

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2020103001

伶仃洋东岸晚更新世以来硅藻组合及环境意义

彭志远^{1,2}, 陈焯新^{1,2}, 吴聪^{1,2}, 陈芳^{1,2}, 周洋¹, 余少华¹, 贾磊¹, 时翠¹

1. 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075

2. 南方海洋科学与工程广东省实验室, 广州 511458

摘要:通过分析伶仃洋东岸 sz17QZ-20-3 钻孔硅藻分布特征, 结合测年、岩性和粒度, 重建了该地区晚更新世以来的古环境演化。依据沉积物岩性粒度变化判断, 晚更新世时期在 23.6~11.0 m 层段发育了一套河床相-溺古湾相-岸滩相-冲积相的垂向沉积序列, 在花斑黏土层中有海水种 *Ethmodiscus rex* 碎片的存在, 指示晚更新世海侵海退旋回。早全新世海侵在 9000 cal. aBP 左右到达研究区, 海水种硅藻含量开始迅速增加, 发育滨海平原相沉积; 在 8000 cal. aBP 左右达到最高海平面, 海水种硅藻含量最高; 随后研究区处于海平面停滞状态, 并缓慢下降, 发育浅海相沉积; 中晚全新世 4.2~0 m 层段为海退时期, 发育河口湾相沉积。中全新世 4.4~4.2 m 层位海水种含量突然增加和 4.4~4.6 m 层位贝壳碎屑层指示可能有风暴潮事件发生; 晚全新世 0.3~0 m 层段表层沉积物中硅藻丰度异常偏高, 受人类活动影响较大。

关键词:硅藻; 古环境; 晚更新世; 伶仃洋

中图分类号:P736.21 **文献标识码:**A

Diatom assemblage since late Pleistocene in the east coast of Lingdingyang Bay and its environmental implications

PENG Zhiyuan^{1,2}, CHEN Chixin^{1,2}, WU Cong^{1,2}, CHEN Fang^{1,2}, ZHOU Yang¹, YU Shaohua¹, JIA Lei¹, SHI Cui¹

1. Guangzhou Marine Geological Survey, China Geological Survey, Guangzhou 510075, China

2. Guangdong Provincial Laboratory of Southern Marine Science and Engineering, Guangzhou 511458, China

Abstract: Based on the distribution pattern of diatom in the borehole of sz17QZ-20-3 of Lingdingyang Bay, with the support of dating, lithology and grain size distribution data, the paleoenvironment evolutionary history since late Pleistocene of this area is reconstructed. According to the change in lithology and grain size of the sediments, a vertical sequence consisting of river bed facies-drowning valley bay facies-beach facies-alluvial facies upwards was established for the interval of 23.6~11.0 m of Late Pleistocene. The presence of *Ethmodiscus Rex* fragments of marine species in the variegated clay layer indicates the cyclic transgressive and regressive sequences of the late Pleistocene. Early Holocene transgression reached the research area around 9000 cal. aBP, the diatom content of marine species rapidly increased, and the coastal plain facies was rather developed. The highest sea level was reached around 8000 cal. aBP, with the highest content of diatom of marine species. The sea level was falling after a period of stability and shallow marine deposits dominate; The Middle-Late Holocene or the interval of 4.2~0 m indicates a regressive period dominated by estuarine facies. The sharp increase in marine species at 4.4~4.2 m horizon in addition to shell debris at 4.4~4.6 m horizon of Middle Holocene indicates storm surge events; the diatom abundance in surface sediments at 0.3~0 m horizon of Late Holocene is unusually high under the influence of human activities.

Key words: diatom; paleoenvironment; Late Pleistocene; Lingdingyang Bay

硅藻为光能自养型单细胞植物, 分布广泛, 繁衍迅速, 易于保存, 对水体营养盐、盐度和 pH 等指标变化较为敏感^[1-4], 是古环境古气候信息的良好载体, 其化石记录了丰富的古环境信息。因此查明沉积物中硅藻的变化特征, 能够反演该地区沉积环境变化过程^[5-8]。

伶仃洋河口湾位于中国南海大陆架和中国华南大陆的过渡地带, 同时受到海洋和河流堆积的影响, 海陆相互作用强烈, 是研究古气候和古环境变迁的重要场所。相关研究成果揭示了华南地区的气候与环境演变, 为区域环境地质调查、古环境演化、城市建设和未来环境预测研究提供了基础资料

资助项目: 南方海洋科学与工程广东省实验室(广州)人才团队引进重大专项“粤港澳大湾区海岸线及滩涂湿地千年至十年尺度环境演变”(GML2019ZD0209); 中国地质调查局二级项目“数字海洋地质工程天然气水合物数据库更新与服务”(DD20190216)

作者简介: 彭志远(1992—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事海洋微体古生物和古环境研究, E-mail: 627917278@qq.com

收稿日期: 2020-10-30; 改回日期: 2020-12-10. 文凤英编辑

和研究依据^[9-11]。前人在伶仃洋以及万顷沙、中山、珠海等地区做了大量关于晚更新世珠江三角洲和伶仃洋地区的气候环境变迁的研究,主要从沉积相、孢粉、有孔虫、硅藻和地球化学等方面着手^[12-28],认为伶仃洋地区在晚更新世以来经历了两次海侵-海退旋回,但是对海侵时间存在争议,尤其是距离人类历史较近的全新世海侵事件。同时大部分研究钻孔集中在伶仃洋西岸的三角洲地区,对伶仃洋东岸地区的研究相对较少。本文利用位于伶仃洋东岸的 sz17QZ-20-3 钻孔中的硅藻进行相关分析,依据鉴定出的硅藻组合,结合已有的岩性分析和测年结果,恢复伶仃洋地区中晚更新世以来的古环境演变,探讨全新世海侵事件,同时为区域古环境、古气候研究提供更多的依据。

1 研究区域概况

研究区域位于伶仃洋东岸的深圳西岸科学用海区,受亚热带海洋季风气候影响,降雨充沛,雨热同期,6-9月份为台风盛行季,台风影响期间会带来大风和暴雨,年均降雨量为 1660~1748 mm,降雨季节分配不均,主要集中在 4—10月;多年平均气

温 21.4~22.4 ℃。sz17QZ-20-3 钻孔位于研究区深圳宝安国际机场的西北方向,北部有东宝河水注入伶仃洋,西北部有狮子洋和蕉门水道,地理位置为 22°42′18″N、113°45′13″E(图 1),由于靠近珠江三角洲入海口,在海侵期间较易被海水淹没,在海退期间又容易被剥蚀而带走部分顶部沉积物。

