲季风体系和海洋作用控制。现今的三角洲是由三大主要珠江水系(东江、西江和北江)在入海口形成的比较开阔的平原地带(图1)。区域内花岗岩和花岗片麻岩构成一些低山、丘陵。发育的一系列活动断层^[28],导致不同区域沉积速率和沉积厚度产生较大差异。进入全新世以来,一般认为三角洲具有持续、缓慢的沉降特征^[28]。三角洲沉积开始于晚更新世,沉积物大部分由粘土、粉砂质粘土和细砂组成。沉积厚度从几米到几十米变化,沉积速率约在50~200 cm/ka 之间。

三个代表性钻孔SX97 和 PD、PD2 以不锈钢钻具旋转钻进直至基岩而获得(图1)。钻孔SX97 位于深圳市珠江河口东北岸22°46'10"N, 113°46'42"E。钻孔长约30.6 m,岩性变化如下:0~3.85 m 是人工填土,3.85~10.84 m 主要由粉砂质粘土、粘土质粉砂、粉砂和细砂组成,含有贝壳夹层;10.84~12.12 m 为多种颜色混杂的风化粘土(一般称作“花斑粘土”);12.12~16.46 m 逐渐从杂色粘土质粉砂向橘红色粗砂转变;16.46~26.04 m 为灰绿色、灰白色粉砂和细砂,底部则为灰白色含细砾粗砂。

钻孔PD 长约17.5 m,位于广州番禺(22°53.859'N, 113°28.782'E)。主要沉积物为灰色、灰黑色粘土、粉砂质粘土和粘土质粉砂,含有不同大小的贝壳碎片。黄色、红色、白色和灰色等多种颜色混杂的“花斑粘土”出现在钻孔中部12.02~11.99 m, 10.39~10.30 m 和 9.13~7.4 m 三个层位。底部15.2~17.5 m 主要为灰色含细砾粗砂,在13.9~15.2 m 之间灰色粉砂和细砂占主体。钻孔PD2 距离PD 只有800 m 左右,长约29.8 m。沉积物相对比较均质,从0~24.8 m 主要为灰黑色粘土和粉砂质粘土,含有贝壳碎片和不对称的粉砂夹层。在15.40~16.0 m 之间沉积物为含有黄色粘土结核的灰黄色粘土。24.8 m 之下主要为灰黄色中、细砂^[25]。

钻孔 PD 和 PD2 距离相近，但是沉积厚度不同、花斑粘土在 PD2 钻孔不甚发育的特征，可能归因于 2 个钻孔分别位于“珠江口断层”两侧，

钻孔 PD2 可能位于下降盘，故沉积速率远大于钻孔 PD。

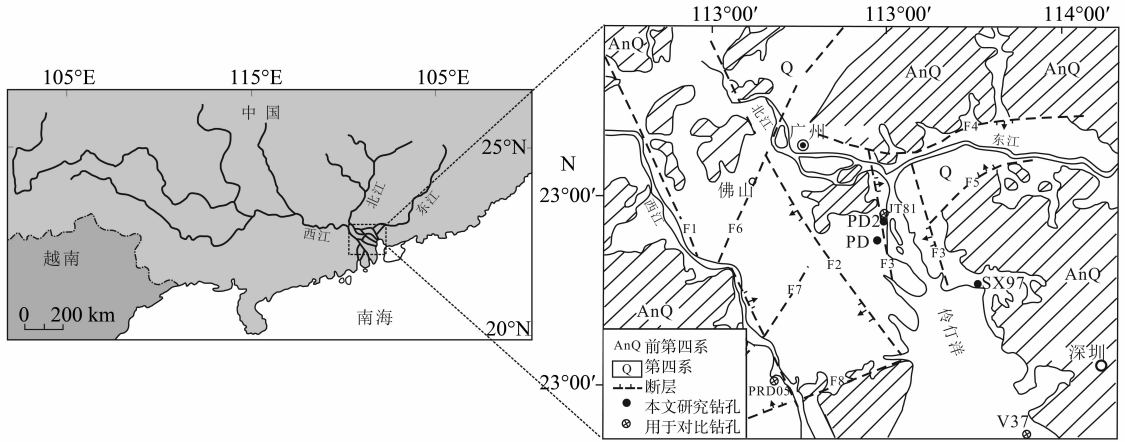


图 1 珠江三角洲及研究钻孔地理位置图

Fig. 1 A sketch map for the location of drilling holes PD, PD2 and SX97, and major faults in the Pearl River Delta

F1 - 西江断层; F2 - 白坭 - 沙湾断裂; F3 - 珠江口断裂; F4 - 瘦狗岭断裂; F5 - 东莞 - 厚街断裂;
F6 - 古劳 - 从化断裂; F7 - 顺德 - 新会断裂; F8 - 五桂山北麓断裂

2 钻孔沉积物¹⁴C 测年

钻孔 PD 共选择 10 个样品供¹⁴C 定年，其中 5 个用加速器质谱仪 (AMS) 测试而其它 5 个用传统液体本底闪烁仪进行测量。除一个样品为贝壳外，其它均为全岩有机质。用于 AMS 测量的样品在西安地球环境研究所完成预处理，然后在北京大

学重离子物理实验室完成测试。常规¹⁴C 测年在中国科学院广州地球化学研究所完成。PD 钻孔底部 3 个粉砂和细砂样品进行热释光年代确定，在中国科学院广州地球化学研究所完成。SX97 钻孔的 12 个¹⁴C 年龄和 PD 钻孔的 4 个¹⁴C 年龄分别来自文献 [22, 25]。

