

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2018042801

珠江三角洲中部全新世以来的微体动物群记录与古环境重建

吴月琴¹, 刘春莲^{1,2}, 杨小强¹, 黄毅^{3,4}, 殷鉴^{1,2}, 张恺¹

1. 中山大学地球科学与工程学院, 广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广州 510275

2. 广东省地质过程与矿产资源探查重点实验室, 广州 510275

3. 自然资源部南海规划与环境研究院, 广州 510300

4. 自然资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075

摘要:通过分析珠江三角洲中部钻孔沉积物的微体动物群(有孔虫和介形类)组成和分布特征, 结合测年、岩性、沉积物粒度和软体动物群数据, 重建了珠江三角洲中部全新世以来的古环境演化。受末次冰期影响, 珠江三角洲地区暴露地表遭受风化剥蚀, 普遍发育杂色黏土。随着冰后期气候回暖, 海平面快速回升, 海水经多个口门自南向北侵入珠江三角洲地区。南部较早接受海侵, 约 9010 cal.aBP 海水入侵至中部地区, 研究区开始发育河口湾环境, 并持续至 4510 cal.aBP。期间, 钻孔记录的微体动物群组成和丰度特征反映了 2 次短周期的水体条件波动, 最大水深发生于约 7000~5630 cal.aBP, 微体动物群的丰度达到最高值。约 4510 cal.aBP 以来为持续海退期, 河流作用逐渐增强, 发育三角洲平原环境。

关键词:有孔虫; 介形类; 全新世; 古环境; 珠江三角洲

中图分类号:P736.21

文献标识码:A

Holocene microfaunal records in the central Pearl River Delta and implications for palaeoenvironmental changes

WU Yueqin¹, LIU Chunlian^{1,2}, YANG Xiaoqiang¹, HANG Yi^{3,4}, YIN Jian^{1,2}, ZHANG Kai¹

1. School of Earth Sciences and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resource Exploration, Guangzhou 510275, China

2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Mineral Resources and Geological Processes, Guangzhou 510275, China

3. South China Sea Institute of Planning and Environmental Research, SOA, Guangzhou 510300, China

4. Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Natural Resources, Guangzhou 510075, China

Abstract: Holocene palaeoenvironmental reconstruction was carried out with the data of microfauna (foraminifers and ostracods), AMS¹⁴C dating, sediment grain size distribution, and molluscs, from a borehole drilled in the central Pearl River Delta. During the last glacial maximum, the whole Pearl River mouth was exposed and suffered subaerial weathering, suggested by a layer of extensively distributed mottled clay. A rapid relative sea level rising occurred with the warming of climate during Early Holocene. The marine water intruded into the deltaic area, firstly from the eight south entrances. At about 9010 cal.aBP, marine waters arrived at the central part of the deltaic area. Since then, the study area has become an estuarine environment under water until ~4510 cal.aBP. During the transgression, there were two short-terms of environmental fluctuations recorded by microfauna. The peak of transgression occurred in the time interval from ~7000 to 5630 cal.aBP marked by the highest microfaunal abundance. Since 4510 cal.aBP, however, marine influence weakened and an alluvial plain developed in the central Pearl River Delta area.

Key words: foraminifers; ostracods; Holocene; palaeoenvironment; Pearl River Delta

有孔虫和介形类是重建古环境极为有效的指标, 作为河口三角洲环境中重要的生物类群, 因其化

资助项目:国家海洋局南海分局海洋科学技术局长基金(1604)、国土资源部海底矿产资源重点实验室基金(KLMMR-2015-B-04)联合资助项目“珠江口黄茅海河口底质沉积特征与沉积环境研究”

作者简介:吴月琴(1993—), 女, 博士研究生, 主要从事海洋地质学和微体古生物研究, E-mail: Wuyq9@mail2.sysu.edu.cn

通讯作者:刘春莲(1956—), 女, 博士, 教授, 主要从事地层古生物学与新生代古环境学研究, E-mail: eeslcl@mail.sysu.edu.cn

收稿日期:2018-04-28; **改回日期:**2018-07-10. 蔡秋蓉编辑

石和现代类型数量丰富、生态适应范围广、对水深和盐度等环境因素敏感的特点,被广泛用于分析河口三角洲的环境^[1-3]。珠江三角洲地区处于海陆过渡地带,对气候与环境变化十分敏感,晚第四纪沉积物中富含孔虫和介形类,沉积记录保存良好,为研究晚第四纪环境演化提供了有利的条件。该地区晚第四纪受多组断裂运动的控制,不同构造单元的垂直升降具有明显的差异性^[4-8],现代珠江河口由复杂的河网水系区和河口湾区组合而成,两者通过地貌单元“门”相互连接^[9]。虽然前人已有过涉及利用孔虫和介形类这两类微体生物重建珠江三角洲第四纪古环境的研究^[10-25],但珠江三角洲中部地区全新世以来的钻孔沉积记录大多不完整^[16, 21, 22, 24],加之珠江三角洲地区独特的构造背景和复杂的“门”动力系统的影响,不同钻孔的研究结果在对珠江三角洲全新世海侵的起止时间和过程等方面,仍存在不少争议^[26-28]。据前人研究,中部地区不同钻孔沉积记录的全新世海侵开始的时间不一,主要表现为2种观点:9000 cal. aBP左右^[22, 29, 30]和7600 cal. aBP左右^[20, 24]。此外,珠江三角洲2500 aBP以来是否存在一次海侵事件^[27, 31, 32],也是各位学者的分歧之一。位于珠江三角洲中部的PRD11孔较为完整地记录了全新世以来的沉积,为识别短周期环境变化提供了有利的条件。本文对PRD11孔的有孔虫和介形类微体动物群记录进行了详细分析,综合课题组前期已获得的年代框架和软体动物群数据^[33],并与同处珠江三角洲中部地区且全新世沉积记录较为完整的PRD10孔^[19]进行对比,重建了珠江三角洲中部地区全新世以来的古环境演变过程,并探讨了海平面变化、河流作用以及构造升降对环境变化的可能影响,以期为深入研究珠江三角洲第四纪环境演化提供依据。

1 材料与方法

钻孔PRD11位于珠江三角洲中山市东升镇(22°37'58"N、113°16'58"E)(图1),地面高程2.612m,孔深13.76m。在孔深13.76~1.05m的岩心中共取92个样品用于微体生物研究,取样间隔一般为10cm,每个样品大约对应于3cm长的岩心。样品在70℃温度下烘干后称重并记录,加水浸泡使样品分散后,用0.063mm铜筛在水下冲筛,保留全部筛上物。黏土质含量较高、较难分散的样品适当加热后再冲筛。过筛后的样品在70℃下烘干,然后利用0.125mm的铜筛筛分出2个粒级,分别称重

并记录。最后,在Leica EZ4W体视显微镜下对有孔虫和介形类进行种属鉴定^[34-36]和统计,将有孔虫和介形类的丰度统一表达为每100g干样中的含量,简单分异度表达为样品中出现的属种数目。沉积物粒度分析和年代测定方法见刘纯瑶等^[33]。



图1 研究区及钻孔位置

Fig.1 The study area and location of boreholes

2 结果

2.1 岩性与测年

将PRD11孔岩心从中间剖开,根据对岩性、沉积构造及其他组分(包括软体动物壳体及其碎片、植物碎屑和结核等)特征的详细观察和分析,结合粒度分析结果,可将全孔岩心划分为7层(图2):13.76~12.10m为杂色黏土;12.10~9.56m为深灰色黏土质粉砂与粉砂质黏土互层;9.56~8.68m为深灰色粉砂质砂;8.68~4.66m为深灰色黏土质粉砂或粉砂与黏土互层;4.66~3.50m为深灰、灰黑色粉砂质砂;3.50~1.13m为灰色、灰黄色黏土质粉砂;顶部为人工扰动层,主要为粗砂和砾石。PRD10孔岩性特征见Alberti等^[19]。

PRD11孔共获得10个¹⁴C年龄校正值^[33],在孔深13.5m处获得最老年龄值为≥20000 aBP,可推测属于晚更新世。孔深11.48和孔深1.35m处测定的年龄值校正后分别为8620和390 cal. aBP,属于全新世沉积。岩心中除年代测定点外,其他各