2 研究方法

sz17QZ-20-3 钻孔水深 1.6 m,进尺 40.1 m,第四系松散沉积物厚度约 23.6 m,下部为基岩。本文对该孔 0~23.6 m 地层,以 0.2~1.5 m 间隔进行取样,共获取 31 个样品进行硅藻分析,分析鉴定工作在广州海洋地质调查局实验测试研究所完成。

沉积物中提取硅藻的步骤主要为去除有机质、去钙、重液浮选和离心富集等步骤。具体流程为每个样品取已经烘干的样品 1g 放入 100 mL 烧杯内,加入过氧化氢约 20 mL,使样品充分反应,分散沉积物颗粒,然后用纯净水换洗数次,再用盐酸浸泡至没有气泡产生为止,用纯净水冲洗至中性;将冲洗成中性的样品倒入 50 mL 的离心管,用密度为 2.4 的重液进行浮选,把浮选液收集到 10 mL 离心管,

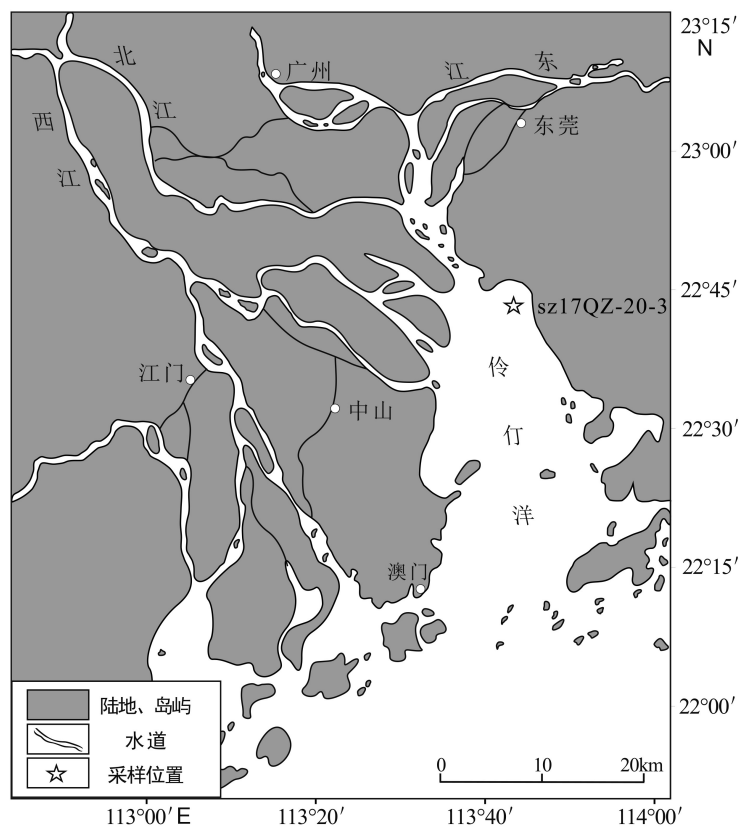


图 1 钻孔 sz17QZ-20-3 地理位置图

Fig.1 Location map of the borehole sz17QZ-20-3

使硅藻相对富集。把提取出的硅藻用纯净水稀释到一定浓度后,用滴管取 1/n 到盖玻片上晾干,盖片规格为 22 mm×22 mm,用中性树胶制成固定片,将固定好的玻片置于 Zeiss Axio Imager. A1 相差显微镜下进行鉴定,放大倍数 200~400 倍。每个样品统计 200 粒左右,若单个固定玻片不足 200 粒则统计 3 个盖片,最后计算各样品中的硅藻丰度,单位为“粒/g”。经换算得出每个样品的丰度(粒/g)^[12,20]。硅藻的分类与鉴定标准参照了邻近区域相关文献和图版的属种描述^[1-8]。

样品以 0.1 m 间隔连续取样进行粒度分析,分析工作在海南省地质实验测试中心完成,采用激光粒度分析法,使用仪器为百特 BT-2003 激光粒度分析仪。沉积物粒级采用尤登-温德华氏等比制 Φ 值粒级标准,沉积物粒度参数(平均粒径 M_z 、分选系

数 σ 、偏态系数 S_k 、峰态 K_g)利用矩值法计算,沉积物的分类和命名采用 Folk 分类图解法。

3 分析结果

3.1 钻孔 AMS¹⁴C 测年结果

对研究区 sz17QZ-20-3 钻孔沉积物中富含有机质或贝壳碎片层位的木屑和贝壳取样作为测年材料进行 AMS¹⁴C 测年,测年工作在美国 Beta Analytic 完成,使用加速器质谱仪,测定值以 5568 a 为半衰期计年。并利用高概率密度范围法(High-Probability Density, HPD)对部分测年数据进行日历年校正,具体结果见表 1。

表 1 sz17QZ-20-3 钻孔测年数据

Table 1 Chronology of the borehole sz17QZ-20-3

样品编号	实验室编号	取样深度/m	测年物质	AMS ¹⁴ C年代/aBP	校正后年代/cal. aBP
sz17QZ-20-3-1	Beta-502459	2.10~2.20	木屑	1570±30	1534~1394
sz17QZ-20-3-2	Beta-502460	4.80~4.90	贝壳	7420±30	7954~7806
sz17QZ-20-3-3	Beta-502461	8.40~8.50	贝壳	7690±30	8257~8037
sz17QZ-20-3-4	Beta-502462	9.75~9.95	木屑	7580±30	8420~8350
sz17QZ-20-3-5	Beta-502463	10.50~10.60	木屑	7840±30	8715~8547
sz17QZ-20-3-6	Beta-502464	20.60~20.85	木屑	>43 500	
sz17QZ-20-3-7	Beta-502465	21.75~21.90	木屑	>43 500	

3.2 钻孔岩性

粒度分析是揭示海洋沉积环境水动力状况的主要手段。在同一沉积环境中,底质沉积物粒度分布的空间变化,反映了多种动力搬运的综合,粒度在沉积柱中的垂向变化是多种因素作用下沉积环境随时间变化的综合反映^[24]。研究区钻孔沉积物以砂、砂质黏土、粉砂质黏土、黏土和花斑状黏土为主,不同时期沉积物各粒级的含量、平均粒径、分选系数等粒度参数变化明显,根据岩性和粒度等垂向变化特征可以将钻孔分为 6 层(图 2)。