表 1 钻孔沉积物¹⁴C 测年¹⁾
Table 1 ¹⁴C and TL dating results of cores PD, SX97 and PD2

PD 钻孔			SX97 钻孔 ^[25]			PD2 钻孔 ^[25]		
深度/cm	¹⁴ C / TL 年龄/a	测年物质	深度/cm	¹⁴ C 年龄/a	测年物质	深度/cm	¹⁴ C 年龄/a	测年物质
98	2 465 ± 50 *	全岩有机质	7.5	957 ± 100	全岩有机质	500	1 535 ± 100	全岩有机质
172	2 000 ± 102	全岩有机质	99	3120 ± 160	全岩有机质	790	2 650 ± 100	全岩有机质
434	1 805 ± 30 *	贝壳	161	3 590 ± 70	全岩有机质	2 010	19 290 ± 470	全岩有机质
445	2 690 ± 110	全岩有机质	252	200 ± 150	全岩有机质	2 500	25 520 ± 550	全岩有机质
688	3 160 ± 105	全岩有机质	272	1 590 ± 80	全岩有机质			
737	3 725 ± 30 *	全岩有机质	318	3 000 ± 90	全岩有机质			
939	28 540 ± 190 *	全岩有机质	442	2 800 ± 250	全岩有机质			
971	21 950 ± 350	全岩有机质	481	6 500 ± 190	全岩有机质			
1 115	> 18 000	全岩有机质	541	6 790 ± 190	全岩有机质			
1 417	24 335 ± 190 *	全岩有机质	634	390	全岩有机质			
1 522	51 000 ± 5 200 (TL)	细颗粒石英	688	7 080 ± 120	全岩有机质			
1 648	57 100 ± 6 500 (TL)	细颗粒石英	1276	3 060 ± 580	全岩有机质			
1 750	130 700 ± 1 500 (TL)	细颗粒石英						

1) * 代表加速器质谱仪 (AMS) 年龄; SX97 钻孔年龄除来自文献 [22] 外, 部分由中国科学院广州地球化学研究所余素华研究员提供; TL - 代表热释光年龄

表 1 显示不同钻孔沉积物的¹⁴C 年龄结果显示严重的新、老倒置现象。对钻孔 PD 而言, 花斑粘土之上沉积物的年龄仅分布在 1.805 ± 0.03 和 3.725 ± 0.03 ka 之间。在该区域, Zong et al. 和刘春莲等^[26,29] 根据 JT81, V37 和 PRD05 等几个钻孔的¹⁴C 数据, 认为珠江三角洲初次海侵发生在约 9 ka, 在约 6.8 ka 开始向海退转变。如果以花斑粘

土之上沉积物作为全新世初始沉积的标志, 对比钻孔 PD、SX97 与 JT81、V37、PRD05 的沉积物 (图 2), 可以发现钻孔 PD、SX97 全新世沉积物年龄明显存在问题。在早、中全新世全球高海平面期间, 钻孔 PD 缺失该时期沉积, 而在海退期间, 却存在细粒沉积物, 这很难在沉积原理上进行解释。

