

# 晚更新世以来内伶仃洋河口湾的地层层序和沉积演化

时 翠<sup>1,2,3</sup>, 甘华阳<sup>2,3</sup>, 马胜中<sup>2,3</sup>, 夏 真<sup>2,3</sup>, 林进清<sup>2,3</sup>

(1 中山大学地理科学与规划学院, 广州 510275; 2 国土资源部海底矿产资源重点实验室, 广州 510075;

3 中国地质调查局广州海洋地质调查局, 广州 510075)

**摘 要:**通过对内伶仃洋河口湾 22 个钻孔沉积物的高分辨<sup>14</sup>C 测年、古生物鉴定、沉积物粒度及地球化学分析,开展了晚更新世地层划分,探讨了晚更新世以来的沉积演化过程。内伶仃洋河口湾地层被含花斑黏土层的风化层隔开,划分为上下 2 组,侵蚀面上下分别为全新统和上更新统地层。受晚更新世以来 2 次海侵的影响,内伶仃洋河口湾沉积演化分成了 6 个阶段,详细阐述了每个阶段的气候变化、海平面波动、沉积特征和沉积过程。

**关键词:**内伶仃洋河口湾;晚更新世;地层划分;沉积演化

**中图分类号:**P736.21

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16028/j.1009-2722.2015.10002

河口湾受海陆交互作用的影响,是陆源和海相沉积物共同沉积的场所,也是人类活动影响最为强烈的地带,其沉积地层记录了丰富的海陆环境变化和古气候演化信息<sup>[1-12]</sup>。对河口湾地层划分和环境演化的分析有助于对海相沉积地层的整体认识及古环境演化的重建研究,有利于揭示古海洋环境演化与人类的发展演化和生产活动可能存在的响应关系,也有利于对近岸海洋地质环境等问题的分析。

内伶仃洋河口湾作为珠江三角洲的一部分,是连接网河区和前三三角洲的主要枢纽。20 世纪初期,众多学者对珠江三角洲的地质地貌作了研究<sup>[13]</sup>。随后,大量国内外学者从沉积学、地貌学、河口学等不同的角度,对珠江三角洲的沉积演化进行了研究<sup>[14]</sup>。20 世纪 80 年代以来,在珠江内伶仃洋海洋沉积学方面的研究也取得了一些成

果<sup>[15-26]</sup>。内伶仃洋河口湾的地层划分和沉积演化研究相对薄弱,Tang 等<sup>[27]</sup>和 Zong 等<sup>[28]</sup>曾对珠江下三角洲(含内伶仃洋河口湾)地层进行了研究,但存在一些不足,缺乏系统的钻孔测年资料。

本文通过对内伶仃洋河口湾 22 个钻孔沉积物的高分辨<sup>14</sup>C 测年、古生物鉴定、沉积物粒度分析及地球化学的分析,识别了晚更新世内伶仃洋河口湾的沉积旋回,开展了晚更新世地层划分,探讨了晚更新世以来的沉积演化过程,对于重建珠江三角洲的沉积体系和古环境,解释其对全球古气候变化、海平面升降以及新构造运动等的响应具有重要意义。

## 1 材料和方法

本文分析的钻孔共有 22 个,全部取自珠江口内伶仃洋(图 1),钻孔取心率在 80%~95%之间。实验室中将钻孔岩心剖成两半,一半放置广州海洋地质调查局样品库保存,对另一半岩心进行拍照、沉积物描述,之后分别按间距 4 cm 取样做古生物、粒度以及地球化学分析;在富有生物介质、

收稿日期:2015-07-21

基金项目:国土资源部海底矿产资源重点实验室开放基金(KLMMP-2103-A-13)

作者简介:时 翠(1985—),女,硕士,工程师,主要从事海洋地质与环境地质方面的研究工作。E-mail:shicuicui1985@163.com

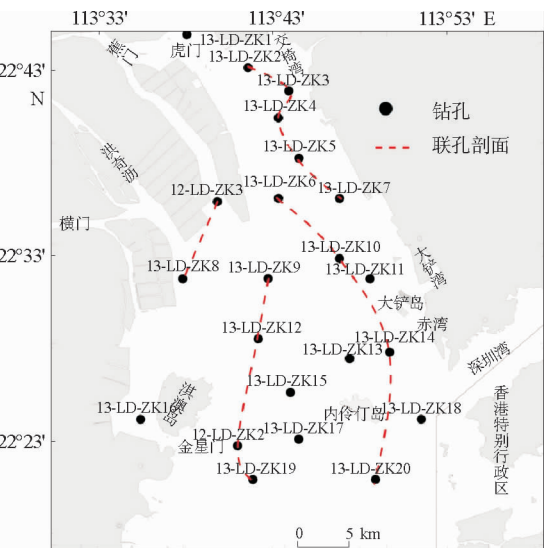


图 1 研究区钻孔位置

Fig. 1 Location of cores in the study area

泥炭、腐木的位置取<sup>14</sup>C 测年样品。

古生物、沉积物粒度、地球化学分析均在广州海洋地质调查局实验测试所完成。采用综合方法进行沉积物粒度分析,即>2 000 μm 的粗粒部分采用筛分法,而其余的细粒部分则采用激光粒度法,所使用的仪器是 Mastersizer2000 激光粒度

分析仪,综合 2 个测量结果获得最后的结果。地球化学分析采用 X 荧光光谱法和电感耦合等离子体发射光谱仪测定;有机碳含量采用重铬酸钾氧化—还原容量法测定<sup>[29]</sup>。

8 个钻孔测年数据共 38 个,送美国 Beta Analytic 实验室完成,使用加速器质谱仪,测定值以 5 568 a 为半衰期计年,并对测年数据进行了日历年校正。

2 结果

2.1 粒度分析

研究区钻孔沉积物类型以黏土质粉砂、砂质粉砂、砂和砾质砂为主。以钻孔 13-LD-ZK20 为例,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的变化明显,沉积层序明显以 7.8、16.8、27.5 和 35.0 m 为界分为 5 段。前人研究认为,Y 判别值<sup>[30]</sup>可以作为海陆沉积环境的指示,Y 判别值>-7.419,反映沉积环境为陆地环境;Y 判别值<-7.419,沉积环境则为海洋环境。13-LD-ZK20 孔的 Y 判别值见图 2,反映出研究区不同时期的沉积环境变化情况。