0~6.3 m: 深黑色—浅黄—灰色—浅灰色,岩性以粉砂质黏土为主。2.20、3.20 m 处含少量贝壳碎屑;4.40~4.60 m 处为贝壳碎屑层。4.80~4.90 m 处含片状贝壳碎屑。

6.3~9.7 m: 灰色黏土,上部含少量贝壳碎屑,底部为片状贝壳碎屑。

9.7~11.0 m: 灰黑色黏土,上部含大量黑色木屑块,底部含碳化木屑。与下层界线明显。

——不整合接触——

11.0~20.1 m: 浅灰—黄褐色花斑状黏土,底部颜色渐变为浅棕红色。

——不整合接触——

20.1~21.9 m: 上部灰白色砂,中部深褐色黏土,底部粉砂质黏土层。

21.9~23.6 m: 上部为棕色、灰黑色和褐色花斑状砂质黏土,下部为土黄色砂,含砾。

根据测年和岩性特征,认为 sz17QZ-20-3 钻孔 0~11.0 m 层段代表全新世沉积;11.0~23.6 m 存在花斑黏土层沉积,一般认为是在 21 kaBP 以后,末次盛冰期开始,海平面大幅度下降,低于现今海平面 131 m,珠江三角洲地区海侵地层暴露地表遭受风化剥蚀,广泛发育花斑状黏土^[9-10],依据岩性判断 11.0~23.6 m 层段代表晚更新世沉积。

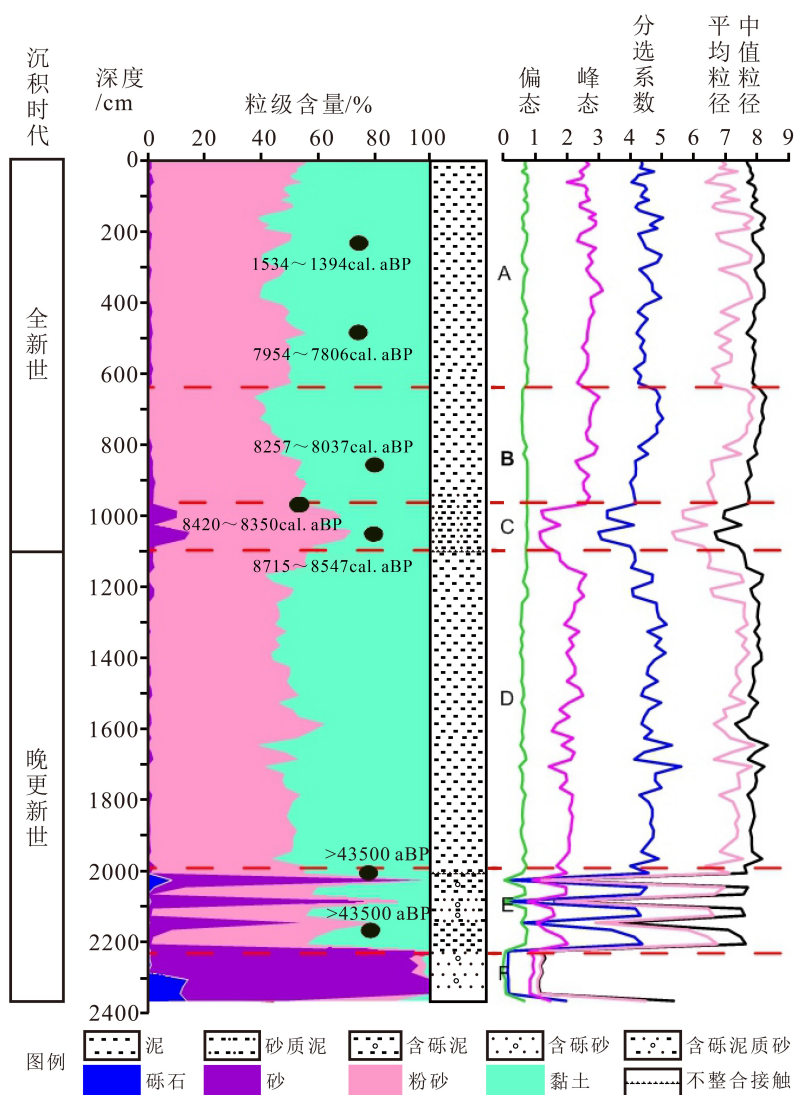


图 2 sz17QZ-20-3 钻孔岩性和粒度参数^[29]

Fig.2 Lithology and grain size parameters of the borehole sz17QZ-20-3^[29]

3.3 硅藻组合特征

在 sz17QZ-20-3 钻孔的 31 个样品中共鉴定出硅藻 36 属 84 种(含变种和未定种),其中上部 0.1~10.0 m 的样品中硅藻丰富,属种较多,硅藻丰度为 24192~247320 粒/g,保存中等偏好;10.0 m 以下的样品中硅藻丰度较低,属种单调,硅藻丰度为 0~1581 粒/g,且保存状况较差。

基于前人对南海硅藻的生态环境特征及分布的研究,并参考对珠江口伶仃洋地区硅藻生态分布的研究成果^[9-12],本文将鉴定出的硅藻属种按盐度大致分成海水种、半咸水种和淡水种 3 个生态类型^[12],如表 2 所示。

根据硅藻丰度和优势种百分含量的变化,该钻孔自下而上划分出 6 个硅藻组合带(见图 3),并依据三种生态类型硅藻属种的百分含量,作为环境趋

势判断的依据。各组合带分布特征如下:

组合带 I: *Cyclotella striata*-*Cyclotella stylorum*-*Coscinodiscus oculus*

见于 23.6~11.0 m,该组合带 17 个样品,硅藻丰度极低,为 0~1581 粒/g,保存状况很差。可鉴定出的硅藻属种包括半咸水种 *Cyclotella striata*、*Cyclotella stylorum*、*Paralia sulcata* 和 *Coscinodiscus subtilis*;海水种 *Actinocyclus ehrenbergii*、*Coscinodiscus oculus*、*Coscinodiscus subaulacodiscoidalis*、*Nitzschia cocconeiformis* 等;在 16.2~16.4、17.0~17.2 和 19.4~19.6 m 层位样品中有少量 *Ethmodiscus rex* 的碎片存在。另外,部分样品中零星可见少量放射虫、孢粉等其他微体化石。