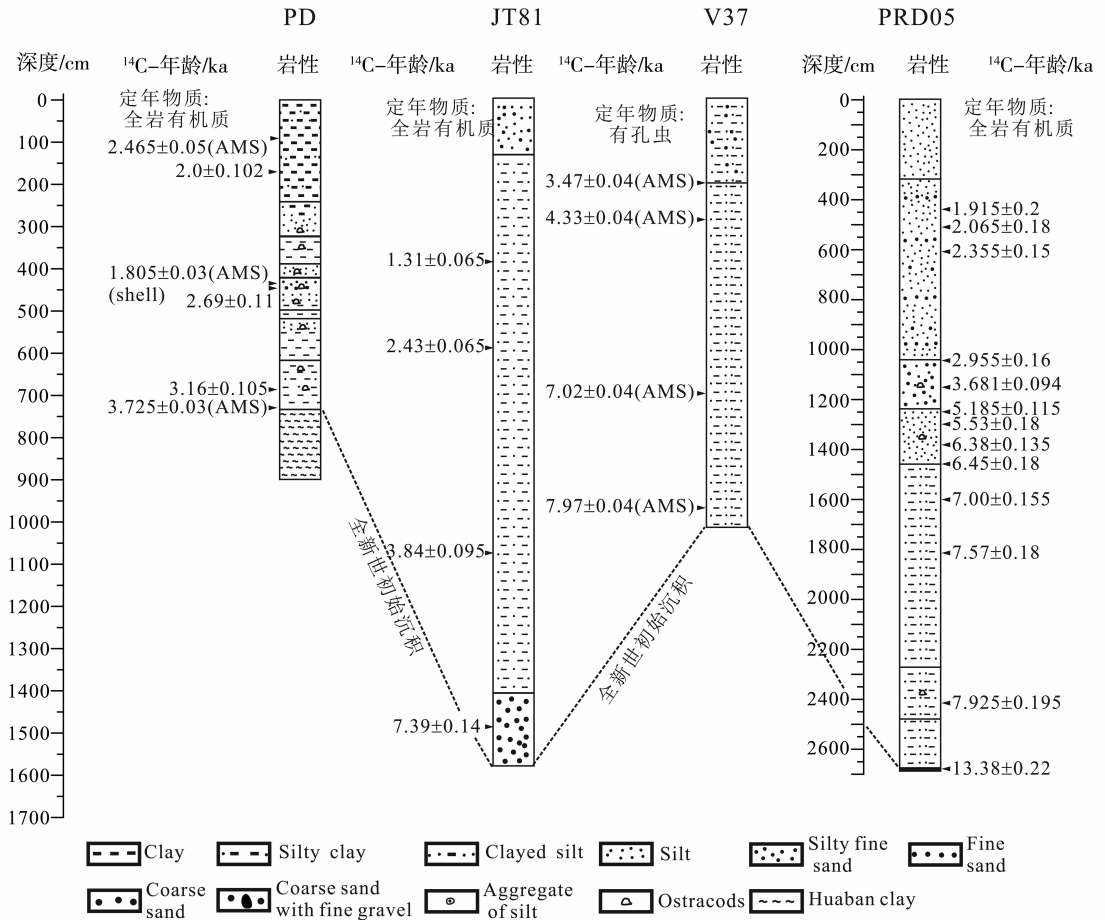


图 2 钻孔 PD, SX97 和 JT81, V37, PRD05 全新世沉积物对比^[26,29]

Fig. 2 Comparison of carbon ages of core PD with those of cores JT81, V37 and PRD05 since the Holocene^[26,29]

Yim (1999)^[30] 曾提出, 在低海平面时期, 三角洲沉积物暴露地表, 其测年物质可能被地下水污染, 从而导致测年信息的不确定。本文研究的 3 个钻孔位于现代海平面之上, 地下水位随海平面和陆地淡水的供应而变化, 这种变化也许会影响碳同位素的迁移, 进而导致¹⁴C 测年的不可预期性。

3 钻孔间地层对比

钻孔 SX97 和 PD 岩石磁学结果证明主要的载磁矿物为河流输入的碎屑性磁铁矿, 其浓度和粒度随着沉积物性质而变化^[24,27]。而在花斑粘土层,

针铁矿和赤铁矿占据重要位置, 反映了沉积后暴露地表经历长期风化的过程^[27]。三个钻孔在磁性矿物类型、浓度和粒度方面变化的相似性, 表明整个沉积过程主要受控于海平面的波动。因此, 有理由推测沉积物磁化率值代表了沉积过程和沉积环境的变化。也就是磁化率值的大小变化, 响应一个沉积旋回。磁化率变化的一些显著特征值是同期沉积, 可以提供钻孔间地层对比的替代性指标 (图 3)。

SX97 和 PD 钻孔中部花斑粘土厚约 1 m, 磁化率值较低, 可以作为钻孔地层对比最明显的标志层。尽管在 PD2 钻孔没有发现明显的类似地层,

但是在钻孔中部 (约 15 ~ 17 m) 存在一层灰黄色的粘土沉积, 其中包含黄色粘土结核, 具有低的磁化率值。在此层之下, 伴随一磁化率非常低的层位, 与 PD 钻孔磁化率特征非常相似, 而在此层之上, 沉积物磁化率值呈现总体增加的趋势, 可以判断该层是与花斑粘土同时期的沉积。从花斑粘土开始, 岩性呈现高频变化特征, 粒度从细到粗, 沉积物颜色从深到浅, 旋回式变化与沉积物磁化率大小表现出良好的一致性。在钻孔上部, 存在一磁化率值突然增大的层位, 与岩性的突然变化相一致, 代表了晚全新世以来的沉积, 也可以作为地层对比的一个标志层。如果以沉积物从细到粗、颜色从深到浅以及贝壳等生物含量多少作为一个沉积旋回

(表 2) (钻孔 PD2 全新世沉积岩性较均一, 难以划分沉积旋回), 与磁化率的从大到小综合考虑, 它们可以作为钻孔间地层对比的良好工具。尽管钻孔 SX97 的磁化率变化幅度弱于其它两个钻孔, 但是仍能比较清楚的鉴别出响应于岩性变化的峰、谷特征 (图 3)。基于这种旋回沉积学的对比, 自花斑粘土向上, 可以建立 3 个钻孔间地层对比的基本方案, 将之划分为 7 个可对比层 (以字母 a-g 标记) (图 3)。虽然在磁化率和沉积旋回可对比层位, 3 个钻孔的沉积物年龄存在巨大差异, 钻孔沉积物的 ^{14}C 年龄无法提供准确的年代信息, 但是清楚的沉积旋回仍然表明珠江三角洲全新世以来海平面至少存在 7 次显著的高频波动。

表 2 SX97 与 PD 钻孔沉积物沉积旋回划分

Table 2 Deposition cycles based on the lithology variations of cores SX97 and PD

SX97 钻孔			PD 钻孔		
岩性	底界/cm	旋回	岩性	底界/cm	旋回
黄褐色粘土质粉砂	68	a	黄褐色粗砂, 灰黄色粘土	60	a
黄褐色粗砂, 灰黄色粘土	60		灰黑色粘土, 夹黄褐色粗粉砂	140	
灰褐色粘土质细砂, 含大量贝壳碎片	99	b	灰褐色粘土, 夹有粉砂	150	b
灰黑色粘土, 夹黄褐色粗粉砂	140		灰褐色粘土	200	
灰褐色粘土, 局部夹粉砂, 含丰富贝壳碎片	240	c	灰褐色粘土, 夹粉砂	226	c
灰黑色粉砂质粘土, 含大贝壳	300		灰黑色粘土	275	
灰黑色中砂, 含少量贝壳, 局部夹粘土	350	d	灰褐色粉细砂	327	d
黑色粉砂、细砂, 含丰富贝壳	370		灰黑色粉砂, 细砂, 含小贝壳	427	
黑褐色粉砂质粘土, 含贝壳	437	e	黄褐色粉细砂, 含大量贝壳碎片	450	e
灰黑色粘土, 含植物碎叶	450		灰黑色粘土质粉砂, 含小贝壳	480	
灰黑色砂质粘土, 含少量贝壳碎片	570	f	灰褐色粘土质粉砂, 含贝壳	520	f
灰黑色粘土, 含贝壳碎片	599		灰黑色粘土, 含贝壳	665	
灰黑色粉砂质粘土, 含黄色斑点	660	g	灰黑色粉砂质粘土, 含贝壳, 夹灰褐色粉砂	720	g
灰黑色粉砂质粘土, 含少量贝壳碎片	730		灰黑色粘土	740	
花斑粘土	860		花斑粘土	913	