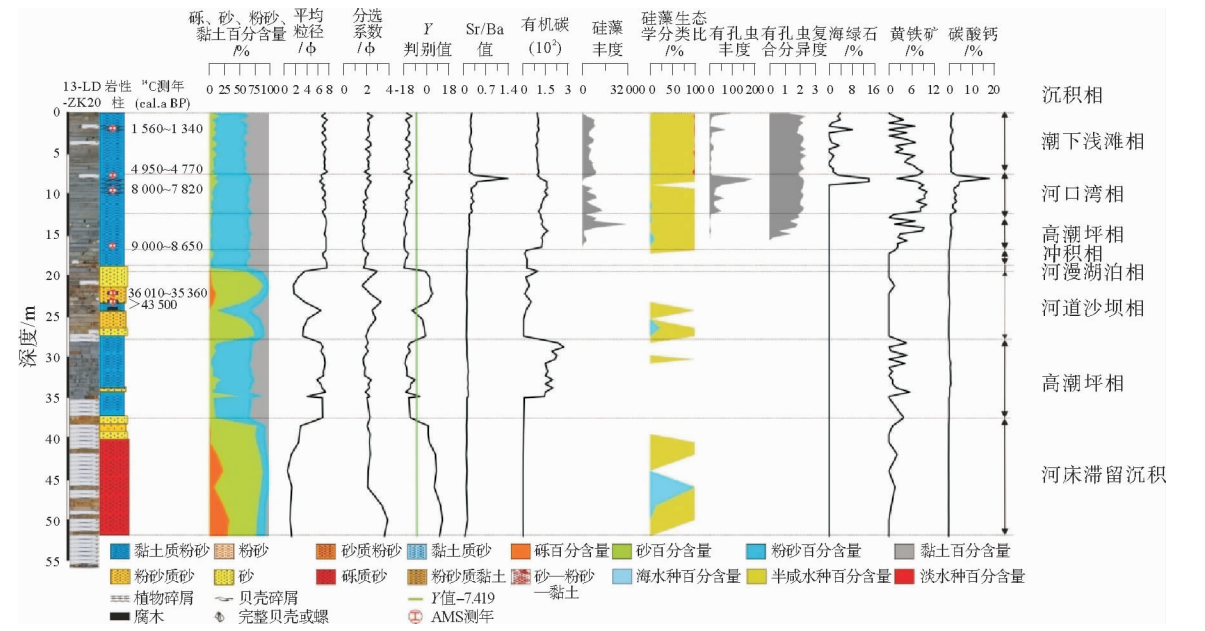


图 2 钻孔 13-LD-ZK20 综合柱状图

Fig. 2 The integrated columns of core 13-LD-ZK20

2.2 地球化学分析

地球化学方法在海洋沉积环境和物源示踪研究中起着非常重要的作用,特别是元素地球化学指标的运用,已在物源分析方面获得了比较好的成果。根据 13-LD-ZK20 孔沉积物的地球化学元素含量特征可以划分为 5 层(图 3、4)。总体上,第 1、2 层和第 4 层沉积物的化学成分较为相似,且明显区别于其他各层;第 3~5 层沉积物的化学成分变

化很大。在化学元素的变化趋势上,CaO、Sr 的变化特征相似;而  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$ 、 $\text{K}_2\text{O}$ 、 $\text{MnO}$ 、 $\text{TiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$  的变化特征相似,大部分微量元素的变化趋势都与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  相似。第 2 层位出现一定量的贝壳和有孔虫,使得沉积物的 CaO、Sr 含量较高;第 3~5 层由于沉积环境变化较大,以致沉积物的地球化学成分变化很大。Sr/Ba 值对沉积环境具有较好的指示意义,Sr/Ba 值 $>1$  为海相沉积;Sr/Ba 值 $<1$  为陆相沉积和海陆交互相沉积。