组合带 II: *Cyclotella striata*-*Paralia sulcata*-*Nitzschia cocconeiformis*

见于 11.0~9.7 m,该组合带 1 个样品,硅藻丰

表2 硅藻属种划分
Table 2 Classification of diatoms

硅藻生态类型	主要硅藻种类
海水种	<i>Actinocyclus ehrenbergii</i> (爱氏辐环藻)、 <i>Nitzschia cocconeiformis</i> (卵菱形藻)、 <i>Coscinodiscus excentricus</i> (偏心圆筛藻)、 <i>Coscinodiscus lineatus</i> (线性圆筛藻)、 <i>Coscinodiscus oculatus</i> (小眼圆筛藻)、 <i>Thalassiosira oestrupii</i> (厄氏海链藻)、 <i>Tryblioptychus cocconeiformis</i> (卵形褶盘藻)、 <i>Ethmodiscus rex</i> (斑盘藻)、 <i>Coscinodiscus subaulacodiscoidalis</i> (亚沟圆筛藻)
半咸水种	<i>Cyclotella striata</i> (条纹小环藻)、 <i>Cyclotella stylorum</i> (柱状小环藻)、 <i>Coscinodiscus divisus</i> (多束圆筛藻)、 <i>Coscinodiscus subtilis</i> (细弱圆筛藻)、 <i>Paralia sulcata</i> (具槽帕拉藻)、 <i>Coscinodiscus radiatus</i> (辐射圆筛藻)、 <i>Actinoptychus undulatus</i> (环状辐刺藻)、 <i>Coscinodiscus argus</i> (蛇目圆筛藻)、 <i>Coscinodiscus curvatulus</i> (弓束圆筛藻)
淡水种	<i>Achnanthes crenulata</i> (波缘曲壳藻)、 <i>Cymbella tumida</i> (膨胀桥弯藻)、 <i>Cyclotella meneghiniana</i> (梅尼小环藻)

度很高,为180648粒/g,保存状况较好。样品中主要半咸水种百分含量高达71%,以*Cyclotella striata*、*Cyclotella stylorum*和*Paralia sulcata*为主,含量为58%;主要海水种百分含量为24%,以*Nitzschia cocconeiformis*为主,含量为10%。其余可鉴定出的硅藻属种包括半咸水种*Coscinodiscus subtilis*、*Coscinodiscus curvatulus*和*Coscinodiscus divisus*等;海水种*Actinocyclus ehrenbergii*和*Coscinodiscus subaulacodiscoidalis*等;淡水种很少见。部分样品中零星可见少量放射虫、孢粉等其他微体化石。

组合带Ⅲ：*Cyclotella striata-Paralia sulcata-Coscinodiscus oculatus*

见于9.7~5.8 m,该组合带5个样品,硅藻丰度降低,为57204~112716粒/g,保存状况较好。样品中主要半咸水种百分含量为62%~83%,以*Cyclotella striata*、*Cyclotella stylorum*和*Paralia sulcata*为主;主要海水种百分含量为13%~33%,以*Coscinodiscus oculatus*为主。其余可鉴定出的硅藻属种包括半咸水种*Coscinodiscus subtilis*、*Coscinodiscus curvatulus*和*Coscinodiscus argus*等;海水种*Actinocyclus ehrenbergii*和*Coscinodiscus excentricus*等;淡水种很少见。另外,部分样品中零星可见少量放射虫、孢粉等其他微体化石。

组合带Ⅳ：*Cyclotella striata-Actinocyclus ehrenbergii-Coscinodiscus oculatus*

见于5.8~4.2 m,该组合带2个样品,硅藻丰度增高,为202536~247320粒/g,保存状况较好。样品中主要半咸水种百分含量为65%~92%,以*Cyclotella striata*、*Cyclotella stylorum*和*Paralia sulcata*为主;主要海水种百分含量为6%~29%,以*Actinocyclus ehrenbergii*和*Coscinodiscus oculatus*为主。其余可鉴定出的硅藻属种包括半咸水种*Coscinodiscus subtilis*、*Coscinodiscus divisus*和*Coscinodiscus argus*等;海水种*Thalassiosira oestrupii*和*Tryblioptychus cocconeis-*

*formis*等;淡水种基本不可见。另外,部分样品中零星可见少量放射虫、孢粉等其他微体化石。

组合带Ⅴ：*Cyclotella striata-Paralia sulcata-Coscinodiscus oculatus*

见于4.2~0.3 m,该组合带5个样品,硅藻丰度降低,为24192~83214粒/g,保存状况较好。样品中主要半咸水种百分含量为71%~85%,以*Cyclotella striata*、*Cyclotella stylorum*和*Paralia sulcata*为主;主要海水种百分含量为11%~21%,以*Coscinodiscus oculatus*为主。其余可鉴定出的硅藻属种包括半咸水种*Coscinodiscus subtilis*、*Coscinodiscus divisus*和*Coscinodiscus radiatus*等;海水种*Actinocyclus ehrenbergii*、*Coscinodiscus lineatus*和*Coscinodiscus excentricus*等;淡水种很少见。另外,部分样品中零星可见少量放射虫、孢粉等其他微体化石。

组合带Ⅵ：*Cyclotella striata-Paralia sulcata-Coscinodiscus oculatus*

见于0.3~0 m,该组合带1个样品,硅藻丰度增加,为203148粒/g,保存状况较好。样品中主要半咸水种百分含量为60%,以*Cyclotella striata*、*Cyclotella stylorum*和*Paralia sulcata*为主;主要海水种百分含量为21%,以*Coscinodiscus oculatus*为主。其余可鉴定出的硅藻属种包括半咸水种*Coscinodiscus subtilis*和*Coscinodiscus curvatulus*等;海水种*Actinocyclus ehrenbergii*、*Coscinodiscus lineatus*和*Coscinodiscus subaulacodiscoidalis*等;淡水种*Cyclotella meneghiniana*等。另外,部分样品中零星可见少量放射虫、孢粉等其他微体化石。