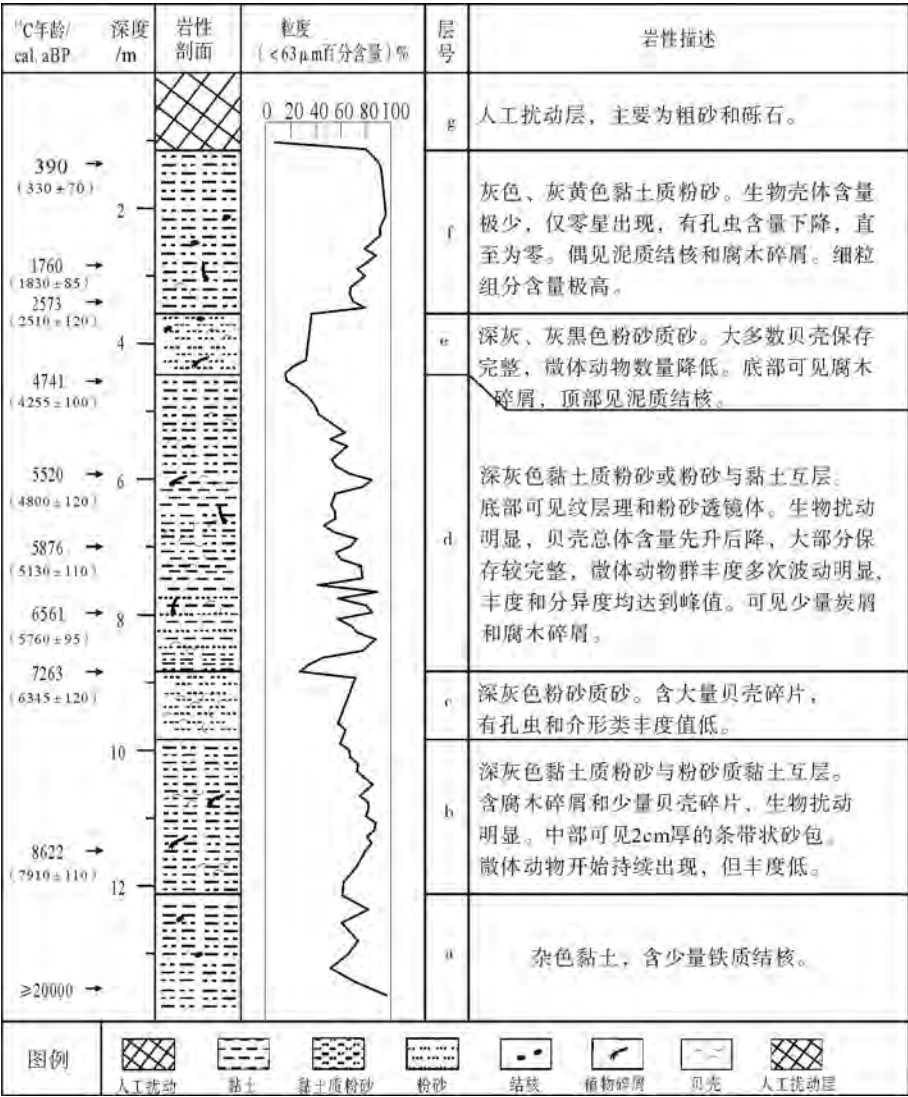


图 2 PRD11 孔岩性特征(据文献[33])
Fig 2 Lithological characteristics of borehole PRD11

深度年龄根据沉积速率进行插值计算。PRD10 孔共获得 17 个¹⁴C 年龄校正值,孔深 21.6m 处测定得到最老年龄值 9524 cal.aBP,亦属于全新世沉积,其他深度年龄根据 Alberti 等^[19]绘制的拟合曲线进行估算。本文均采用校正后年龄。

2.2 微体动物群分析

PRD11 孔微体动物群主要属种分布见图 3。经鉴定,共见有孔虫 11 属 18 种,介形类 14 属 17 种,其中部分属种仅零星出现。有孔虫和介形类的主要属种见图 4。有孔虫和介形类的丰度随深度变化的分布特征大体上相似。底部较粗粒沉积物中未见微体动物群,自孔深 11.75m 处开始同时出现有孔虫和介形类,孔深 8.54~5.33m 有孔虫很丰富,平均

丰度值为 5372 枚/100g,最大丰度值可达 18376 枚/100g。介形类主要集中在孔深 11.75~10.98 和 8.54~6.23m 2 个岩心段,平均丰度值分别为 300 瓣/100g 和 164 瓣/100g。孔深 5.06m 以上微体动物群变得稀少,孔深 4.46m 以上未见介形类,孔深 2.72m 以上未发现孔虫。

根据微体动物群各属种的生态特征可以将其划分为不同的生态类型,通过分析不同生态类型微体动物群的分布可重建钻孔所在地的古环境条件^[37-39]。刘春莲等曾对珠江三角洲地区第四纪微体生物的生态类型进行了划分^[40],本文亦采用这一划分方法。

2.2.1 有孔虫

PRD11 孔共发现有孔虫 11 属 18 种,其中包括

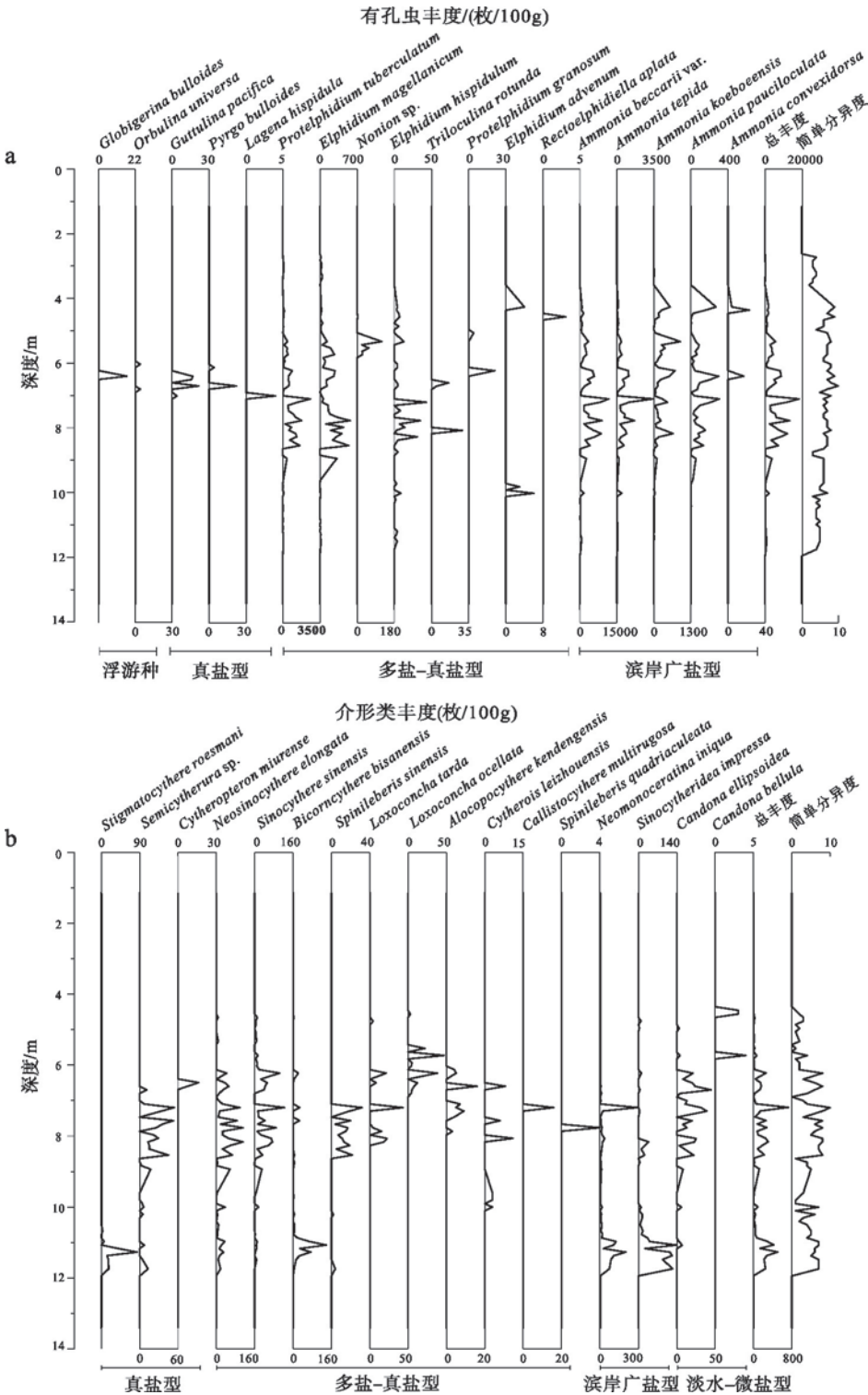


图 3 PRD11 孔微体动物群分布

a: 有孔虫; b: 介形类

Fig 3 Microfaunal distribution of borehole PRD11

a: foraminifera; b: ostracods

底栖有孔虫 9 属 16 种: *Elphidium advenum*、*E. hispidulum*、*E. magellanicum*、*Protelphidium tuberculatum*、*P. granosum*、*Guttulina pacifica*、*Nonion sp.*、*Triloculina rotunda*、*Rectoelphidiella aplata*、*Pyrgo bulloides*、*Lagenella hispidula*、*Ammonia beccarii* var.、*A. tepida*、*A. koeboensis*、*A.*

convexidorsa 和 *A. pauciloculata*, 浮游有孔虫 2 属 2 种: *Globigerina bulloides* 和 *Orbulina universa*。浮游种在钻孔中仅零星见于 7.00~6.00m 处,在各