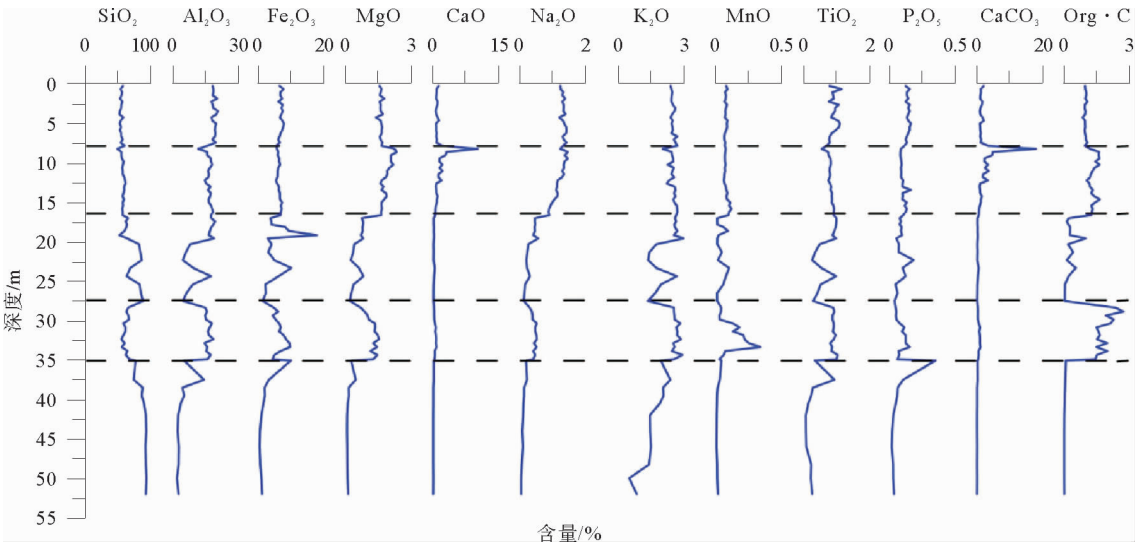


图 3 钻孔 13-LD-ZK20 微量元素分布特征

Fig. 3 The distribution of major elements in core 13-LD-ZK20

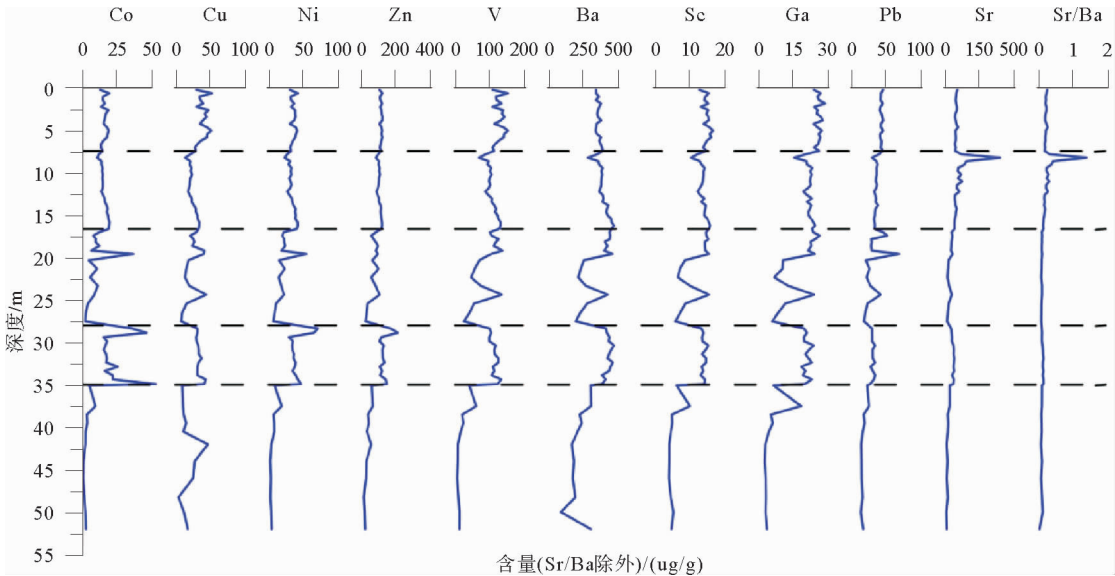


图 4 钻孔 13-LD-ZK20 微量元素分布特征

Fig. 4 The distribution of trace elements in core 13-LD-ZK20

## 2.3 古生物分析

研究区有孔虫优势属种主要为广盐—半咸水性浅水种组合,有孔虫的丰度和分异度变化较大。水体盐度是影响本区有孔虫分布的最主要因素,其次是水动力条件(或底质类型),水深对有孔虫分布也有一定影响,潮汐作用带来部分异地埋藏分子<sup>[31]</sup>。13-LD-ZK20孔底栖有孔虫以半咸水类型为主丰度较低,保存状况中等偏差,复合分异度在1.5~2.5之间,优势属种以广盐性的 *Ammonia beccarii* vars. 占绝对优势,以下依次为 *Quinqueloculina seminula*、*Elphidium advenum*、*Rotalidium annectens*、*Rotalinoides gaimardii*、*Elphidium hispidulum*、*Cribronion asiaticum*、*Haplophragmoides canariensis*。根据沉积物岩性和有孔虫分布特征,推测本区各钻孔为晚更新世以来的沉积,经历河流相沉积、河口海湾、潮间带等各阶段沉积环境演变,期间曾不同程度暴露于地表遭受风化剥蚀。

研究区硅藻属种以沿岸的半咸水种类 *Cyclotella striata*、*Paralia sulcata*、*Coscinodiscus divinus*、*Coscinodiscus oculatus* 为优势种,多数样品不含或者极少出现热带—亚热带海水种类,如 *Azpeitia nodulifera*、*Coscinodiscus sexcentricus* 和 *Coscinodiscus radiatus* 等,反映了受海水影响较小的沿岸河口环境。8个钻孔样品均未见第四纪标准化石 *Pseudoeunotia doliolus*,但其他属种第四纪常见,样品沉积时代都应属第四纪。钻孔13-LD-ZK20的硅藻平均丰度为3 237个/g,丰度变化呈现两段性特征:在1 640 cm之上硅藻含量多,丰度可达到最高31 823个/g;1 640 cm之下几乎不含硅藻。分异度不高,优势种为 *Paraliasulcata* 和 *Cyclotella striata*;常见种类较少,如 *Pyxidicula weyprechtii*、*Nitzschia cocconeiformis* 和 *Cyclotella stylorum* 等。

## 2.4 <sup>14</sup>C 测年

沉积物的<sup>14</sup>C年龄测定一直是第四纪年代学研究的热点。随着第四纪古气候研究的深入,从认识较长时间尺度的气候变化逐渐转向了认识快速气候波动事件,由此对年龄测定提出了更高的要求。研究区沉积物的年龄测定由 Beta Analytic

实验室完成,测年材料有腐木、贝壳、植物碎屑和泥炭等。

## 3 晚更新世伶仃洋沉积环境

### 3.1 晚更新世沉积旋回和沉积相

依据钻孔资料所反映的沉积物岩性、颜色、沉积结构、纹理、接触特征、演替特征、生物化石组成、泥砂含量和<sup>14</sup>C测年等,伶仃洋晚更新世以来的沉积序列划分为2大套沉积旋回,下部旋回出现在上更新统,上部旋回出现在全新统<sup>[31]</sup>。

研究区在末次冰期亚冰期发生第1次海侵,由于受海侵范围的控制,上更新统垂向沉积序列存在2种类型:①海水侵及的低洼地段,其垂向沉积序列从下而上的相变规律为河床滞留沉积—黏土质溺古湾相—冲积相;②在海水波及、风浪起主要作用的地段,从下而上的相变规律为砂砾质河床相—岸滩相—冲积相。因此,上更新统共划分出4个主要沉积相:砾石质辫状河流相、溺古湾相、岸滩相和冲积相。

砾石质辫状河流相主要由砂砾层和砂层构成。砂砾层含部分角砾和岩块,具块状构造,偶见斜层理及冲蚀充填构造;砂层具交错层理、水平层理及透镜状层理,偶见变形层理。沉积物粗细间的二元结构明显,未见海相微体生物化石,部分钻孔含有机质。主要为河床和边滩堆积,泛滥平原一般不发育。该沉积相厚度4~20 m,<sup>14</sup>C测年一般>43 500 cal. a BP。