4 晚更新世以来的环境变化

sz17QZ-20-3 钻孔位于伶仃洋东岸,根据各个组合带硅藻的生态环境意义和硅藻壳体保存情况,参考钻孔的岩性和其他相关指标变化特征,可以重建

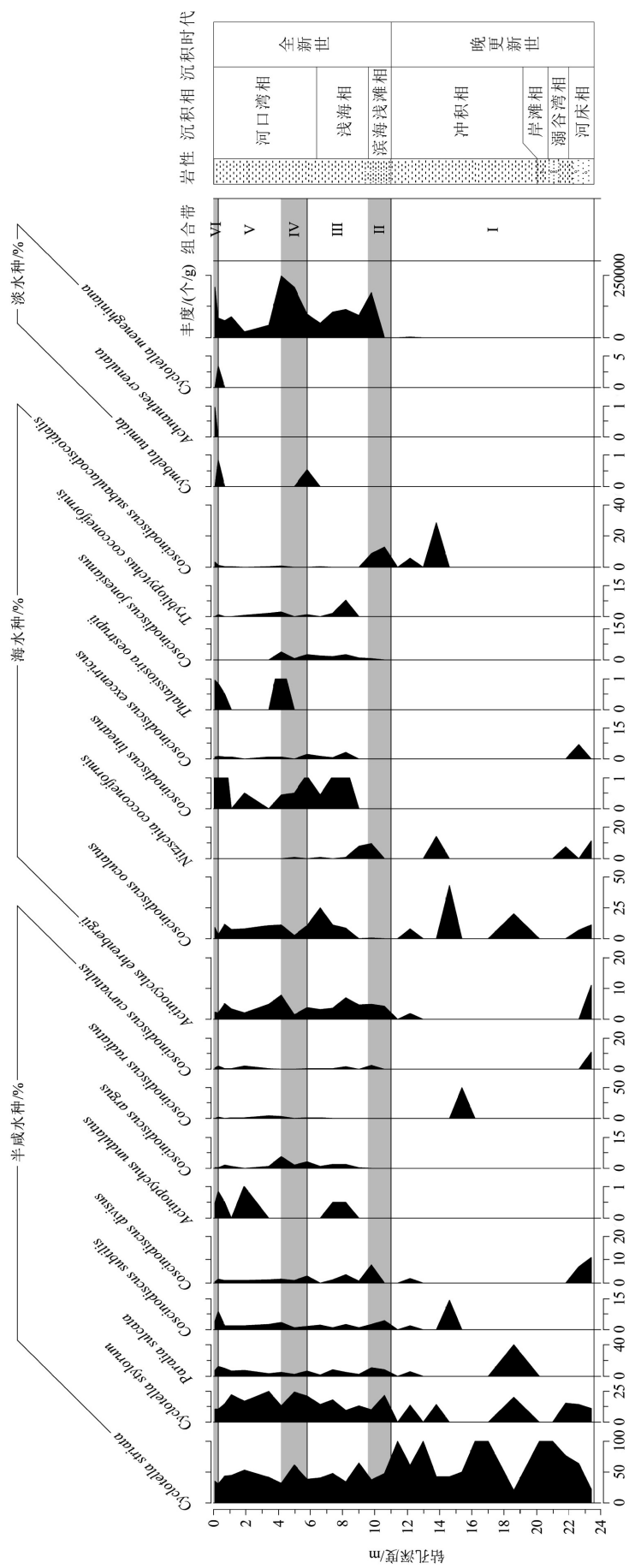


图 3 sz17QZ-20-3 钻孔硅藻丰度、优势种百分含量、三大类属种和组合特征
Fig.3 Diatom abundance, percentage of dominant species, three types of diatoms and assemblage characteristics in borehole sz17QZ-20-3

该地区晚更新世以来的古环境演化。

组合带 I: *Cyclotella striata*-*Cyclotella stylorum*-*Coscinodiscus oculatus* (23.6~11.0 m)

该层段硅藻化石保存较少且保存状况较差,部分残存的海水种溶蚀痕迹明显,对比其他地区冰期沉积物中的硅藻研究发现亦出现了显著的壳体溶蚀^[12]。极低的硅藻属种壳体统计量会造成硅藻属种百分比数据的放大,在该层段造成海水种百分含量相对较高的现象,因此无法仅通过硅藻组合来恢复沉积时期的古环境变化。在该层段我们主要通过沉积物岩性粒度等的变化并结合部分硅藻化石的生态信息来反演该层段的沉积环境信息。

晚更新世沉积在 23.6~21.9 m 层段由下部的土黄色含砾砂层过渡到上部的棕色、灰黑色和褐色花斑状砂质黏土层,判断为河道沉积的产物,发育河床相沉积;在 21.9~20.1 m 层段,底部发育粉砂质黏土层,中部发育深褐色黏土层,顶部发育灰白色砂层,判断底部和中部为溺古湾相沉积,顶部为岸滩相沉积;在 20.1~11.0 m 层段,发育浅灰—黄褐色花斑状黏土,底部颜色渐变为浅棕红色,该层有机质含量极低,花斑黏土层通常被认为是下覆地层在海平面下降后出露地表遭受风化剥蚀的产物,判断为冲积相沉积^[17-24]。可以看出在该钻孔组合带 I 从上到下发育了一套河床相—溺古湾相—岸滩相—冲积相的垂向沉积序列,早期为陆相沉积,随后晚更新世海侵开始,发育溺古湾沉积,海侵结束后海侵地层出露地表,形成标志性的花斑状风化黏土层,在花斑黏土层部分层位观察到 *Ethmodiscus rex* 碎片,该种为热带海域存在的典型硅藻属种,个体巨大,壳面直径可达 1.7~3.0 mm,是硅藻席的重要组成部分,研究表明该属种为抗溶蚀属种,易于保存^[30],花斑黏土层部分层位的 *Ethmodiscus rex* 碎片为晚更新世海侵地层遭到风化剥蚀后的残留。该地区在晚更新世海侵期间为海水入侵的低洼地段,海侵强度较低。

前人对珠三角和伶仃洋地区的沉积物岩性、微体古生物和地球化学等方面做了大量研究,认为在 33 ka 至末次冰期开始前,该地区经历了一次较大的海侵和几次次一级海平面波动,这次海侵为晚更新世以来的第一次海侵,海侵在 26~24 kaBP 达到高海平面时期,对应晚更新世玉木间冰期海侵,在 21 kaBP 以后,末次盛冰期开始,海平面大幅度下降,低于现今海平面 131 m,珠江三角洲地区海侵地层暴露地表遭受风化剥蚀,广泛发育花斑状黏土^[31-34]。研究区 sz17QZ-20-3 钻孔在 23.6~11.0 m 层段发育

的地层序列支持前人关于晚更新世海侵的研究。

组合带 II: *Cyclotella striata*-*Paralia sulcata*-*Nitzschia cocconeiformis* (11.0~9.7 m)