样品中丰度值均小于 50 枚/100g,可能是随海流搬运而来。根据 PRD11 孔底栖有孔虫的生态特征,可将其划分为 3 种生态类型:

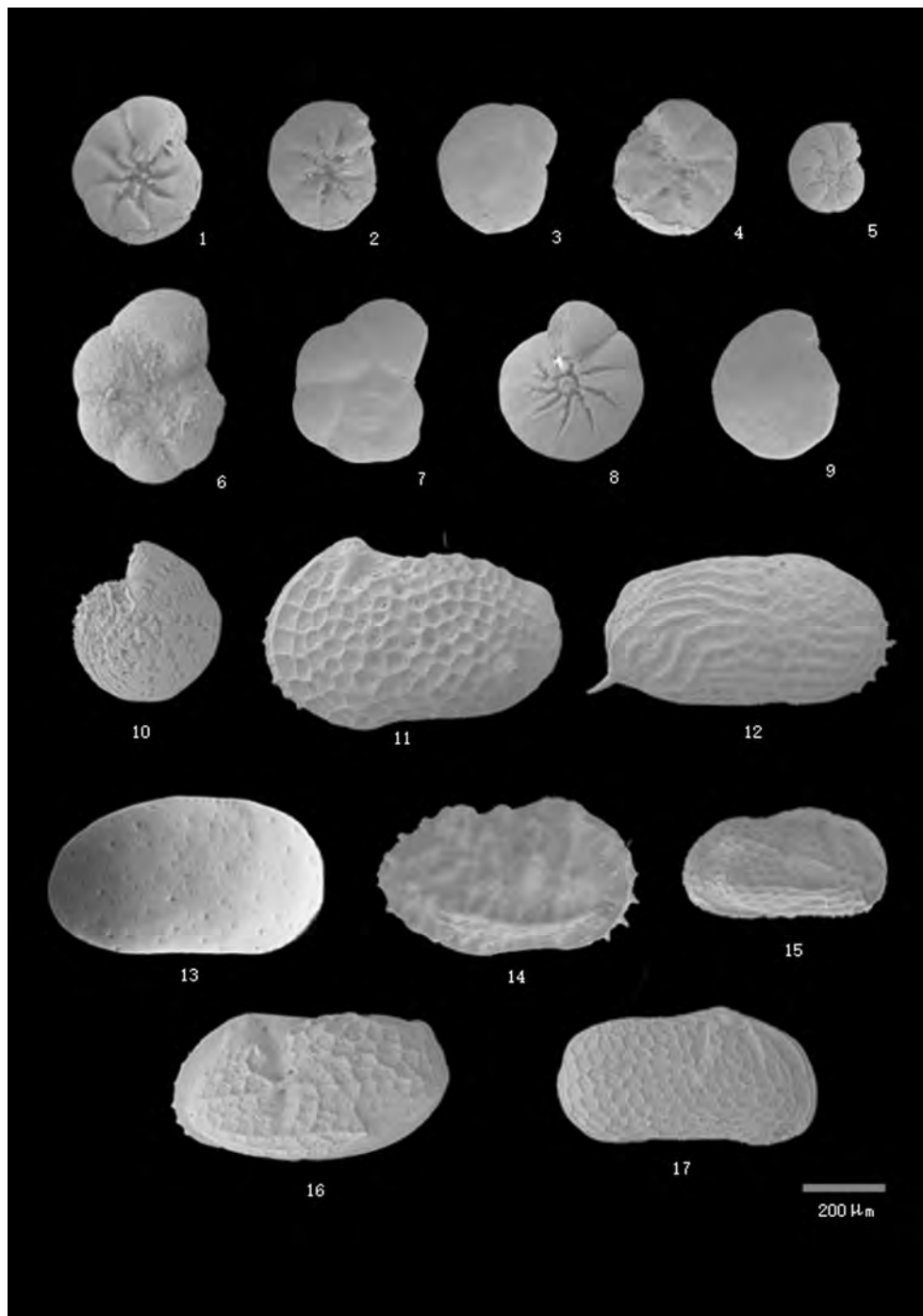


图 4 有孔虫和介形类主要属种

Fig 4 Characteristic foraminifers and ostracods of the study area

1~3. *Ammonia beccarii* var. (B47); 4. *A. pauciloculata* (B46); 5. *Protelphidium tuberculatum* (B46); 6,7. *A. tepida* (B46); 8,9. *A. koeboeensis*, (B47); 10. *Elphidium hispidulum* (B47); 11. *Alocopocythere kendengensis* (B41); 12. *Bicorncythere bisanensis* (B83); 13. *Sinocytheridea impressa* (B83); 14. *Stigmatocythere roesmani* (B80); 15. *Neosinocythere elongata* (B56); 16. *Neomonoceratina iniqua* (B80); 17. *Sinocythere sinensis* (B47)

(1)真盐型:常见于水体盐度大于30‰、深度大于50m的海域^[34, 41-43]。PRD11孔中主要包括 *Guttulina pacifica*、*Pyrgo bulloides* 和 *Lagena hispidula*。钻孔真盐型有孔虫分子丰度值极低,仅占钻孔有孔虫总丰度的0.047%。*Lagena hispidula* 在孔深7.00m处唯一可见,丰度值仅4枚/100g。*Pyrgo bulloides* 在孔深7.00m和6.13m处出露,丰度值分别为22枚/100g和4枚/100g。*Guttulina pacifica* 在孔深7.00~6.40m间断出露,平均丰度低于10枚/100g。推测钻孔中真盐型底栖分子应同浮游种一样,可能是随海流搬运而来。

(2)多盐—真盐型:常见于盐度大于25‰、水深20~50m的海域^[34, 41-43]。钻孔中主要有 *Elphidium advenum*、*E. hispidulum*、*E. magellanicum*、*Protelphidium tuberculatum*、*P. granosum*、*Nonion* sp.、*Triloculina rotunda*、*Rectoelphidiella aplata*。可见于孔深11.75~2.72m,丰度约为钻孔有孔虫总丰度的16%。该类型有孔虫分子平均丰度值在孔深8.64~7.10m和6.70~6.23m较高,分别可达1398和833枚/100g,并于孔深7.10m处达到最大值2684枚/100g。其中 *Elphidium magellanicum* 和 *Protelphidium tuberculatum* 这2个属种的总丰度占多盐—真盐型有孔虫总丰度值的98.12%,为该类型优势属种。其他属种在各样品中丰度值较低,均小于130枚/100g。

(3)滨岸广盐型:这一类型可适应的盐度范围最广,低盐(1‰)至正常盐度甚至高盐条件均可生存,水深分布范围约0~50m,多富集于20m以内的浅水水域^[34],是PRD11孔的主要有孔虫类型。钻孔中可见 *Ammonia beccarii* var.、*A. tepida*、*A. koelboensis*、*A. convexidorsa* 和 *A. pauciloculata*。这一类型在钻孔中相对含量约为83.9%,是PRD11孔的主要有孔虫类型。连续出现在孔深11.75~2.72m,丰度随深度变化的分布特征与多盐—真盐型有孔虫丰度的垂直分布特征相似,在孔深8.64~7.10和6.70~6.23m丰度值较高,于孔深7.20~7.10m达到丰度最大值12940枚/100g。其中, *Ammonia beccarii* var. 是世界上分布最广的滨岸广盐种,常见于滨海、潟湖、河口等海陆过渡环境^[35],也是钻孔的明显优势种,数量均占PRD11孔有孔虫总丰度的66.5%,在孔深7.10m处丰度达到最大值11651枚/100g。

2.2.2 介形类

对PRD11孔介形类所划分的4种生态类型中,

除淡水—微盐型外,其他3种生态类型与底栖有孔虫属种的生态类型可相对应^[34, 36, 44, 45]。

(1)真盐型:钻孔中主要有 *Stigmatocythere roesmani*、*Cytheropteron miurense*、*Semicytherura* sp.。各属种在孔深11.75~6.50m间断出现,含量较低,丰度一般小于60瓣/100g,数量约占钻孔丰度值的9.65%。