溺古湾相主要由青灰色粉砂质黏土夹少量中细砂层组成,具双向交错层理、水平纹层、潮汐韵律层理、透镜状层理、鱼骨状层理及虫孔构造。含较多有孔虫、海相介形虫和贝壳类动物遗壳,有孔虫主要为 *Ammonia beccarii* vars. 和 *Protelphidium granosum*,硅藻主要为 *Cyclotella striata* 和 *Cyclotella meneghiniana*。常见绿色颗粒矿物及少量黄铁矿和文石等自生矿物,该沉积相厚度一般为5~6 m。

岸滩相主要由白色和黄色的砂质物质组成,偶夹有有机质丰富的灰黑色或灰绿色的潟湖相沉积物。冲积相主要由浅棕色、中红色花斑状砂质粉砂、粉砂质砂和砂组成,含少量砾石,与下伏地

层呈不整合接触,顶部广泛分布着一层杂色花斑黏土。

末次冰期晚冰期及全新世时期,研究区遭受第四纪以来的第 2 次海侵。海侵未全面波及本区时,基面抬高,大部分地区形成滨海平原或沼泽;之后海面接近高海面,全区沦为浅海—河口湾;随后海平面有所下降,岸线向海方推进,过渡为现代河口湾表层沉积。全新统沉积序列从下而上可划分为滨海平原和滨海沼泽相、浅海—河口湾相、潮坪相、潮道相、水下汉道相、水下浅滩相和潮下浅滩相。

滨海平原相为灰色和中灰色黏土质粉砂,含大量生物碎屑和植物碎屑,部分含铁锰结核,具块状构造;滨海沼泽相为灰绿色黏土,常见褐色腐木团块。与下伏地层呈突变接触,沉积厚度一般为 1~2 m。

浅海—河口湾相主要由青灰色粉砂质黏土和砂质粉砂组成,广泛发育潮汐韵律层理、透镜状层理、波状层理、脉状层理、水平纹理,含丰富的有孔虫、硅藻、孢粉、钙质超微化石。本区有孔虫优势种为 *Ammonia beccarii vars.*, 其次为 *Quinqueloculina seminula* 和 *Rotalidium annectens*, 优势属种为广盐—半咸水性浅水种组合,有孔虫的丰度和分异度变化较大。硅藻大部分属种为半咸水种,淡水种和海水种含量少,硅藻组合中以 *Cyclotella striata*、*Coscinodiscus sdivisus*、*Cyclotella stylorum*、*Melosira sulcata*、*Coscinodiscus oculatus* 为优势属种。

潮坪相多为青灰色黏土质粉砂,具透镜状层理和脉状层理。

潮道相沉积物复杂,含砂质黏土、砂砾或基岩,分选极差,具块状构造,含大量生物碎屑。该组沉积厚度一般为 4~17 m,广泛分布于河口湾内中,<sup>14</sup>C 测年范围在 8 500~2 500 cal. a BP。

潮下浅滩相和水下浅滩相为现代河口湾表层沉积,沉积物以黏土质粉砂为主,常出现潮汐层理、透镜状层理和波状层理,含有孔虫、介形虫、硅藻和贝类动物遗壳。本区有孔虫组合为 *Ammonia beccarii vars.*—*Protelphidium granosum* 和 *Ammobaculites agglutinans var.*、*Trochammina asiatica*。前组合主要分布于水下浅滩,后者分布于潮下浅滩。

### 3.2 晚更新世地层划分

通过伶仃洋钻孔粒度、地球化学、古生物、<sup>14</sup>C 测年数据、沉积相等分析发现,22 个钻孔的地层层序和沉积环境变化不尽相同,按内伶仃洋地形地貌特征将其划分为 4 个区,对伶仃洋地层层序进行逐一划分和讨论。

#### 3.2.1 东滩浅水区

位于矾石水道以东,13-LD-ZK2、ZK3、ZK4、ZK5、ZK7 钻孔组成一条 NNW—SSE 向的剖面(图 1),钻孔均穿透第四系,前第四系基底为燕山期花岗岩。含花斑黏土层的风化层将第四系地层划分为上下两大组,该侵蚀面上下分别为全新统和更新统地层。

该区受海侵范围控制明显,上更新统沉积序列存在 2 种截然不同的类型。浅滩北端的 13-LD-ZK2 孔受末次冰期亚冰期海侵的波及出现海侵层序,使本组地层划分为 3 段,沉积层序组合与中部的 13-LD-ZK6 孔基本相似,表现为以河流作用为主的河床相—河漫湖泊相、海侵期的河床相—溺古湾相和风化侵蚀期的冲积相(图 5),海侵层有孔虫出现在埋深 15 m 处,种数单一,仅有 1 种,且为浅海内陆架属种,可能由强劲的潮流裹挟而来,表明当时该处潮流作用强劲,推测为潮沟环境。13-LD-ZK7 孔下段地层风化强烈,风化层厚达 6.5 m;中段地层是一个比较清楚的下粗上细的沉积韵律,下部为分选差的砂砾层,中部为浅灰色的岸滩相堆积物,上部为含腐木的粉砂质黏土。

受末次冰期侵蚀残留后的古地形的控制,全新统地层沉积序列亦不相同。13-LD-ZK7 孔所在区域为相对较高的台地,全新统下端地层缺失,13-LD-ZK2 孔处于低洼谷地,保留有含腐木碎屑的黏土质粉砂沉积层。中上段地层沉积物受冰后期海侵范围的影响,自西北向东南海相性逐渐增强。13-LD-ZK7 孔有孔虫丰度为 2~522,复合分异度在 1~2 之间,优势种为滨岸浅水和半咸水种 *Ammonia beccarii vars.*,表明该区域明显受径流作用为主的冲淡水影响;而 13-LD-ZK2 孔有孔虫丰度低种数少,优势种为内陆架种,推测该处埋藏有孔虫是由潮流裹挟而来。该区域沉积发育特征为由 NW 向 SE 进积。