4 钻孔 SX97 磁倾角变化

钻孔 PD、PD2 由于岩管在破开之后, 失水破裂而无法进行古地磁方面的研究, 故只有钻孔 SX97 的沉积物用来进行古地磁方向的获取。以 5 cm 为间距取样, 共取得 200 个立方体 (2 cm × 2 cm × 2 cm) 样品 (13.85 ~ 15.7 m 之间沉积物为粗砂无法取样)。首先选择部分样品分别在 0 ~ 80 mT 交变磁场或 20 ~ 650 °C 温度区间 (MMTD60 热退磁炉) 进行磁清洗, 并分别在 2G - 755 超导系统测量其剩磁。实验结果表明, 16 mT 或 200 °C 基本可以消除

次生剩磁的影响。在更强的交变场或更高温度, 可以获得样品的特征剩磁 (图 4)。为了避免沉积物中高矫力矿物对交变退磁的影响, 对剩下的所有样品进行热退磁实验。由于没有确定钻孔方位角, 故只能讨论特征剩磁倾角的变化。

至少选择 4 个以上的退磁数据点, 以最小二乘法进行分析, 获取样品特征剩磁。去除最大角偏差 > 8° 的样品, 特征剩磁倾角随深度的变化如图 5 (c) 所示。从磁倾角变化曲线, 可以识别出比较明显的 8 个峰、谷变化 (标记为 'α - τ'), 代表了该区域全新世地球磁场的长期变化特征。

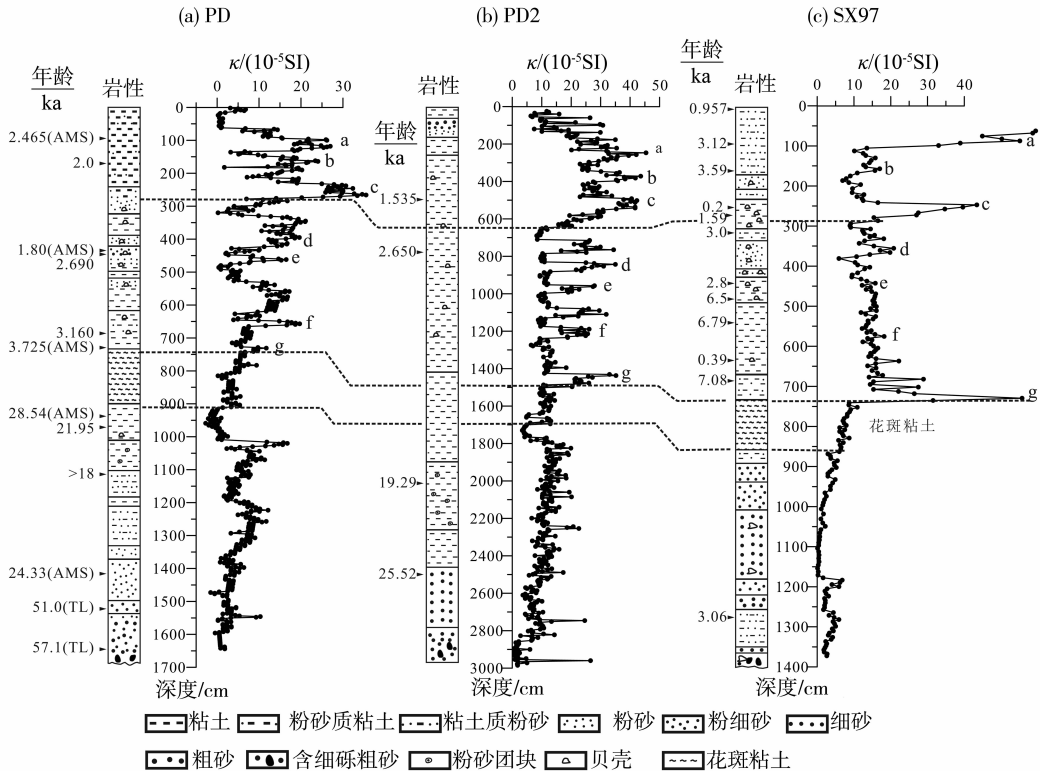


图 3 钻孔 SX97, PD 以及 PD2 沉积旋回分析与地层对比

图中虚线表示花斑粘土层界限以及钻孔上部岩性突变界限,字母 a-g 代表沉积旋回

Fig. 3 Stratigraphic correlation between cores PD, PD2 and SX97 based on deposition cycles. The depth scale of core SX97 was subtracted anthropogenic deposits (3.85m). Susceptibility peaks a, b, ... g assign sediments of the same period. Radiocarbon (AMS) and thermoluminescence ages (TL) are shown along the lithology column of cores.