(2)多盐—真盐型:PRD11孔中主要有以下10种属于该类型:*Bicorncythere bisanensis*、*Alocopocythere kendengensis*、*Sinocythere sinensis*、*Neosinocythere elongata*、*Spinileberis sinensis*、*Loxoconcha tarda*、*L. ocellata*、*Cytherois leizhouensis*、*Callistocythere multirugosa*、*Spinileberis quadriaculeata*。可见于孔深11.75~4.56m,数量约为钻孔总丰度的50.8%,在孔深8.64~7.10m丰度值较高,平均丰度为123瓣/100g,在孔深7.20m处,丰度值达到最大,约346瓣/100g。其中,*Sinocythere sinensis* 和 *Neosinocythere elongata* 为该类型的优势属种,丰度值约为该类型总丰度的67.04%。*Bicorncythere bisanensis*、*Alocopocythere kendengensis*、*Spinileberis sinensis*、*Loxoconcha tarda*、*L. ocellata* 和 *Cytherois leizhouensis* 丰度值较低,一般小于50瓣/100g。*Callistocythere multirugosa* 仅见于孔深7.20m处,*Spinileberis sinensis* 仅见于孔深7.77m处,二者丰度值均极低,分别为16瓣/100g和4瓣/100g。

(3)滨岸广盐型:钻孔中可见 *Sinocytheridea impressa* 和 *Neomonoceratina iniqua* 2个属种。这2个属种间断分布于孔深11.75~4.76m,占钻孔丰度值的33.4%,在孔深11.75~10.98m和孔深7.20m处丰度值较高,平均丰度分别为195和294瓣/100g。

(4)淡水—微盐型:是一类主要生活在淡水环境,也可忍受微盐条件的介形类^[34, 46]。钻孔中主要为 *Candona bellula* 和 *C. ellipsoidea*。在钻孔中丰度较低,相对含量仅为6.15%,且多为异地搬运的红色或黑褐色壳体,PRD11孔于孔深5.83~5.33m才见有原地埋藏的淡水—微盐型介形类。

3 古环境重建

根据上述PRD11孔岩性、测年和微体动物群分布特征,结合PRD11孔软体动物群数据^[33]及PRD10孔微体动物群的研究结果^[19],将研究区全新世以来的沉积环境阶段划分如下(图5)。

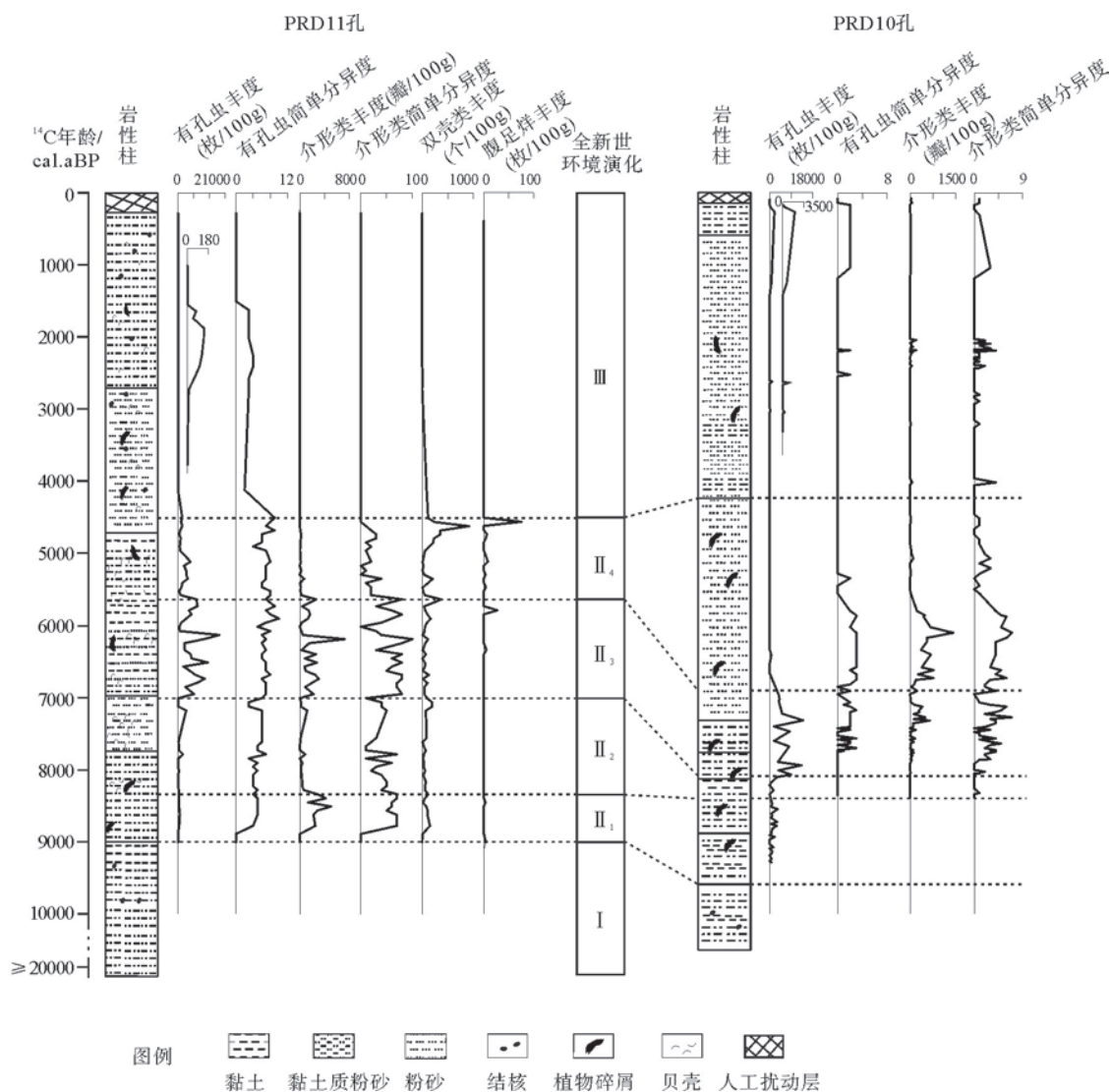


图 5 珠江三角洲 PRD11 孔与 PRD10 孔演化阶段划分及对比

Fig 5 Environmental stages of boreholes PRD11 and PRD10 in the Pearl River Delta

3.1 约 9010 cal.aBP 以前 (孔深 13.76~12.1m)

PRD11 孔底部和 PRD10 孔底部岩性表现为杂色黏土, PRD10 孔沉积物中可见小铁瘤, 指示钻孔此时应处于氧化环境。两钻孔均未见微体生物记录, 仅 PRD10 孔零星可见双壳类 *Cyrenodonax formosana*, 壳体呈黄褐色, 遭受过风化作用。上述各项指标均表明 PRD11 孔和 PRD10 孔所在地此时处于风化剥蚀阶段。杂色黏土上覆地层的最老年龄在 PRD11 孔约为 9010 cal.aBP, 在 PRD10 孔约为 9590 cal.aBP。受末次冰期的影响, 全球海平面下降。陈欣树等认为, 珠江口外陆架海平面低于现今海面 131m^[47], 沉积物露出地表遭受剥蚀从而形成风化层。珠江三角洲乃至整个南海北部陆架第四纪沉积物中均可见杂色黏土层^[17, 18, 20, 21, 24, 27, 29, 30, 48, 49]。

3.2 约 9010~4510 cal.aBP (孔深 12.1~4.26m)

随着冰后期全球气候回暖, 海平面快速上升, PRD11 孔和 PRD10 孔所在地开始受到全新世海侵的影响, 海水浸没风化层的时间分别为 9010 和 9590 cal.aBP, 钻孔中开始出现微体动物和软体动物群记录。2 个孔所在地接受海侵的时间差异不大, 2 个钻孔均位于珠江三角洲中部, 佐证了前人所持“珠江三角洲中部于 9000 cal.aBP 左右开始接受全新世海侵”的观点^[22, 29, 30], 全新世海侵也于这一时期达到香港附近^[50]。

根据位于珠江三角洲南部的 PRD05 孔 (图 1) 的沉积记录, 南海冰后期海平面回升早于 16700 cal.aBP^[40], 珠江三角洲南部地区接受全新世海侵的时间约为 10100 cal.aBP, 早于研究区。位于珠江三角