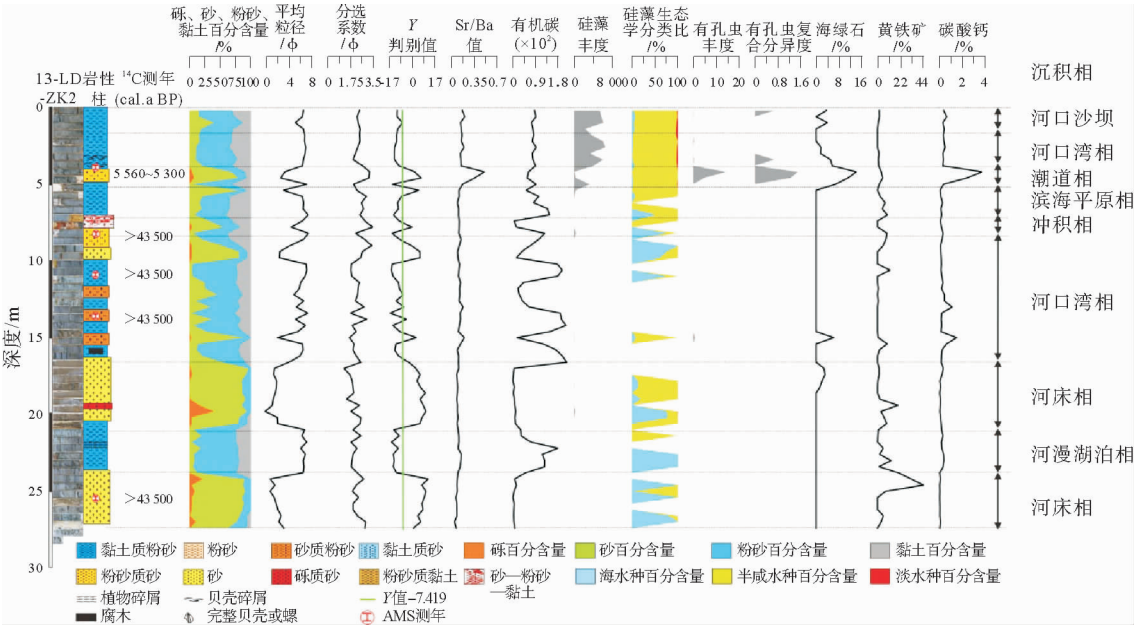


图 5 钻孔 13-LD-ZK2 综合柱状图

Fig. 5 The integrated columns of core 13-LD-ZK2

3.2.2 中滩、南滩浅水区

位于矾石水道和伶仃水道之间的浅滩潮汐作用明显。几年前人工开挖了铜鼓航道,分为中滩和南滩浅水区,地层变化小,这里一并描述。13-LD-ZK6、ZK10、ZK14、ZK20 钻孔组成一条 NNW—SSE 向的剖面(图 6)。各钻孔均穿透第

四系,前第四系基底为白垩系—新近系的粗碎屑岩和燕山期的花岗岩 2 种。第四系沉积厚度变化较大,浅滩南端最厚为 53 m,浅滩北端最薄为 23 m,浅滩从北往南厚度依次增大。沉积序列包含 2 个地层层序,被花斑黏土层隔开。侵蚀面上下分别为全新统和上更新统地层。

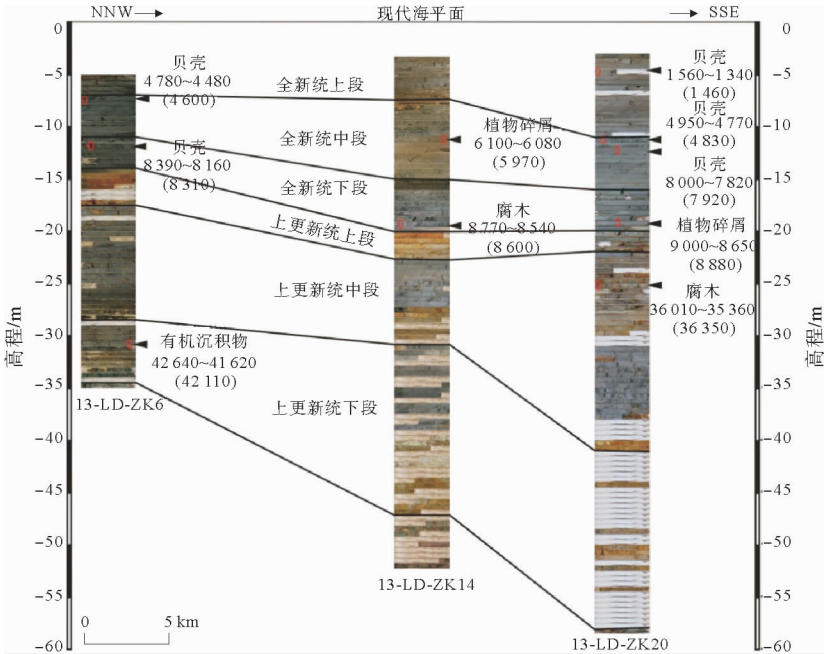


图 6 中滩、南滩浅水区联孔剖面

Fig. 6 Cross-section of Zhongtan and Nantan

覆盖在基岩上的是河床滞留砂砾层或灰黄色块状粗砂层,向上变为泛滥平原相堆积。受末次冰期亚冰期海侵的影响,上更新统中段地层出现河口湾相沉积物,含大量生物碎屑,发育潮汐层理,具双向水流特征,但未发现有孔虫及钙质超微化石,可能是由于钙质有孔虫壳体在末次冰期低海面陆露时期遭受了酸性地下水的溶解破坏;13-LD-ZK6 孔的此段地层具有一组典型的下粗上细的沉积韵律层,整组地层的顶部为杂色花斑黏土层,是遭受末次盛冰期的强烈风化和剥蚀的结果。

受冰后期海侵的影响,全新统下段地层发育含腐木碎屑的滨海平原或滨海沼泽相的黏土质粉砂堆积物,沉积厚度大约为 2 m,不含海相生物化石。全新统中段地层是一套特征明显的河口湾相沉积层(图 7),含丰富的有孔虫和少量钙质超微化石。13-LD-ZK6 孔有孔虫丰度在埋藏深度 4.4~6.0 m 处最高,平均为 122 个/g,复合分异度在