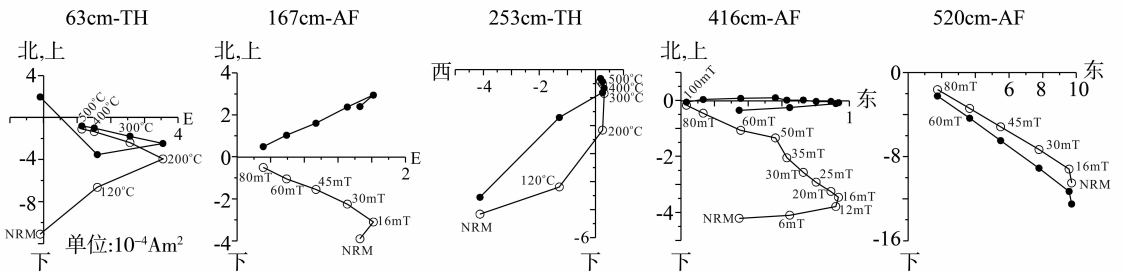


图 4 沉积物交变退磁与热退磁正交矢量投影. 结果显示交变退磁和热退磁均可获得沉积物特征剩磁 NRM-天然剩磁, TH - 热退磁, AF - 交变退磁. 实心/空心圆分别表示水平/垂直投影.

Fig. 4 Representative results of progressive AF or TH demagnetization for specimens in core SX97. Solid/open circles show projections on the horizontal/vertical plane. Declination values are relative.

5 讨论

5.1 基于磁倾角变化对比的沉积物年代框架

如上讨论,由于沉积物¹⁴C 数据无法提供准确的年龄信息,我们拟以地球磁场长期变化对比进行地层年代的确定。众多的研究证明,在千年时间尺

度、约数千公里范围内,地球磁场长期变化(PSV)具有相同的特征,可以作为区域地层对比和年代确定的良好工具^[31-35]。Ali (1999) 首先在日本 Biwa 湖建立了亚洲区域全新世的地球磁场长期变化曲线^[35],与从亚洲其它湖泊重建的 PSV 曲线和考古记录表现出良好的一致性^[36-37],为 PSV 的区域对比

提供了参照物。以¹⁴C 年龄作为基本的参考,将钻孔 SX97 的磁倾角变化曲线与 Biwa 湖^[35]、海南双池岭^[36]和云南洱海^[37]的长期变化曲线对比,以求确定钻孔不同深度的沉积物对比年龄(图 5)。确定 SX97 钻孔的年龄框架之后,根据沉积地层旋回对比方案,进一步确定 PD 和 PD2 两个钻孔的年代标尺

(表 3)。依据这种方法,可以建立 3 个钻孔的年代—深度模型(图 6)。结果显示,3 个钻孔全新世初始沉积基本一致,始于约 9 ka,与全球海平面快速上升至拐点转向基本稳定的时间一致。尽管不同钻孔之间沉积速率有所差异,但是各个区域沉积过程基本稳定,受同一因素控制。

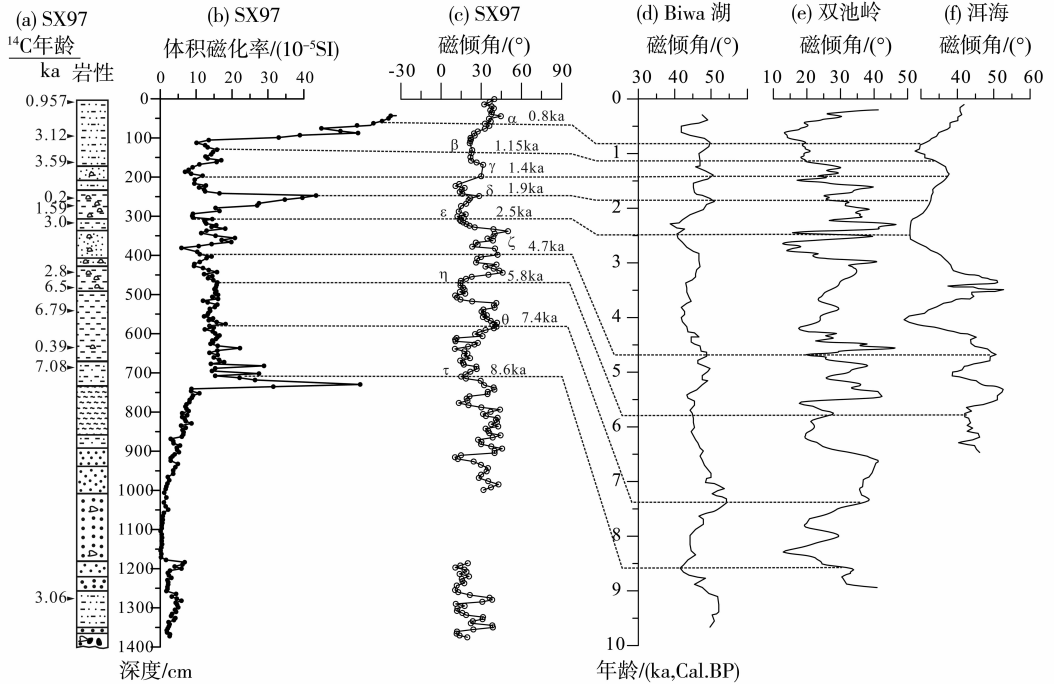


图 5 钻孔 SX97 沉积物岩性(a)、体积磁化率(b)以及特征剩磁倾角(c)变化。同时显示与东亚其它区域的地球磁场长期变化曲线对比。(d)日本 Biwa 湖^[35], (e)海南双池岭^[36], (f)云南洱海^[37]。

图中字母 α~τ 分别指磁倾角一些特征的峰、谷变化,虚线代表可对比特征点。

Fig. 5 Correlation of the inclination between cores SX97 (c), Biwa lake^[35] (d), Shuangchiling lake^[36] (e) and Erhai lake^[37] (f). Radiocarbon ages, lithology and volume susceptibility of core SX97 on the left (a,b).