洲中部偏北的 PRD16 孔和 PRD20 孔(图 1)风化层被海水淹没的时间分别为 7960^[20] 和 7570 cal.aBP^[24], 晚于研究区。晚更新世末至早全新世, 珠江口断裂带和西江断裂斗门段的活动增强, 西江干流自南向北形成, 磨刀门水道成形, 狮子洋水道逐渐打开, 全新世海水自多个口门侵入^[8, 9, 47, 51, 52], 珠江三角洲南部地区更早受到全新世海侵的影响。而同处珠江三角洲中部的 PRD17 孔(图 1)的风化层全新世被海水淹没的时间约为 6000 cal.aBP^[21], 晚于中部其他地区。已有研究证明, 珠江三角洲晚第四纪各个断块之间存在构造升降的垂直差异, PRD17 孔所在的广州—番禺断块早全新世的平均抬升速率远超其他各区^[6], 正是这种差异导致 PRD17 孔所在地地势较高, 较晚接受全新世海侵。PRD11 孔和 PRD10 孔的沉积记录表明, 研究区自 9010 cal.aBP 接受全新世海侵以来, 至 4510 cal.aBP 持续发育河口湾环境。期间, 水体条件发生波动, 使得微体动物群的组成和丰度发生了改变, 通过对 PRD11 孔微体动物群高分辨率的取样和分析, 识别出了 2 个短周期的水深波动。

3.2.1 约 9010 ~ 8330 cal. aBP (孔深 12.10 ~ 10.98m)

随着海水入侵, 钻孔中开始出现微体动物和软体动物群记录, 分异度较高, PRD11 孔优势种为滨岸广盐型分子, 如有孔虫 *Ammonia beccarii* var.、*A. tepida*, 介形类 *Sinocytheridea impressa*、*Neomonoceratina iniqua* 及双壳类 *Potamocorbula amurensis*。PRD10 孔 9510 ~ 8400 cal.aBP 以滨岸广盐型有孔虫占优势地位, 软体动物分异度达钻孔最大值。各生物壳体较高的分异度表明此时研究区水深呈快速增加的趋势。随着水深加大, 2 个钻孔所在地出现介形类真盐型和多盐—真盐型分子, 且多盐—真盐型分子的丰度值在 2 个钻孔中呈逐渐增加的趋势, 反映水深快速增加的河口湾环境。前人对珠江三角洲 8ka 以来的海平面变化特征进行研究发现, 珠江三角洲早全新世海平面呈快速上升的趋势^[14, 53], 红海^[54]、泰国^[55]、加勒比海^[56]等全球各地均可见早全新世海平面快速上升的证据。珠江三角洲中部的 PRD11 孔和 PRD10 孔该时期的沉积记录所呈现的特征, 与珠江三角洲早全新世海平面快速上升的结论相吻合, 可为全球海平面变化特征的研究提供新的依据。

3.2.2 约 8330 ~ 7000 cal. aBP (孔深 10.98 ~ 8.64m)

PRD11 孔有孔虫丰度值较低, 平均丰度值为

549 枚/100g。优势种仍为滨岸广盐型分子 *Ammonia beccarii* var. 和 *A. tepida*, 零星出现多盐—真盐分子。介形类平均丰度下降至 30 瓣/100g, 最大值仅 120 瓣/100g, 最小值为 3 瓣/100g。代表较长期的水深缓慢下降过程。曾有学者认为, 约 8000 ~ 7000aBP, 南海海平面变化处于停滞状态^[17, 40, 57], 钻孔识别出的较长期水深下降过程可能与这一海面停滞状态相对应。PRD11 孔约 7170 cal.aBP (孔深 8.94m 处) 左右, 发育砂质沉积物, 微体生物壳体分异度波动较大。PRD10 孔于 7800 ~ 7560 cal.aBP 可见大量软体动物碎片和粗粒沉积物。表明该阶段后期研究区的水动力条件较强。珠江三角洲西岸的沉积记录中可见相应响应, 约 8960 ~ 6585 cal.aBP 沉积物粒度频率曲线可见砂粒级的双主峰^[23]。推测是受风暴的影响, 水动力条件发生短暂变化^[58, 59]。

3.2.3 约 7000 ~ 5630 cal. aBP (孔深 8.64 ~ 6.23m)

PRD11 孔微体动物群的丰度高, 分异度大, 有孔虫的平均丰度值为 6426 枚/100g, 分异度一般大于 6, 优势属种为滨岸广盐分子 *Ammonia beccarii* var. 和 *A. tepida*。介形类的平均丰度值为 164 瓣/100g, 分异度一般大于 5, 优势属种为多盐—真盐分子 *Sinocythere sinensis* 和 *Neosinocythere elongata*。钻孔中有孔虫和介形类的丰度在 6180 ~ 6120 cal.aBP(孔深 7.20 ~ 7.10m) 达到全孔最大值, 最大丰度值分别为 18376 枚/100g(孔深 7.10m 处) 和 726 瓣/100g(孔深 7.20m 处)。滨岸广盐型介形类和有孔虫以及多盐—真盐型有孔虫在这一时期丰度值也达到最大, 真盐型介形类和广适性双壳类丰度值很高。有孔虫浮游种 *Orbulina universa*, 多盐—真盐分子 *Triloculina rotunda*, 介形类多盐—真盐型分子 *Alocopocythere kendengensis*、*Loxoconcha tarda*、*Spinileberis sinensis*、*Callistocythere multi-rugosa* 在钻孔中首次出现。PRD10 孔的微体动物和软体动物群记录也于 7560 ~ 6800 cal.aBP 达到丰度最大值, 有孔虫真盐型分子 *Quinqueloculina seminula* 仅在本阶段出现。推测此时海平面进一步上升, 研究区水深达到最大, 水体盐度较高。可能对应了珠江三角洲全新世最大海侵事件^[14, 15, 17, 27, 40, 53, 57]。此外, PRD11 孔沉积物中可见介形类淡水—微盐型分子 *Candona ellipsoidea*, 丰度值随深度的变化大, 平均丰度值为 7 瓣/100g, 壳体多为异地搬运的红色和黑褐色分子, 推测研究区同时受到较大的径流作用影响, 温暖湿润的气候

保证了充足的降水^[60]。

根据 PRD11 孔和 PRD10 孔的沉积记录,珠江三角洲中部地区全新世以来的最大水深发生在约 7000~5630 cal.aBP,与研究区其他钻孔记录的时间较为一致^[22, 61]。本文这一结果与前人所认为的大西洋期海侵事件的时间(7500~5000 aBP)^[51, 62]有较好的吻合,也可与珠江三角洲四会古森林发育的时间相比较,温暖湿润较为稳定的气候为发育古森林地下生态系统提供了条件^[60]。距离海岸较近的珠江三角洲南部(PRD05 孔)约 8500~8200 cal.aBP 水深达到最大^[17, 40],早于研究区。这种自南而北水深依次达到最大的规律,可进一步论证珠江三角洲南部较北部更早受到海侵影响。

3.2.4 约 5630~4510cal.aBP (孔深 6.23~4.26m)

2 个钻孔岩性表现为粉砂和黏土质粉砂,可见平行层理。PRD11 孔沉积物中有孔虫分异度较大,最大值可达 9,丰度较低,平均丰度值为 1991 枚/100g,优势属种为滨岸广盐分子 *Ammonia beccarii* var.。介形类在钻孔沉积物中间断可见,分异度和丰度均较低,平均丰度值为 12 瓣/100g,钻孔中首次出现原地埋藏的淡水—微盐型分子。微体动物群总丰度呈波动下降的趋势,软体动物群丰度达到钻孔最大值,双壳类最大丰度值为 906 个/100g(孔深 4.46m 处)。此阶段首次出现双壳类 *Corbicula fluminalis* 和 *Theora fragilis*,腹足类可见 *Decorifera insignis*、*Pyramidellid* sp.、*Cerithidium* sp.、*Morrisonietta spiralis*,大多为生活在潮道或潮间带的分子,可推测钻孔所在地处于潮道附近,水深较浅。2 个钻孔微体动物和软体动物群总丰度垂直分布的小规模波动,可响应前人所持“全新世大海侵后,珠江三角洲发生多次小规模的水深变化”的观点^[15, 40, 63],推测是受小尺度的海平面变化和河流作用的共同影响,也有学者认为是海平面升降速率和沉积速率的共同作用导致这一变化^[54, 63, 64]。

珠江三角洲南部(PRD05 孔)约 5560 cal.aBP 开始发育上三角洲平原环境^[17, 40],中部偏北地区部分断块(PRD20 孔)约 5500 cal.aBP 为上三角洲平原发育阶段^[24],二者时间较为接近。已有研究表明,晚全新世,北、西江三角洲出现块断挠倾运动,北、西江三角洲出现自西向东的挠曲现象,而东江三角洲出现由东往西的挠曲现象^[65],三角洲的建造并非单一的自北向南,而是各区同时多向发育^[9, 66],其中,五桂山北部平原向东西两侧加积^[67],故而可解释珠江三角洲南部和中部偏北地区发育上三角洲平原沉积的时间早于 PRD11 孔和 PRD10 孔所在地。