2 左右,以 *Quinqueloculina seminula* 为优势种;13-LD-ZK20 孔有孔虫丰度在埋藏深度 8.0~12.4 m 处最高,平均为 61 个/g,复合分异度均>2,优势种为 *Elphidium advenum*。该段地层的生物群具有典型的河口湾特点,特定层位海相性程度较高,潮流作用强劲,带来大量有孔虫的内陆架分子 *Elphidium advenum* 和 *Quinqueloculina seminula*,推测当时可能出现历史高海平面。在 13-LD-ZK14、ZK20 孔的此段地层的底部砂泥层里取海相贝壳进行<sup>14</sup>C 年龄测试,年龄为 8 600 和 8 800 cal. a BP。全新统上段地层为现代河口湾表层沉积,以潮下浅滩相为主,沉积厚度大约为 2 m,有孔虫的丰度从浅滩北侧往南逐渐增大,反映了该区沿 NNW—SSE 方向海相性逐渐增强。该区全新世沉积层序组合表现为海侵初期的滨海平原相、高海平面时期的浅海—河口湾相和海平面相对下降时期的潮下浅滩相,联孔剖面显示该区由 NNW 向 SSE 进积。

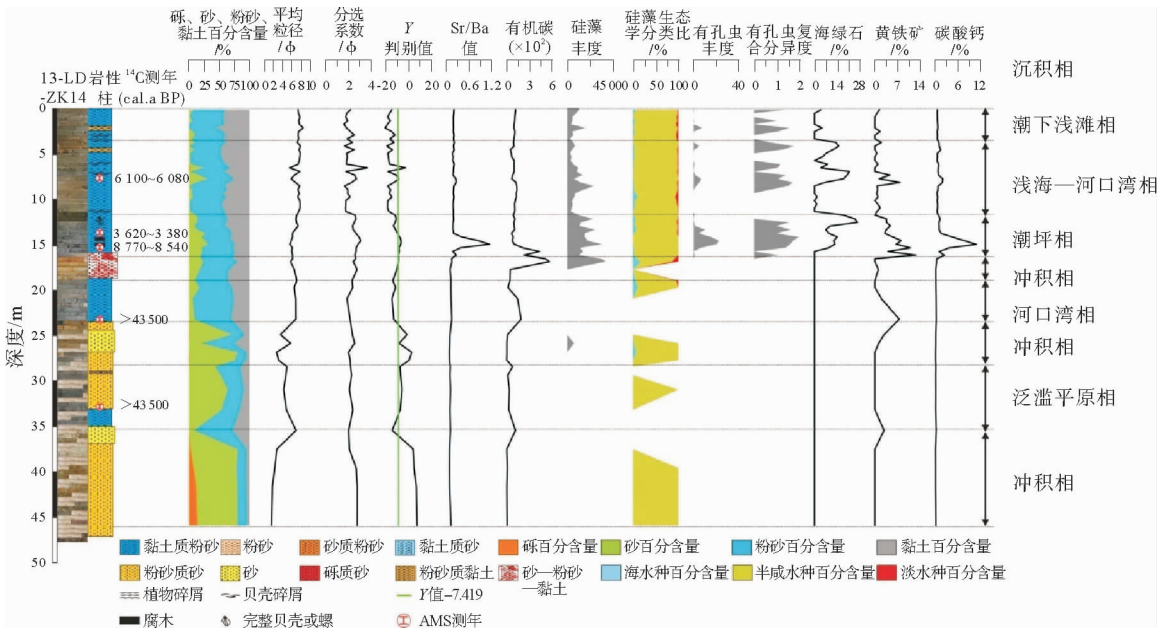


图 7 钻孔 13-LD-ZK14 综合柱状图

Fig. 7 The integrated columns of core 13-LD-ZK14

3.2.3 西滩浅水区

位于伶仃水道以西,咸淡水混合作用明显。13-LD-ZK9、12-LD-ZK2 和 13-LD-ZK19 钻孔组成一条 N—S 向的剖面,钻孔均穿透第四系,前第四系基底为燕山期的花岗岩,基底起伏不平。第

四系沉积厚度变化较大,浅滩南端最厚为 60 m。末次冰期极盛期时,本区南部沉积了一层河相砂砾层,北部没有冲积相覆盖,分布着一层遭受强烈脱水氧化的“老红砂”层。河相砂砾层和“老红砂”层的出现,将第四系沉积序列划分为 2 个地层层

序,侵蚀面上下分别为全新统和上更新统地层。

上更新统上段地层不发育,在 12-LD-ZK2 孔中缺失,在 13-LD-ZK9、在 13-LD-ZK19 孔中为泛滥平原相沉积物,厚度仅有 2~3 m;中段是一层具海相标志的高潮坪相沉积沉积物,具潮汐层理,仅 12-LD-ZK2 孔存在有孔虫化石,有孔虫丰度低,种数稀少,仅有 *Ammonia beccarii vars.*、*Protelphidium granosum* 和 *Elphidium* SPP. 3 种,属于潮间带环境。此区不整合于基岩风化壳之上的沉积存在 2 种,一套为河流相沉积,一套为老三角洲相沉积。

末次盛冰期低海面时珠江河口地区存在 2 种古地貌单元:古河谷和古河间地。本区全新统下伏地层的古地貌单元为古河谷,其上发育一层海

陆过渡相沉积,含少量有孔虫和大量的贝壳碎屑,13-LD-ZK9 孔的<sup>14</sup>C 测试年龄为 9 510 cal. a BP,13-LD-ZK19 孔的为 9 470 cal. a BP。中段地层沉积特征海相性增强,具高海面阶段的河口湾相沉积特征。有孔虫丰度在此层位最大,但优势种均为滨岸浅水和半咸水种 *Ammonia beccarii vars.*,13-LD-ZK9 和 12-LD-ZK2 孔的有孔虫复合分异度大部分<1,明显受到冲淡水的影响。上段地层为潮径流共同作用的水下浅滩相沉积,厚度大约为 3 m。该区全新世沉积层序组合表现为海侵初期的潮坪相、高海平面阶段的浅海—河口湾相和径流作用增强期的水下浅滩相,该区沉积发育特征为由北向南进积,由西向东加积。与中部浅滩沉积特征相比,该区受径流作用影响更大(图 8)。