表 3 根据地球磁场长期变化对比确定的钻孔沉积物年龄

Table 3 Sediment ages obtained from correlating the deposition cycles and susceptibility variations between cores utilizing the inclination curve

PD2/cm	PD/cm	SX97/cm	年龄/ka
180	60	60	0.75 ~ 0.85
345	150	135	1.0 ~ 1.2
405	190	200	1.35 ~ 1.5
480	230	250	1.8 ~ 2.0
700	323	305	2.4 ~ 2.6
920	440	390	4.65 ~ 4.80
1 020	490	470	5.7 ~ 5.9
1 180	650	580	7.3 ~ 7.5
1 400	710	708	8.5 ~ 8.7

5.2 珠江三角洲全新世高频海平面变化历史

当沉积容纳空间主要被海平面的变化所影响时^[26],沉积物粒度的大小主要受控于河流和海洋的相互作用过程。一般情况下,更细的沉积物粒度是海进过程、水深增加的结果^[26,29]。尤其是磁铁矿一类的重矿物,对搬运水动力条件更为敏感。当河流搬运动力受海水顶托作用而快速减弱时,粗颗粒重矿物首先在向陆一侧堆积,而细颗粒重矿物则悬浮或跃移搬运一段距离在向海一侧堆积。在同一位置,当海平面上升、水深增加时,将导致更细颗粒的重矿物含量增加。区域降雨增加导致的河流搬运动力的增强,对重矿物的粒度也有影响,但是这种变粗多表现为更短时期的事件性堆积,很难形成较长时期的连续堆积。

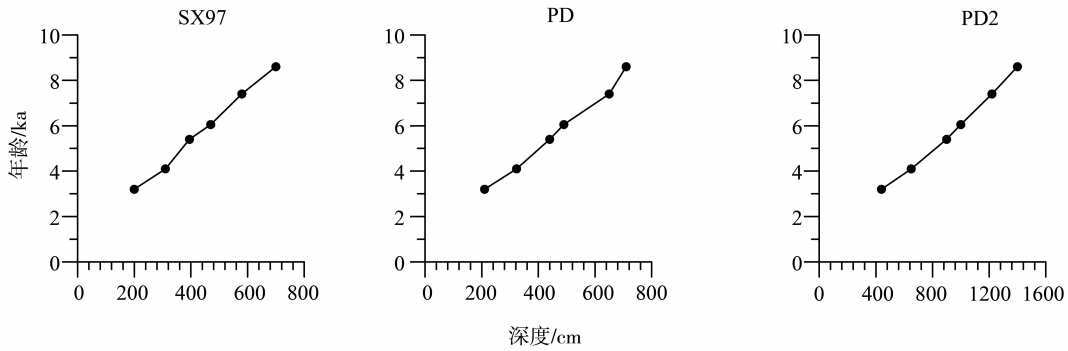


图 6 钻孔 SX97, PD 以及 PD2 年龄 - 深度模型

Fig. 6 The age-depth model for cores SX97, PD and PD2

PD 钻孔详细的岩石磁学结果表明沉积物磁化率和饱和等温剩磁 (SIRM) 值的增大, 归因于磁铁矿浓度的增加^[27]。更高 SIRM/ κ 的比值反映了细粒磁性矿物组分的增加, 与由于水深的增加而导致的水动力条件的减弱相关。最显著的 SIRM/ κ 峰值一般为灰黑色粘土沉积的特征, 向上粒度变粗, 含有有孔虫遗体。因此 SIRM/ κ 的波动可能反映了海侵与海退过程^[27]。 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 同样也是磁性矿物粒度的指标, 与 SIRM/ κ 相比总体趋势两者相似, 但其变

化频率更为显著, 对磁铁矿浓度的变化更为敏感。由此推测, 磁性参数 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 反映了磁铁矿粒度的变化, 也可以作为反映海平面变化的替代性指标。

因此, 我们认为钻孔 PD $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 比值的旋回式变化, 响应于海平面的升降过程^[27]。钻孔 PD 的磁化率和 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$, 以及 PD2 磁化率值随时间的变化如图 7 所示。在图中, 磁化率的变化与 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 并不总是表现出严格的一致, 这归因于磁化率对磁性矿物浓度的变化更为敏感。