3.3 约 4510 cal.aBP 以来(孔深 4.26m 以上)

PRD11 孔岩性表现为黏土质粉砂,孔深 4.26m 处沉积物中砂的含量较高。PRD10 孔于 4200~3200 cal.aBP 处发育粗砂沉积。推测这一时期研究区可能受到了风暴潮的短暂影响^[68]。PRD11 孔和 PRD10 孔均含较少的生物壳体,其中 PRD11 孔不含介形类和腹足类,双壳类仅零星可见,有孔虫主要为滨岸广盐型分子,丰度值极低,最大丰度值仅 133 枚/100g(孔深 2.92m),丰度变化整体呈下降趋势,直至孔深 2.72m 后,不再出现有孔虫。PRD10 孔可见少量广适性的双壳类 *Potamocorbula amurensis* 和 *Cyrenodonax formosana*,及有孔虫滨岸广盐型分子,生物壳体的丰度值均呈波动下降趋势。反映本阶段研究区仍受潮汐作用影响,随着河流作用增强,逐渐转为上三角洲平原相沉积。而珠江三角洲部分区域仍受较明显海侵的影响^[31, 32],如珠江三角洲中部偏北部分地区(PRD16 孔)于约 3873 cal.aBP 发育最大水深^[20],根据吴超羽等对珠江三角洲形成演变的数值模拟分析结果,该地区于 2500 aBP 尚未沉积成陆^[9],反映了珠江三角洲推进模式的复杂性,推测是其独特而复杂的地貌特征导致了该地区与研究区沉积记录上的差异^[66]。

4 结论

通过对珠江三角洲中部 PRD11 孔及 PRD10 孔微体动物群进行分析,结合岩性、软体动物群分布特征和¹⁴C 测年结果,可以发现:受海平面变化、构造抬升和河流作用的共同影响,钻孔所在区域全新世经历了多次环境变化。受末次冰期的影响,全球海平面下降,珠江三角洲乃至整个南海北部陆架沉积物露出地表遭受风化剥蚀,形成杂色黏土;随着冰后期气候回暖,海平面快速上升,海水自多个口门侵入珠江三角洲,南部地区更早受到全新世海侵的影响。由于珠江三角洲晚第四纪各断块之间存在构造升降的垂直差异,中部地区不同断块接受全新世海侵的时间不一。根据 PRD11 孔和 PRD10 孔的沉积记录,珠江三角洲中部地区约 9010 cal.aBP 开始接受全新世海侵沉积,至 4510 cal.aBP 持续发育河口湾环境。期间,根据微体动物群组成和丰度的变化,识别出了 2 个短周期的水体条件波动。其中,约 7000~5630 cal.aBP 钻孔微体动物群的丰度达到最高值,浮游种仅在此阶段出现,研究区发育最大水深,可能对应了珠江三角洲全新世最大海侵事件;约

4510 cal.aBP 以来为持续海退期,随着河流作用增强,逐渐转为主要受河流作用影响的上三角洲平原相沉积。由于珠江三角洲独特而复杂的构造和地貌特征,各区域发育三角洲平原相沉积的时间有所差异,这种时间上的不一致,反映了珠江三角洲推进模式的复杂性,三角洲的建造并非单一的自北向南,而是各区同时多向发育。

参考文献 (References)

- [1] Murray J. Ecology and Applications of Benthic Foraminifera [M]. Cambridge University Press, 2006.
- [2] Holmes J A, Chivas A R. The ostracoda: applications in Quaternary research[J]. Ostracoda Applications in Quaternary Research, 2002, 131.
- [3] Mendes I, Gonzalez R, Dias J M A, et al. Factors influencing recent benthic foraminifera distribution on the Guadiana shelf (Southwestern Iberia) [J]. Marine Micropaleontology, 2004, 51(1-2): 171-192.
- [4] 张虎男. 断块型三角洲[J]. 地理学报, 1980, 35(1): 58-67. [ZHANG Hunan. The fault delta[J]. Acta Geographica Sinica, 1980, 35(1): 58-67.]
- [5] 钟建强, 詹文欢, 古森昌, 等. 珠江三角洲新构造运动与地壳稳定性分析[J]. 华南地震, 1996, 16(2): 57-63. [ZHONG Jianqiang, ZHAN Wenhuan, GU Senchang, et al. Study on neotectonic movement and crustal stability in Pearl River Delta [J]. South China Journal of Seismology, 1996, 16(2): 57-63.]
- [6] 陈伟光, 赵红梅, 常郁, 等. 珠江三角洲晚第四纪垂直构造运动速率[J]. 地震地质, 2001, 23(4): 527-536. [CHEN Weiguang, ZHAO Hongmei, CHANG Yu, et al. The rate of Late Quaternary vertical motion of the Zhujiang Delta [J]. Seismology & Geology, 2001, 23(4): 527-536.]
- [7] 陈伟光, 魏柏林, 赵红梅, 等. 珠江三角洲地区新构造运动[J]. 华南地震, 2002, 22(1): 8-18. [CHEN Weiguang, WEI Bolin, ZHAO Hongmei, et al. The neotectonic movement in Pearl River Delta Area [J]. South China Journal of Seismology, 2002, 22(1): 8-18.]
- [8] 姚衍桃, 詹文欢, 刘再峰, 等. 珠江三角洲的新构造运动及其与三角洲演化的关系[J]. 华南地震, 2008, 28(1): 29-40. [YAO Yantao, ZHAN Wenhuan, LIU Zaifeng, et al. Neotectonics of the Pearl River Delta and its relationship with the deltaic evolution [J]. South China Journal of Seismology, 2008, 28(1): 29-40.]
- [9] 吴超羽, 包芸, 任杰, 等. 珠江三角洲及河网形成演变的数值模拟和地貌动力学分析: 距今 6000-2500a [J]. 海洋学报, 2006, 28(4): 64-80. [WU Chaoyu, BAO Yun, REN Jie, et al. A numerical simulation and morphodynamic analysis on the evolution of the Zhujiang River Delta in China: 6000-2500 a BP [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2006, 28(4): 64-80.]
- [10] 袁家义, 陈木宏, 余家桢, 等. 珠江三角洲北部晚更新世以来的沉积特征[J]. 海洋通报, 1988, 7(2): 51-63. [YUAN Jiayi, CHEN Muhong, YU Jiazhen, et al. Sedimentary characteristics of Late Pleistocene in northern Pearl River Delta [J]. Marine Science Bulletin, 1988, 7(2): 51-63.]
- [11] 龙云作, 霍春兰. 珠江三角洲晚第四纪沉积特征[J]. 海洋科学, 1990, 14(4): 7-14. [LONG Yunzuo, HUO Chunlan. The sedimentation characteristics of Zhujiang River Delta in Late Quaternary [J]. Marine Sciences, 1990, 14(4): 7-14.]
- [12] 赵焕庭. 珠江河口演变 [M]. 北京: 海洋出版社, 1990. [ZHAO Huanting. The Evolution of the Pearl River Estuary [M]. Beijing: Ocean Press, 1990.]
- [13] Yim W S, He X X. Distribution of foraminifera in Late Quaternary sediments off High Island, Hong Kong [J]. Journal of Southeast Asian Earth Sciences, 1991, 6(1): 1-11.
- [14] 李平日. 珠江三角洲一万年来环境演变 [M]. 北京: 海洋出版社, 1991. [LI Pingri. The Environment Evolution of the Zhujiang Delta in the Last 10000 Years [M]. Beijing: Ocean Press, 1991.]
- [15] 蓝先洪. 珠江三角洲晚第四纪沉积特征[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 155-162. [LAN Xianhong. Sedimentary characteristics of Late Quaternary in the Zhujiang River Delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 155-162.]
- [16] 董艺辛, 刘春莲, 杨小强, 等. 珠江三角洲晚第四纪微体生物群与环境演变 [C]// 全国古地理学及沉积学学术会议. 2006. [DONG Yixin, LIU Chunlian, YANG Xiaoqing, et al. Late Quaternary paleoenvironmental changes of the Pearl River Delta based on macrofaunal records [C]// The Paleogeography and Sedimentology Academic, 2006.]
- [17] 刘春莲, Fürsich F T, 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. [LIU Chunlian, Fürsich F T, DONG Yixin, et al. High resolution ostracod records of borehole PRD05 and the Late Quaternary palaeoenvironment in Pearl River Delta [J]. Journal of Palaeogeography, 2008, 10(3): 313-322.]
- [18] 董艺辛, 刘春莲, 陈木宏, 等. 珠江三角洲中部大鳌平原晚第四纪古生物记录及环境演化[J]. 第四纪研究, 2012, 32(6): 1183-1198. [DONG Yixin, LIU Chunlian, CHEN Muhong, et al. Late Quaternary paleontology and environmental changes in Da'ao plain, middle Pearl River Delta, Southern China [J]. Quaternary Sciences, 2012, 32(6): 1183-1198.]
- [19] Alberti M, Hethke M, Fürsich F T, et al. Macro- versus microfauna: resolution potential of bivalves, gastropods, foraminifera and ostracods in reconstructing the Holocene palaeoenvironmental evolution of the Pearl River delta, China [J]. Palaeobiodiversity and Palaeoenvironments, 2013, 93(3): 327-353.
- [20] 庄畅, 刘春莲, 吴洁, 等. 珠江三角洲 PRD16 孔微体生物记录与晚更新世以来的古环境重建[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2013, 52(3): 128-132. [ZHUANG Chang, LIU Chunlian, WU Jie, et al. Microfossil records of borehole PRD16 and palaeoenvironment since the Late Pleistocene in the Pearl River Delta [J]. Acta Scientiarum Naturalium Uni-