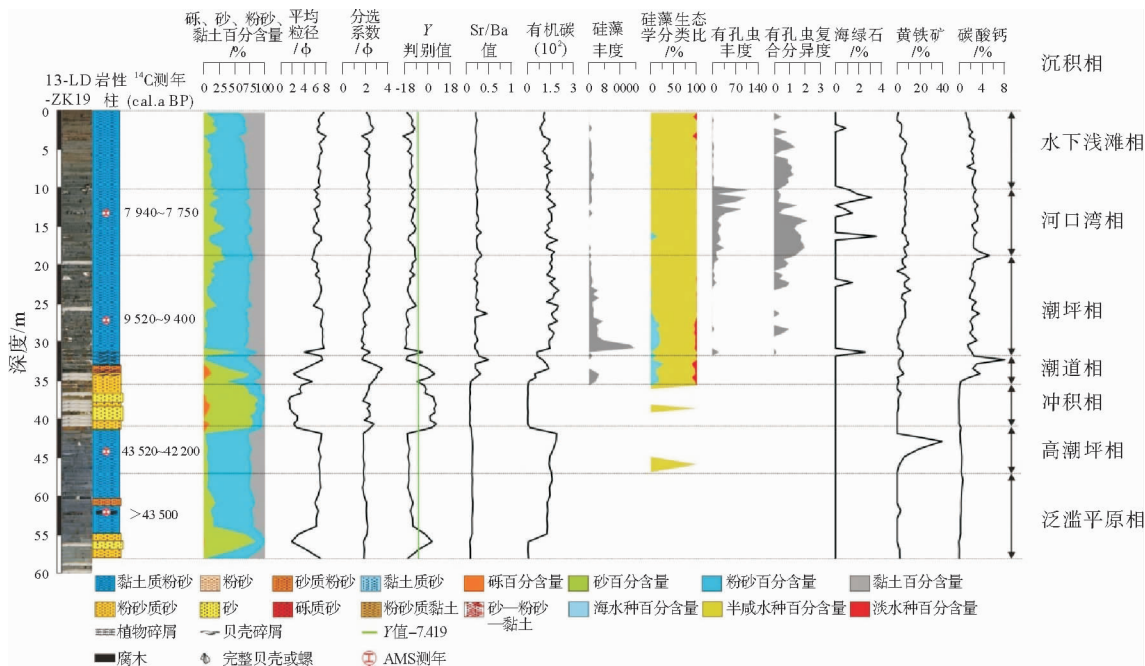


图 8 钻孔 13-LD-ZK19 综合柱状图

Fig. 8 The integrated columns of core 13-LD-ZK19

3.2.4 水下河道区

本区由 2 个钻孔组成一条 NNE—SSW 向的剖面,12-LD-ZK3 孔未穿透第四系。13-LD- ZK8 孔前第四系基底为燕山期的花岗岩。该区沉积序列包含 2 个地层层序,13-LD-ZK8 孔被花斑黏土层隔开,12-LD-ZK3 孔被“老红砂”层隔开。

该区受地形控制,上更新统地层沉积序列存在差异。13-LD-ZK8 孔受末次冰期亚间冰期海

侵的波及出现海侵层序,但海侵层未发现有孔虫化石。12-LD-ZK3 孔出现砂质岸滩相沉积物,沉积序列同 13-LD-ZK7 孔大致相似。

本区全新世沉积序列与西滩相似,沉积组合表现为海侵初期的海陆交互相、高海平面阶段的河口湾相和径流加强期的水下河道相。在 13-LD-ZK8 孔,高潮坪相沉积的顶部,取腐木做<sup>14</sup>C 测试,年龄数据为 8 550 cal. a BP。在高海面阶段

形成了一层厚达 8 m 的潮汐河口湾相黏土质粉砂。13-LD-ZK8 孔含丰富的有孔虫化石,优势种均为滨岸浅水和半咸水种 *Ammonia beccarii vars.*,复合分异度 $<1$ ,说明高海面时期此区域受径流影响明显大于其他 3 个区。

### 3.3 晚更新世以来的沉积演化

从贯穿整个内伶仃洋河口湾地层岩心的岩性、古生物、地球化学、 $^{14}\text{C}$  测年等资料分析表明,晚更新世以来发生过 2 次海进。第 1 次发生在 32~22 ka BP 的晚更新世中期;第 2 次发生在 8.5 ka BP 的中全新世以来。晚更新世以来内伶仃洋河口湾的演变可以分为以下 6 个沉积阶段。

#### (1) U1:65~32 ka BP

这一时期气候偏冷,海平面较低,内伶仃洋河口湾全境为陆地,主要的沉积作用为动力较强的河流沉积作用,形成砂砾质和砂质的河流相沉积物。沉积物中含有极少量的淡水种硅藻化石。

#### (2) U2:32~22 ka BP

气候转暖,海平面上升,研究区发生了晚更新世以来的第 1 次海侵,形成了古河口湾,沉积了溺古湾堆积物。溺古湾沉积物中含有少量的有孔虫、海相介形虫和贝壳类动物遗壳,其有孔虫组合为 *Ammonia beccarii vars.*—*Protelphidium granosum* 组合,硅藻主要为 *Cyclotella striata* 和 *Cyclotella meneghiniana*。

#### (3) U3:22~12 ka BP

海平面大幅度下降,第 2 阶段形成的海侵层遭到暴露,顶部普遍遭受风化作用,低价铁变成高价铁,土色由灰黑色变成褐红色和黄白色相间,成为“花斑”黏土,含铁质斑纹和植物碎屑。

#### (4) U4:12~8.5 ka BP

气候回暖,海平面急剧上升,研究区的低洼谷地受到海侵的影响,主要的沉积作用为河道沉积作用和往复流沉积作用,形成出现一些海进河床充填沉积和海陆交互相沉积,13-LD-ZK19 孔的潮坪相沉积厚度达到 13 m。12~10 ka BP 期间,河流入海通量增大,珠江携带的陆源物质直接注入内伶仃洋河口湾,增大了沉积速率。