硅藻化石丰度迅速上升,保存状况较好,海水种含量迅速上升,同时有极少量淡水种硅藻化石保存下来。该层段以灰黑色黏土为主,沉积物中含有大量黑色木屑块和碳化木屑,与下层花斑状黏土界线非常明显,海水种硅藻化石的突然增加可以反映该时段全新世海侵到达该地区,该地区沉积环境为海陆交互过渡环境,判断为滨海平原相沉积。在该层段 9.75~9.95 m 层段和 10.5~10.6 m 取碳化木屑进行 AMS¹⁴C 测年,得到校正年龄分别为 8420~8350 cal. aBP 和 8715~8547 cal. aBP。在深圳西岸对面的珠江口西岸 QZK6 钻孔的研究中,通过孢粉数据重建全新世降雨量,得出在 8500~8105 cal. aBP 年平均降水为 1845~1929 mm,为全新世的最高值^[35],降水携带大量陆源物质进入伶仃洋,使水体的营养物质水平发生变化,有可能是该层段硅藻化石丰度偏高的原因之一。从硅藻组合和沉积物的变化可以看出,在 8715~8547 cal. aBP,全新世海侵已经到达该地区,海侵地层发育。

关于珠江三角洲中部全新世海侵开始时间的研究,一直以来存在争议,一种观点认为海侵开始于 7600 cal. aBP 左右^[21],另一种观点认为开始于 9000 cal. aBP^[36],大部分研究材料集中于伶仃洋东岸, sz17QZ-20-3 钻孔位于相近纬度的伶仃洋东岸,支持了前人珠江三角洲中部全新世海侵始于 9000 cal. aBP 的观点。

组合带 III: *Cyclotella striata*-*Paralia sulcata*-*Coscinodiscus oculatus* (9.7~5.8 m)

硅藻化石丰度有所下降,以 *Coscinodiscus oculatus* 为主的海水种含量相对增加,在 6.8~6.6 m 层位达到钻孔中的最大值。9.7~6.3 m 层段为灰色黏土,与下层界线清晰,沉积物中含有贝壳碎屑,沉积物组成变化不大,该层段沉积环境较为稳定;6.3~5.8 m 层段为粉砂质黏土,沉积物组成变化不大,该层段沉积物受水动力的改造程度较小,沉积环境为近岸动能较小的沉积环境;综合硅藻组合与岩性可以判断组合带 III 发育浅海—河口湾相沉积。9.7~6.3 m 层段海水种百分含量从底部到顶部表现出增加趋势,6.3~5.8 m 层段海水种硅藻百分含量减少。可以看出该层段全新世海侵持续进行,并达到全新世最大海平面,最大海平面时期为 8000 cal. aBP 左右,最后 6.3~5.8 m 层段出现海平面停滞,缓慢下降。有学者认为约 8000~7000 aBP 南海海平面变化处于停滞状态,在较长一段时期内水深缓慢下降^[21],与

本钻孔 6.3~5.8 m 层段开始出现海平面停滞相对应。

前人对于珠江三角洲地区全新世最大海平面的时间一直以来存在着较大争议, 珠江三角洲万顷沙地区 GZ-2 钻孔的沉积物研究认为该地区海侵高峰期在 6~5 ka 开始出现^[22]; 对内伶仃洋 L2 和 L16 孔的研究认为全新世海侵在 7750 cal. a BP 达到海平面升幅最大高度^[26]; 对珠江三角洲地区 ZK102-2、ZK203-2 和 ZK201-2 三个钻孔的研究认为该地区在 7000 cal. aBP 出现最大海侵^[12-13], 根据 sz17QZ-20-3 钻孔的研究结果, 钻孔所在研究区最大海侵时间为 8000 cal. aBP 左右, 比部分伶仃洋西岸地区的钻孔要早。与珠江三角洲南部的 PRD05 孔得出的 8500~8200 cal. aBP^[36] 相比要晚, 可以看出珠江口南部地区较钻孔所在北部地区更早受到海侵影响, 同时钻孔所在研究区较伶仃洋东岸更早受到海侵影响。

组合带 IV: *Cyclotella striata-Actinocyclus ehrenbergii-Coscinodiscus oculatus* (5.8~4.2 m)

硅藻化石丰度较组合带 III 有所增加, 同时海水种百分含量在 4.4~4.2 m 层位突然增加, 岩性以粉砂质黏土为主, 沉积环境为近岸动能较小的沉积环境, 判断为河口湾相沉积。在 4.4~4.6 m 层位为贝壳碎屑层, 4.8~4.9 m 层位含片状贝壳碎片, 在 4.8~4.9 m 层位取贝壳碎片进行 AMS¹⁴C 测年得到校正年龄为 7954~7806 cal. aBP。结合该层位硅藻丰度增加和部分层位海水种含量突然异常增高、贝壳碎片含量增高以及沉积物岩性粒度变化特征来看, 该层段所处的时期依旧处于海平面停滞并长期缓慢下降的阶段, 较弱的水动力状况有利于硅藻在沉积物中保存下来, 可能是沉积物中硅藻化石增加的主要原因。4.4~4.2 m 层位海水种突然增加和 4.4~4.6 m 层位贝壳碎屑层的存在指示有可能该地区经历了风暴潮事件^[37]。

组合带 V: *Cyclotella striata-Paralia sulcata-Coscinodiscus oculatus* (4.2~0.3 m)

硅藻化石丰度较组合带 IV 大幅度下降, 半咸水种百分含量增加, 其中贫营养状态下繁盛的 *Paraliasulcata* 百分含量逐渐增加, 海水种百分含量大幅度降低, 岩性以深黑色-浅黄-灰色-浅灰色粉砂质黏土为主, 判断为河口湾相沉积。220、320 cm 处含少量贝壳碎屑, 在 2.1~2.2 m 层位取木屑进行 AMS¹⁴C 测年得到校正年龄为 1534~1394 cal. aBP。前人利用孢粉重建降雨量和温度的研究认为, 从 4343 cal. aBP 至今, 年平均温度为全新世最低, 为 20.3~21.5 °C, 年降水量也为全新世最少, 为 1587~1765 mm^[35], 降雨量的减少对地表径流和营养物质输入有很大的

影响, 有可能是造成硅藻丰度降低的重要因素。从海水种硅藻化石百分含量的减少和沉积物岩性粒度变化来看, 该时期处于全新世海侵之后的海退时期。在部分层位海水种百分含量略微升高以及岩性粒度的变化应该是海退期间小规模的海侵事件的响应。