- versitatis Sunyatseni, 2013, 52(3): 128-132.]
- [21] 吴洁, 刘春莲, 张素青, 等. 珠江三角洲东部晚第四纪微体动物群的古环境意义[J]. 中山大学学报自然科学版, 2014, 53(6): 45-52. [WU Jie, LIU Chunlian, ZHANG Suqing, et al. Palaeoenvironmental significance of Late Quaternary microfaunas in the eastern Pearl River Delta[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, 53(6): 45-52.]
- [22] 陈双喜, 赵信文, 孙荣涛, 等. 现代珠江三角洲地区晚第四纪海侵的微体古生物记录[J]. 微体古生物学报, 2015, 32(3): 292-307. [CHEN Shuangxi, ZHAO Xinwen, SUN Rongtao, et al. Micropaleontological records of Late Quaternary transgression in the modern Pearl River Delta region, Guang Dong province, s. China [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2015, 32(3): 292-307.]
- [23] 陈双喜, 赵信文, 黄长生, 等. 珠江三角洲晚第四纪环境演化的沉积响应[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1734-1744. [CHEN Shuangxi, ZHAO Xinwen, HUANG Changsheng, et al. Sedimentary response to the Late Quaternary environmental evolution in Pearl River Delta[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(10): 1734-1744.]
- [24] 殷鉴, 刘春莲, 吴洁, 等. 珠江三角洲中部晚更新世以来的有孔虫记录与古环境演化[J]. 古地理学报, 2016, 18(4): 677-690. [YIN Jian, LIU Chunlian, WU Jie, et al. Foraminiferal records and palaeoenvironmental changes since the Late Pleistocene in central Pearl River Delta[J]. Journal of Palaeogeography, 2016, 18(4): 677-690.]
- [25] 赵信文, 罗传秀, 陈双喜, 等. 基于珠江三角洲 ZK13 孔年代和微体古生物重建的晚第四纪环境演化历史[J]. 地质通报, 2016, 35(10): 1724-1733. [ZHAO Xinwen, LUO Chuanxiu, CHEN Shuangxi, et al. Late Quaternary evolution history shown by borehole ZK13 in Pearl River Delta, based on chronology and micropaleontology[J]. Geological Bulletin of China, 2016, 35(10): 1724-1733.]
- [26] 时小军, 余克服, 陈特固. 南海周边中全新世以来的海平面变化研究进展[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2007, 27(5): 121-132. [SHI Xiaojun, YU Kefu, CHEN Teguo. Progress in researches on sea-level changes in south China Sea since Mid-Holocene[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2007, 27(5): 121-132.]
- [27] Zong Y Q, Yim W S, Yu F L, et al. Late Quaternary environmental changes in the Pearl River mouth region, China [J]. Quaternary International, 2009, 206(1-2): 35-45.
- [28] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲地区晚更新世以来海平面变化及构造运动问题[J]. 热带地理, 1982, 2(1): 29-37. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Sea-level fluctuations and the tectonic movement since the Late Pleistocene in central Pearl River Delta[J]. Tropical Geography, 1982, 2(1): 29-37.]
- [29] 彭杰, 杨小强, 黄文姬, 等. 珠江三角洲全新世海平面升降及其对全球变化的响应[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2014, 53(6): 63-72. [PENG Jie, YANG Xiaoqiang, HUANG Wenya, et al. Sea-level fluctuations and response to global changes during the Holocene in the Pearl River Delta, South China[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2014, 53(6): 63-72.]
- [30] 周洋, 谢叶彩, 陈芳, 等. 珠江三角洲 ZK201-2 孔晚更新世以来微体生物群与古环境[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(4): 113-123. [ZHOU Yang, XIE Yecai, CHEN fang, et al. Microfaunas in hole zk201-2 at Zhujiang River Delta since Late Pleistocene and their implications for paleoenvironments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(4): 113-123.]
- [31] 李平日, 林晓东. 华南海岸带中晚全新世环境变化及其与美国加州之比较[J]. 科学通报, 1994, 39(22): 2081-2083. [LI Pingri, LIN Xiaodong. Mid-Late Holocene environmental change in Southern China coastal zone and its comparison with California in the United States[J]. Science Bulletin, 1994, 39(22): 2081-2083.]
- [32] 方国祥, 李平日, 黄光庆. 珠江三角洲 8000 年来海平面变化[J]. 地理研究, 1991, 10(4): 1-11. [FANG Guoxiang, LI Pingri, HUANG Guangqing. Sea level changes in Zhujiang Delta during the past 8000 years[J]. Geographical Research, 1991, 10(4): 1-11.]
- [33] 刘纯瑶, 殷鉴, 刘春莲, 等. 珠江三角洲全新世软体动物群记录与古环境演化[J]. 热带地理, 2016, 36(3): 355-363. [LIU Chunyao, YIN Jian, LIU Chunlian, et al. Holocene mollusc records and palaeoenvironmental changes in the Pearl River Delta[J]. Tropical Geography, 2016, 36(3): 355-363.]
- [34] 汪品先, 张纪军, 赵泉鸿, 等. 东海底质中的有孔虫和介形虫[M]. 北京: 海洋出版社, 1988. [WANG Pinxian, ZHANG Jijun, ZHAO Quanhong, et al. Foraminifera and Ostracoda in Bottom Sediments of the Eastern China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1988.]
- [35] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华. 南黄海西北部底质中有孔虫、介形虫分布规律及其地质意义[C]//海洋微体古生物论文集北京: 海洋出版社, 1980: 61-83. [WANG Pinxian, MIN Qiubao, BIAN Yunhua. Distribution of foraminifera and ostracoda in bottom sediments of the northwestern part of the southern Yellow Sea and its geological significance[C]// Papers on Marine Micropaleontology. Beijing: China Ocean Press, 1980: 61-83.]
- [36] 候祐堂, 陈德琼, 杨恒仁, 等. 江苏地区白垩纪—第四纪介形类动物群[M]. 北京: 地质出版社, 1982. [HOU Youtang, CHEN Deqiong, YANG Hengren, et al. Cretaceous - Quaternary Ostracods Fauna from Jiangsu Area[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1982.]
- [37] Mazzini I, Anadon P, Barbieri M, et al. Late Quaternary sea-level changes along the Tyrrhenian coast near Orbetello (Tuscany, central Italy): palaeoenvironmental reconstruction using ostracods[J]. Marine Micropaleontology, 1999, 37(3-4): 289-311.
- [38] Ta T K O, Nguyen V L, Tateishi M, et al. Sedimentary facies, diatom and foraminifer assemblages in a Late Pleistocene-Holocene incised-valley sequence from the Mekong River Delta, Bentre Province, Southern Vietnam: the BT2 core[J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2001, 20(1): 83-94.