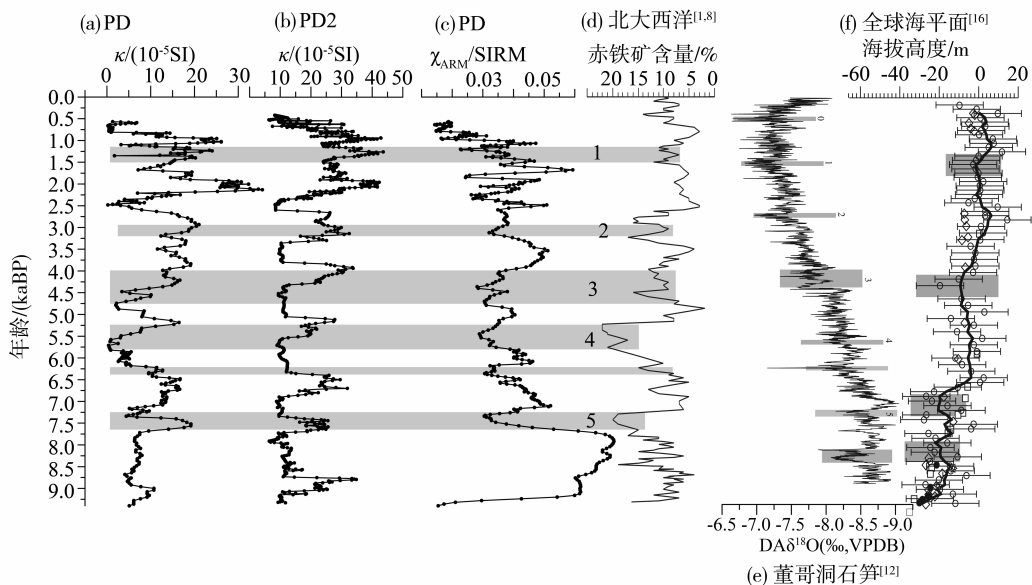


图 7 珠江三角洲海平面变化与全球气候变化之间的联系。 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 的低值代表了较低的海平面时期。图中灰色条带代表可以与气候变化相联系的高频海平面变化

Fig. 7 Susceptibility variations of cores PD and PD2 and $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ parameter in core PD dated according to the age-depth model of Figure 5 and compared to hematite-stained grains fraction in the North Atlantic (MC52-VM29-191) (gray bars, the high fraction represents the more drift ice and the cold events (1-4))^[1,8], Asian monsoon precipitation^[12] and global marine curve^[16]

从替代性指标 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 反映的海平面变化分析, 与其它区域的海平面变化规律基本相似, 代表了珠江三角洲区域约 9 ka 以来百年尺度的海平面变化过程^[14-19]。该区域初次海侵发生在约 9.2 ka, 最大海侵时期在约 9.1 ~ 7.7 ka 之间, 该时期也是季风降雨最大时期^[6]。但是, 并没有发现全球性的 ~8.2 ka 变冷事件对应的记录。在最大海侵之后, $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 开始减小, 表现出旋回式变化特征。主要的海平面变化分别发生在 1.2 ~ 1.5, 3.0 ~ 3.2, 4.0 ~ 4.75, 5.25 ~ 5.75, 6.2 ~ 6.3 和 7.25 ~ 7.75 ka BP (图 7), 与北大西洋赤铁矿颗粒表示的冰筏事件相一致^[8]。同时在时间误差允许范围之内, 也与石笋记录表示的季风减弱事件具有一致性^[11-12]。

在构造基本稳定的前提下, 全球海平面的变化很大程度归因于全球冰量的变化^[16], 冰期/间冰期的转换导致非常显著的海平面升降。因此, 全新世以来海平面变化的长期趋势与气候变化一致, 这是无可争议的。但是, 在百年 - 千年时间尺度, 海平面波动的驱动机制存在诸多不确定性因素, 如区域海平面的波动由于地壳抬升或下降, 将导致更为复杂的结果。因此, 在不同海域以不同的替代性指标推断而出的海平面变化曲线具有较大的差异性, 很难与全球变化相联系^[14-16, 19]。在我们的研究中, 尽管没有直接的证据表明珠江三角洲区域海平面的变化响应于古气候变化历史, 但是替代性指标 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 与北大西洋赤铁矿颗粒含量的同步变化趋势, 以及 ~8 ka 和 ~7 ka 高海平面与强的季风降雨导致更多的淡水注入同步^[26], 表明在珠江三角洲高频的海平面波动与全球气候变化之间存在紧密联系。

6 结 论

1) 珠江三角洲旋回沉积学分析为进行不同区域钻孔地层对比提供良好的工具, 每个沉积旋回反映了沉积环境的变化过程。

2) 基于沉积物记录的地球磁场长期变化曲线, 可以为三角洲沉积物提供区域可对比的年代学框架。

3) 以环境磁学参数 $\chi_{\text{ARM}}/\text{SIRM}$ 为替代性指标来反映高频海平面的波动, 可以发现 6 次明显的低海平面时期和两次高海平面时期与全球气候同步变化的规律。

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]. *Science*, 1997, 278: 1257 - 1266.
- [2] ALLEY R B, MAYEWSKI P A, SOWERS T, et al. Holocene climatic instability: a prominent, widespread event 8200 yr ago [J]. *Geology*, 1997, 25: 483 - 486.
- [3] KUREKA J, CWYNARA L C, SPEAR R W. The 8200 cal yr BP cooling event in eastern North America and the utility of midge analysis for Holocene temperature reconstructions [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 627 - 639.
- [4] WANG L J, SAMTHEIN M, ERLLENKEUSER H, et al. Holocene variations in Asian monsoon moisture: a bidecadal sediment record from the South China Sea [J]. *Geophysical Research Letters*, 1999, 26(18): 2889 - 2892.
- [5] HALL I R, BIANCHI G G, EVANS J R. Centennial to millennial scale Holocene climate-deep water linkage in the North Atlantic [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2004, 23: 1529 - 1536.
- [6] DYKOSKI C A, EDWARDS R L, CHENG H, et al. A high-resolution, absolute-dated Holocene and deglacial Asian monsoon record from Dongge Cave [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2005, 233: 71 - 86.
- [7] ANDRESEN C S, BOND G, KUIJPERS A, et al. Holocene climate variability at multidecadal time scales detected by sedimentological indicators in a shelf core NW off Iceland [J]. *Marine Geology*, 2005, 214: 323 - 338.
- [8] BOND G, KROMER B, BEER J, et al. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene [J]. *Science*, 2001, 294: 2130 - 2136.
- [9] AGNIHOTRI R, DUTTA K, BHUSHAN R, et al. Evidence for solar forcing on the Indian monsoon during the last millennium [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2002, 198: 521 - 527.
- [10] HU F S, KAUFMAN D, YONE JI S, et al. Cyclic Variation and Solar Forcing of Holocene Climate in the Alaskan Subarctic [J]. *Science*, 2003, 301: 1890 - 1893.
- [11] 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 [J]. *Nature*, 2003, 421: 354 - 357.
- [12] 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.
- [13] SELVARAJ K, CHEN C T A, LOU J Y. Holocene East Asian monsoon variability: Links to solar and tropical Pacific forcing [J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L01703.
- [14] FLEMING K, JOHNSTON P, ZWARTZ D, et al. Refining the eustatic sea-level curve since the Last Glacial Maximum using far- and intermediate-field sites [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 1998, 163: 327 - 342.