组合带 VI: *Cyclotella striata-Paralia sulcata-Coscinodiscus oculatus* (0.3~0 m)

硅藻丰度异常偏高, 其中贫营养状态下繁盛的 *Paralia sulcata* 百分含量逐渐降低, 说明该地区处于富营养状态, 对研究区表层水体的营养盐的分析表明, 受人类活动的影响, 在钻孔所在的东宝河口硝酸盐、亚硝酸盐、总氮含量和无机磷含量出现了研究区最高值, 并随潮流向南分股扩散, 南部水域含量总体偏低^[29], 由此推断表层沉积物硅藻丰度的异常偏高主要是受到人类活动的影响。

5 结论

(1) sz17QZ-20-3 钻孔揭示了伶仃洋东岸晚更新世以来较为完整的沉积, 沉积层由全新统和晚更新统组成, 其中 11.0 m 以上为约 9000 cal. aBP 以来的全新世沉积, 11.0 m 以下至 23.6 m 为晚更新世沉积。

(2) 研究区晚更新世以来经历了两个旋回: 晚更新世海侵海退旋回和全新世海侵海退旋回。晚更新世发育一套河床相-溺古湾相-岸滩相-冲积相的垂向沉积序列, 全新世发育一套滨海平原相-浅海相-河口湾相沉积序列, 从钻孔沉积物和硅藻化石来看, 全新世海侵强度要大于晚更新世海侵。

(3) 全新世海侵在 9000 cal. aBP 左右达到研究区, 海水种硅藻含量开始增加, 然后快速上升, 在 8000 cal. aBP 左右达到最高海平面, 此时海水种硅藻百分含量最高, 随后研究区处于海平面停滞状态, 并缓慢下降, 在中晚全新世 4.2~0 m 层段为海退时期, 期间有几次小规模海侵时间。在中全新世 4.4~4.2 m 层位海水种含量突然增加和 4.4~4.6 m 层位贝壳碎屑层的存在指示该时期可能有风暴潮事件发生; 在 0.3~0 m 层段硅藻丰度受人类活动影响较大。

参考文献 (References)

- [1] 小泉格. 硅藻[M]. 王开发, 郭蕃民, 译. 北京: 地质出版社, 1984. [KOIZUMI G. Diatom Analysis[M]. WANG Kaifa, GUO Xumin, trans. Beijing: Geological Publishing House, 1984.]
- [2] 金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海: 上海科学

- 技术出版社, 1965. [JIN Dexiang, CHEN Jinhuan, HUANG Kaige. China Marine Planktonic Diatoms[M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1965.]
- [3] 金德祥, 程兆第, 林均民, 等. 中国海洋底栖硅藻类(上卷)[M]. 北京: 海洋出版社, 1982. [JIN Dexiang, CHENG Zhaodi, LIN Junmin, et al. China Marine Benthic Diatoms (The First Volume)[M]. Beijing: Ocean Press, 1982.]
- [4] 金德祥, 程兆第, 刘师成, 等. 中国海洋底栖硅藻类(下卷)[M]. 北京: 海洋出版社, 1992. [JIN Dexiang, CHENG Zhaodi, LIU Shicheng, et al. China Marine Benthic Diatoms (The Second Volume)[M]. Beijing: Ocean Press, 1992.]
- [5] 王开发, 蒋辉, 冯文科. 南海深海盆地硅藻组合的发现及其地质意义[J]. 海洋学报, 1985, 7(5): 590-599. [WANG Kaifa, JIANG Hui, FENG Wenke. Discovery of the diatom assemblages in abyssal basin of South China Sea and their geological significance [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1985, 7(5): 590-599.]
- [6] 王开发, 蒋辉, 张玉兰. 南海及沿岸地区第四纪孢粉藻类与环境[M]. 上海: 同济大学出版社, 1990. [WANG Kaifa, JIANG Hui, ZHANG Yulan. Quaternary Spores, Pollen and Algae from the South China Sea and the Coastal Region and their Environment[M]. Shanghai: Tongji University Press, 1990.]
- [7] 蓝东兆, 程兆第, 刘师成. 南海晚第四纪沉积硅藻[M]. 北京: 海洋出版社, 1995. [LAN Dongzhao, CHENG ZHAODI, LIU Shicheng. Diatoms in Late Quaternary Sediments from the South China Sea[M]. Beijing: Ocean Press, 1995.]
- [8] 汪桂荣. 珠江三角洲全新世硅藻[J]. 古生物学报, 1998, 37(3): 305-325. [WANG Guirong. Holocene diatoms from the delta of Pearl River, South China [J]. Acta Palaeontologica Sinica, 1998, 37(3): 305-325.]
- [9] 黄镇国, 李平日, 张仲英, 等. 珠江三角洲形成发育演变[M]. 广州: 科学普及出版社广州分社, 1982. [HUANG Zhenguo, LI Pingri, ZHANG Zhongying, et al. Formation, Development and Evolution of the Pearl River Delta[M]. Guangzhou: Science Popularization Press Guangzhou Branch, 1982.]
- [10] 龙云作. 珠江三角洲沉积地质学[M]. 北京: 地质出版社, 1997. [LONG Yunzuo. Sedimentary Geology of Pearl River Delta[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1997.]
- [11] 李平日, 乔彭年, 郑洪汉, 等. 珠江三角洲一万年来环境演变[M]. 北京: 海洋出版社, 1991. [LI Pingri, QIAO Pengnian, ZHENG Honghan, et al. The Environment Evolution of the Zhujiang Delta in the Last 10000 Years[M]. Beijing: Ocean Press, 1991.]
- [12] 陈焯新, 吴聪, 谢叶彩, 等. 珠江三角洲中山地区ZK201-2钻孔硅藻组合及古环境意义[J]. 微体古生物学报, 2014, 31(4): 335-346. [CHEN Chixin, WU Cong, XIE Yecai, et al. Diatom assemblages from borehole ZK201-2 in Zhongshan area of the Zhujiang River delta Guangdong, S. China and their paleoenvironment significance [J]. Acta Micropalaeontologica Sinica, 2014, 31(4): 335-346.]
- [13] 谢叶彩, 王强, 龙桂, 等. 珠江口小榄镇-万顷沙地区晚更新世以来的海侵层序[J]. 古地理学报, 2014, 16(6): 835-852. [XIE Yecai, WANG Qiang, LONG Gui, et al. Transgressive sequence since the Late Pleistocene in Xiaolan Town-Wanqingsha area, Zhujiang River estuary [J]. Journal of Palaeogeography, 2014, 16(6): 835-852.]
- [14] 蓝先洪. 珠江三角洲晚第四纪沉积特征[J]. 沉积学报, 1996, 14(2): 155-161. [LAN Xianhong. Sedimentary characteristics of the Late Quaternary in the Zhujiang River delta [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1996, 14(2): 155-161.]
- [15] 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): 93-102. [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): 93-102.]
- [16] 余素华, 张玉兰, 杨晓强, 等. 深圳湾北岸新民孔岩心晚更新世以来的环境记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23(2): 9-18. [YU Suhua, ZHANG Yulan, YANG Xiaoqiang, et al. Environmental records in the Xinmin core since the Late pleistocene in the Northern Coast of the Shenzhen Bay [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23(2): 9-18.]
- [17] 黄镇国, 蔡福祥. 珠江口晚第四纪埋藏风化层及其环境意义[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 828-833. [HUANG Zhenguo, CAI Fuxiang. Buried weathering layers of the Late Quaternary and their environmental significance in the Zhujiang River estuary [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 828-833.]
- [18] 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 Xikun, et al. Paleo-geographic evolution of the Pearl River Delta since the Late Pleistocene [J]. Quaternary Sciences, 1994, 14(1): 67-74.]
- [19] 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.]
- [20] 余少华, 陈芳, 谢叶彩, 等. 珠江口万顷沙晚第四纪沉积及古环境重建[J]. 热带地理, 2016, 36(3): 374-387. [YU Shaohua, CHEN Fang, XIE Yecai, et al. Paleoenvironment Reconstruction and Sedimentary Record in the Wanqingsha Area of the Pearl River Estuary [J]. Tropical Geography, 2016, 36(3): 374-387.]
- [21] 吴月琴, 刘春莲, 杨小强, 等. 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[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2019, 39(2): 31-43. [WU Yueqin, LIU Chunlian, YANG Xiaoqiang, et al. Holocene microfaunal records in the central Pearl River Delta and implications for palaeoenvironmental change [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2019, 39(2): 31-43.]
- [22] 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): 37-41. [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): 37-41.]
- [23] 时翠, 甘华阳, 马胜中, 等. 晚更新世以来内伶仃洋河口湾的地层层序和沉积演化[J]. 海洋地质前沿, 2015, 31(10): 8-18. [SHI Cui, GAN Huayang, MA Shengzhong, et al. Late quaternary evolution and sequence stratigraphy of the Lingdingyang Eatuery in south China [J]. Marine Geology Frontiers, 2015, 31(10): 8-18.]
- [24] 时翠, 甘华阳, 夏真, 等. 珠江口内伶仃洋表层沉积物粒度特征及其