- [39] Holmes J A, Chivas A R. Paleoenvironmental Reconstruction of Marginal Marine Environments From Combined Paleoecological and Geochemical Analyses on Ostracods[M]// The Ostracoda: Applications in Quaternary Research. American Geophysical Union, 2013: 15-24.
- [40] Liu C L, Fürsich F T, Wu J, et al. Late Quaternary palaeoenvironmental changes documented by microfaunas and shell stable isotopes in the southern Pearl River Delta plain, South China[J]. Journal of Palaeogeography, 2013, 2(4): 344-361.
- [41] 程广芬, 刘东生, 武心尧, 等. 渤海中、南部表层沉积物中有孔虫的初步研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 1991(1): 109-121. [CHENG Guangfen, LIU Dongsheng, WU Xinyao, et al. A preliminary study of foraminifera in surface sediments in the central and south part of the Bohai Sea[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 1991(1): 109-121.]
- [42] Rice D L, Meszaros G. Benthic Foraminifera of the Gulf of Mexico: Distribution, Ecology, Paleoecology[M] // Native Fishes of Ohio. The Kent State University Press, 2014: 128.
- [43] 吴洁, 刘春莲, Fürsich F T, 等. 中国南部珠江河口地区表层沉积物中有孔虫的环境意义及其在晚第四纪古环境重建中的应用[C]//第一届国际古地理学会. 2013. [WU Jie, LIU Chunlian, Fürsich F T, et al. Environmental implications of foraminifera in surface sediments of the Pearl River Estuary, southern China and their application in reconstructing Late Quaternary palaeoenvironments [C]// 1st International Palaeogeography Conference, 2013.]
- [44] 赵泉鸿, 汪品先, 张清兰. 南海北部陆架底质中介形虫的分布[J]. 海洋学报, 1986, 8(5): 590-602. [ZHAO Quanhong, WANG Pinxian, ZHANG Qinglan. Distribution of ostracods in the continental shelf of the northern South China Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1986, 8(5): 590-602.]
- [45] 周保春, 赵泉鸿, 黄维, 等. 黄海西部介形虫分布再探[J]. 海洋学报, 1996, 15(2): 209-229. [ZHOU Baochun, ZHAO Quanhong, HUANG Wei, et al. A restudy of ostracode assemblages in the surface sediments of the Huanghai Sea[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1996, 15(2): 209-229.]
- [46] 杨藩, 乔子真, 张海泉, 等. 柴达木盆地新生代介形类动物群特征及环境意义[J]. 古地理学报, 2006, 8(2): 143-156. [YANG Fan, QIAO Zizhen, ZHANG Haiquan, et al. Features of the Cenozoic ostracod fauna and environmental significance in Qaidam Basin[J]. Journal of Palaeogeography, 2006, 8(2): 143-156.]
- [47] 陈欣树, 包砺彦, 陈俊仁, 等. 珠江口外陆架晚第四纪最低海面的发现[J]. 热带海洋学报, 2015, 9(4): 73-77. [CHEN Xinshu, BAO Liyan, CHEN Junren, et al. Discovery of lowest sea level in Late Quaternary at the continental shelf off Pearl River mouth [J]. Journal of Tropical Oceanography, 2015, 9(4): 73-77.]
- [48] 董艺辛, 刘春莲, 阴家润, 等. 珠江三角洲晚第四纪环境演变的微体生物记录[J]. 古脊椎动物学报, 2007, 45(2): 161-172. [DONG Yixin, LIU Chunlian, YIN Jiarun, et al. Late Quaternary microfaunas and paleoenvironmental changes recorded in core sediments of the Pearl River Delta, South China[J]. Vertebrata Palasiatica, 2007, 45(2): 161-172.]
- [49] Yim W S, Hilgers A, Huang G, et al. Stratigraphy and optically stimulated luminescence dating of subaerially exposed Quaternary deposits from two shallow bays in Hong Kong, China[J]. Quaternary International, 2008, 183(1): 23-39.
- [50] Zong Y Q, Huang K 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(9): 77-88.
- [51] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲第四纪沉积特征[J]. 地质论评, 1985, 31(2): 159-164. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Characteristics of the Quaternary deposits in the Zhujiang(Pearl) Delta[J]. Geological Review, 1985, 31(2): 159-164.]
- [52] 陈国能, 张珂, 贺细坤, 等. 珠江三角洲晚更新世以来的沉积-古地理[J]. 第四纪研究, 1994, 14(1): 67-74. [CHEN Guoneng, ZHANG Ke, HE Xishen, et al. Paleo-geographic evolution of the Pearl River Delta since the Late Pleistocene [J]. Quaternary, 1994, 14(1): 67-74.]
- [53] Zong Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the Southeast coast of China[J]. Quaternary International, 2004, 117(1): 55-67.
- [54] Siddall M, Rohling E J, Almogilabin A, et al. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle[J]. Nature, 2003, 423(6942): 853.
- [55] Bradley S L, Milne G A, Horton B P, et al. Modelling sea level data from China and Malay-Thailand to estimate Holocene ice-volume equivalent sea level change[J]. Quaternary Science Reviews, 2016, 137: 54-68.
- [56] Milne G A, Peros M. Data-model comparison of Holocene sea-level change in the circum-Caribbean region[J]. Global & Planetary Change, 2013, 107(107): 119-131.
- [57] 徐明广, 马道修, 周青伟, 等. 珠江三角洲地区第四纪海平面变化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6(3): 95-104. [XU Mingguang, MA Daoxiu, ZHOU Qingwei, et al. Quaternary sea-level fluctuation in Zhujiang River Delta area[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1986, 6(3): 95-104.]
- [58] 黄光庆, 严维枢. 有孔虫指示的珠江口全新世风暴潮沉积信息[J]. 科学通报, 1997, 42(4): 423-426. [HUANG Guangqing, YAN Weishu. Holocene storm sedimentary information indicated by foraminifera in the Pearl River Estuary[J]. Science Bulletin, 1997, 42(4): 423-426.]
- [59] 黄光庆, 严维枢. 香港海域全新世地层及风暴潮的建造作用[J]. 第四纪研究, 1997, 17(4): 310-318. [HUANG Guangqing, YAN Weishu. Role of storms in Holocene inner shelf sediments of Hong Kong[J]. Quaternary Sciences, 1997, 17(4): 310-318.]
- [60] 丁平, 沈承德, 王宁, 等. 广东四会古森林地下生态系统碳同位素组成及其古气候意义[J]. 中国科学, 2009, 39(1): 70-78. [DING Ping, SHEN Chengde, WANG Ning, et al. Carbon isotopic composition and its implications on paleoclimate of the underground ancient forest ecosystem in Sihui, Guangdong[J]. Science China: Earth Sciences, 2009, 39(1): 70-

- 78.]
- [61] 王建华, 曹玲珑, 王晓静, 等. 珠江三角洲万顷沙地区晚第四纪沉积相与古环境演变[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(6): 39-45. [WANG Jianhua, CAO Linglong, WANG Xiaojing, et al. Evolution of sedimentary facies and paleoenvironment during the Late Quaternary in Wanqingsha area of the Pearl River Delta [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(6): 35-42.]
- [62] 郭良田, 李运贵. 珠三角地区晚第四纪以来气候变化和海平面升降的耦合效应——兼论珠江三角洲盆地及其周缘断裂的活动性[J]. 华南地震, 2008, 28(2): 53-58. [GUO Liangtian, LI Yungui. Coupling effects of climatic change and sea level eustasy since Late Quaternary in Pearl River Delta—discussion of fault activities in Pearl River Delta area[J]. South China Journal of Seismology, 2008, 28(2): 53-58.]
- [63] 李平日, 黄镇国, 张仲英, 等. 广东东部晚更新世以来的海平面变化[J]. 海洋学报, 1987, 9(2): 216-222. [LI Pingri, HUANG Zhenguo, ZHANG Zhongying, et al. Sea-level changes in the eastern Guangdong since Late Pleistocene[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1987, 9(2): 216-222.]
- [64] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle[J]. Science, 2001, 292(5517): 679-686.
- [65] 黄玉昆, 夏法, 陈国能. 断裂构造对珠江三角洲形成和发展的控制作用[J]. 海洋学报, 1983, 5(3): 316-327. [HUANG Yukun, XIA Fa, CHEN Guoneng. The controlling role of fault structure on the formation and development of the Pearl River Delta[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1983, 5(3): 316-327.]
- [66] 韦惺, 莫文渊, 吴超羽. 珠江三角洲地区全新世以来的沉积速率与沉积环境分析[J]. 沉积学报, 2011, 29(2): 328-335. [WEI Xing, WEI Wenyuan, WU Chaoyu. Analysis on the sedimentation rates and depositional environment of the Pearl River Delta area since Holocene[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2011, 29(2): 328-335.]
- [67] 韦惺, 吴超羽. 全新世以来珠江三角洲的地层层序和演变过程[J]. 中国科学:地球科学, 2011, 41(8): 101-116. [WEI Xing, WU Chaoyu. Holocene delta evolution and sequence stratigraphy of the Pearl River Delta in South China[J]. Sci China Earth Sci, 2011, 41(8): 101-116.]
- [68] Yu K F, Zhao J X, Shi Q, et al. Reconstruction of storm/tsunami records over the last 4000 years using transported coral blocks and lagoon sediments in the southern South China Sea[J]. Quaternary International, 2009, 195(1): 128-137.