- [15] BAXTER A J, MEADOWS M E. Evidence for Holocene sea level change at Verlorenvlei, Western Cape, South Africa [J]. *Quaternary International*, 1999, 56: 65 – 79.
- [16] SIDDALL M, ROHLING E J, ALMOGI-LABIN A, et al. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle [J]. *Nature*, 2003, 423: 853 – 858.
- [17] KAPLIN P A, SELIVANOV A O. Lateglacial and Holocene sea level changes in semi-enclosed seas of North Eurasia: examples from the contrasting Black and White Seas [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2004, 209: 19 – 36.
- [18] LAMPE R. Lateglacial and Holocene water-level variations along the NE German Baltic Sea coast: review and new results [J]. *Quaternary International*, 2005, 133 – 134: 121 – 136.
- [19] BENTLEY M J, HODGSON D A, SMITH J A, et al. Relative sea level curves for the South Shetland Islands and Marguerite Bay, Antarctic Peninsula [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24: 1203 – 1216.
- [20] WOODROFFE S A, HORTON B P. Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2005, 25: 29 – 43.
- [21] ZONG X Q, HUANG H Y, YU F L, et al. The role of sea-level rise, monsoonal discharge and the palaeo-landscape in the early Holocene evolution of the Pearl River delta, southern China [J]. *Quaternary Science Reviews*, 2012, 54(26): 77 – 88.
- [22] 余素华, 杨晓强, 周厚云, 等. 深圳湾北岸新民孔的 $Q_3^3 - Q_4^1$ 气候记录 [J]. *海洋地质与第四纪海洋地质*, 1999, 19(4): 109 – 113.
- [23] 周厚云, 郭国章, 余素华. 从 SX97 孔矿物特征看气候环境变化的河流响应 [J]. *矿物学报*, 2000, 20(3): 257 – 263.
- [24] 杨小强, 李华梅, 余素华. 从 SX97 孔分析深圳沿海近 3 万年来海平面及气候变迁 [J]. *地球化学*, 2003, 32(2): 146 – 154.
- [25] 张伟强, 黄镇国. 珠江三角洲晚第四纪气候波动的新认识 [J]. *热带地理*, 2005, 25(4): 298 – 321.
- [26] ZONG Y, HUANG G, SWITZER A D, et al. An evolutionary model for the Holocene formation of the Pearl River delta, China [J]. *The Holocene*, 2009, 19(1): 129 – 142.
- [27] YANG X Q, GRAPES R, ZHOU H Y, et al. Magnetic properties of sediments from the Pearl River delta, South China: Paleoenvironmental implications [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2008, 51(1): 56 – 66.
- [28] 宋方敏, 汪一鹏, 李传友, 等. 珠江三角洲部分断裂晚第四纪垂直位移速率 [J]. *地震地质*, 2003, 25(2): 203 – 210.
- [29] 刘春莲, Franz T Fürsich, 董艺辛, 等. 珠江三角洲 PRD05 孔的高分辨率介形类记录与晚第四纪古环境重建 [J]. *古地理学报*, 2008, 10(3): 313 – 322.
- [30] YIM W W S. Radiocarbon dating and the reconstruction of late Quaternary sea-level changes in Hong Kong [J]. *Quaternary International*, 1999, 55: 77 – 91.
- [31] LOVLIE R, SVENDSEN J I, MANGERUD J. High-latitude Holocene paleosecular variation and magneto-stratigraphic correlation between two lakes on Spitsbergen (78°N) [J]. *Physics of Earth and Planetary Interiors*, 1991, 67: 348 – 361.
- [32] LUND S P. A comparison of Holocene paleomagnetic secular variation records from North America [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(B4): 8007 – 8024.
- [33] SNOWBALL I, SANDGREN P. Geomagnetic field variation in northern Sweden during the Holocene quantified from varved lake sediments and their implications for cosmogenic nuclide production rates [J]. *The Holocene*, 2002, 12(5): 517 – 530.
- [34] GUILLAUME S O, JOSEPH S S, CLAUDE H M. Holocene paleomagnetic records from the St. Lawrence Estuary, eastern Canada: centennial to millennial-scale geomagnetic modulation of cosmogenic isotopes [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2003, 209: 113 – 130.
- [35] ALI M, ODA H, HAYASHIDA A, et al. Holocene palaeomagnetic secular variation at Lake Biwa, central Japan [J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 136: 218 – 228.
- [36] YANG X Q, FRIEDRICH H, YANG J, et al. Paleosecular variations since ~9000 yr BP as recorded by sediments from maar lake Shuangchiling, Hainan, South China [J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2009, 288: 1 – 9.
- [37] HYODO M, YOSHIHARA A, KASHIWAYA K, et al. A Late Holocene geomagnetic secular variation record from Erhai Lake, Southwest China [J]. *Geophysical Journal International*, 1999, 136: 784 – 790.