- 运移趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35(1): 13-20. [SHI Cui, GAN Huayang, XIA Zhen, et al. Characteristics and transport trend of surface sediments in inner Lingdingyang Firth of the Pearl River estuary [J]. Marine Geology and Quaternary Geology, 2015, 35(1): 13-20.]
- [25] 赵信文, 陈双喜, 黄长生, 等. 珠江三角洲陈村钻孔剖面沉积特征及有机碳同位素古环境意义[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1635-1641. [ZHAO Xinwen, CHEN Shuangxi, HUANG Changsheng, et al. The sedimentary characteristics of core section from Chencun Village in Pearl River Delta, and their organic carbon isotopic palaeoenvironmental implications [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(10): 1635-1641.]
- [26] 陈木宏, 赵焕庭, 温孝胜, 等. 伶仃洋L₂和L₁₆孔第四纪有孔虫群与孢粉化石带特征及其地质意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1994, 14(1): 11-22. [CHEN Muhong, ZHAO Huanting, WEN Xiaosheng, et al. Quaternary foraminiferal Group and Sporopollen Zones in cores L₂ and L₁₆ in the Lingdingyang estuary [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1994, 14(1): 11-22.]
- [27] 陶慧, 王建华, 陈慧娴, 等. 伶仃洋ZK19孔全新统有机物 $\delta^{13}\text{C}$ 和C/N值特征及东亚季风演变记录[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(3): 1-12. [TAO Hui, WANG Jianhua, CHEN Huixian, et al. Characteristics of $\delta^{13}\text{C}$ and C/N in the Holocene organic material of borehole ZK19 in Lingdingyang bay and the records of east Asian Monsoon variation [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2019, 58(3): 1-12.]
- [28] 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 Palaeoenvironments [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2015, 35(4): 113-123.]
- [29] 广州海洋地质调查局. 深圳西岸科学用海区环境地质工程地质调查成果报告[M]. 广州: 广州海洋地质调查, 2019. [Guangzhou Marine Geological Survey. Report on Geological Survey Results of Environmental Geology and Engineering in the Scientific Seas Area on the West Bank of Shenzhen[M]. Guangzhou: Guangzhou Marine Geological Survey, 2019.]
- [30] Abrantes F. Assessing the *Ethmodiscus* ooze problem: new perspective from a study of an eastern equatorial Atlantic core [J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 2001, 48(1): 125-135.
- [31] Dong Y X, Liu C L, Yin J R, 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): 162-173.
- [32] ZongY, 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.
- [33] Fairbridge R W. Eustatic changes in sea level [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1961, 4: 99-185.
- [34] Siddall M, Rohling E J, Almogi-Labin A, et al. Sea-level fluctuations during the last glacial cycle [J]. Nature, 2003, 423(6942): 853-858.
- [35] 赵信文, 罗传秀, 陈双喜, 等. 基于孢粉数据的珠江三角洲QZK6孔全新世气候定量重建[J]. 地质通报, 2014, 33(10): 1621-1628. [ZHAO Xinwen, LUO Chuanxiu, CHEN Shuangxi, et al. Quantitative re-construction of Holocene climate based on pollen data from drill hole QZK6 in Pearl River Delta [J]. Geological Bulletin of China, 2014, 33(10): 1621-1628.]
- [36] 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.]
- [37] 廖梦娜, 于革, 桂峰. 长江三角洲-辐射沙脊群YZ07钻孔晚更新世以来海侵事件的古生态学记录[J]. 第四纪研究, 2018, 38(3): 732-745. [LIAO Mengna, YU Ge, GUI Feng. Paleocological records of transgressions in Core YZ07 from Changjiang River delta-radial sand ridges of the South Yellow Sea since the Late Pleistocene [J]. Quaternary Sciences, 2018, 38(3): 732-745.]