#### (5) U5:8.5~5 ka BP

此阶段海平面波动上升,6~5 ka BP 期间海平面达到最高值,本区沦为深入内陆的河口湾,沉

积了富含孔虫、硅藻等海相生物的河口湾相堆积物。其有孔虫组合为 *Ammonia beccarii vars.*—*Quinqueloculina seminula*,为广盐—半咸水性浅水种组合。硅藻大部分属种为半咸水种,淡水种和海水种含量极少。13-LD-ZK19 孔的河口湾相沉积厚度达到 8 m 左右,沉积速率有所减少,随着海平面的继续回升,潮流作用增强,尽管珠江入海通量仍然较大,但保留在内伶仃洋河口湾的陆源物质反而减少,因此沉积速率降低。

发生在 5.3 cal. ka BP 左右的全球性低温事件,在内伶仃洋河口湾钻孔中可以找到相对应的沉积记录。从图 4 可以明显看出,有孔虫丰度、硅藻丰度、有机碳含量、 $\text{CaCO}_3$  含量、自生海绿石含量、Sr/Ba 值在 13-LD-ZK20 孔的 7.6~9.2 m 段发生了较大变化。采样水深和冬季海表温度这 2 个环境变量对于硅藻的分布起着重要作用,而南海近岸海域沉积硅藻绝对丰度分布与水深的关系不明显,硅藻丰度在 8.8~9.2 m 突然减少反映出此时期气温发生了较大变化。8.8~9.2 m 对应的 $^{14}\text{C}$  测年为 5 320~5 130 cal. a BP。

8~8.8 m 段的  $\text{CaCO}_3$  含量急剧上升,表明本区此时期海平面存在一个急剧上升事件。自生海绿石和 Sr/Ba 值在此段也表现为急剧上升。气温逐渐回升,硅藻含量有所回升,淡水种含量增加,表明径流作用增强。

#### (6) U6:5 ka BP 至今

海平面与现代海平面相当,波动较小,气候相对湿热。进入本阶段后,径流作用增强,潮流和径流共同作用形成了灰黑色泥、砂、粉砂互层的潮汐层理。有孔虫含量减少,优势种为 *Ammonia beccarii vars.*,其次为 *Quinqueloculina seminula* 和 *Rotalidium annectens*,优势属种为广盐—半咸水性浅水种组合,有孔虫复合分异度在河口湾内不同地区变化较大。硅藻以 *Cyclotella striata*、*Coscinodiscus divisus*、*Cyclotella stlorum*、*Melosira sulcata*、*Coscinodiscus oculatus* 为优势属种,大部分属种为半咸水种,淡水种含量增加,表明径流作用较上一阶段增强。

## 4 结论

(1)内伶仃洋河口湾地层被含花斑黏土层的

风化层隔开,划分成2大组,侵蚀面以下为上更新统地层,侵蚀面以上为全新统地层。

(2)受晚更新世以来2次海侵的影响,晚更新世以来内伶仃洋河口湾沉积演化可以分为6个阶段,65~32 ka BP,气候偏冷,海平面较低,内伶仃洋河口湾全境为陆地;32~22 ka BP,气候转暖,海平面上升,发生了晚更新世以来的第1次海侵,形成了古河口湾,沉积了溺古湾堆积物;22~12 ka BP,海平面大幅度下降,第2阶段形成的海侵层遭到暴露,顶部普遍遭受风化作用,形成了独具特色的“花斑”黏土;12~8.5 ka BP,气候回暖,海平面急剧上升,受到第2次海侵的影响,形成了海进河床充填沉积和海陆交互相沉积;8.5~5 ka BP,海平面波动上升,6~5 ka BP期间海平面达到最高值,沦为深入内陆的河口湾,沉积了富含孔虫、硅藻等海相生物的河口湾相堆积物;通过富含古气候信息的沉积记录,识别出发生在5.3 cal. ka BP左右的全球性低温事件;5 ka BP至今,海平面波动较小,气候相对湿热,潮流和径流共同作用,发展为弱潮河口湾。

#### 参考文献:

- [1] 徐勇航,陈 坚,王爱军,等. 南海北部陆架中全新世沉积记录及古环境意义[J]. 沉积学报,2012,30(3):556-563.
- [2] 葛黄敏,李前裕,钟广法,等. 南海北部第四纪高分辨率地震层序地层与古环境演化[J]. 海洋地质与第四纪地质,2012,32(4):49-60.
- [3] 张 珂,陈国能,庄文明,等. 珠江三角洲北部晚第四纪构造运动的新证据[J]. 华南地震,2009,29(Supp):22-26.
- [4] 葛黄敏,李前裕,成鑫荣,等. 南海北部晚第四纪高分辨率浮游氧同位素地层学及其古气候信息[J]. 地球科学—中国地质大学学报,2010,35(4):515-525.
- [5] 甘华阳,梁 开,郑志昌. 珠江口表层沉积物中微量元素地球化学[J]. 海洋地质与第四纪地质,2010,30(4):131-139.
- [6] 丁锡祉. 中国全新世的环境演化[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),1994,17(3):46-52.
- [7] 陈 莹. 中国第四纪岩层及其相关分支学科的研究意义[J]. 科学之友,2010,4(12):131-139.
- [8] 刘嘉麒,刘 强. 中国第四纪[J]. 第四纪研究,2000,20(2):129-141.
- [9] 孙殿卿,吴锡浩,浦庆余. 中国第四纪冰期与第四纪地层关系的探讨[M]. 北京:地质出版社,1982:1-11.
- [10] 周晓丹,王伟铭. 全球上新统一更新统界线层型剖面 and 点位介绍[J]. Journal of Stratigraphy,2002,26(2):156-159.
- [11] 万 玲. 南海新生代沉积盆地结构及地球动力学背景[C]. 中国地球物理学会,中国地球物理,中国科学技术大学出版社,2008:471-472.
- [12] 秦蕴珊. 末次冰期以来陆架环境演化及沉积作用[J]. 大自然探索,1996,15(58):24-26.
- [13] Wei X, Wu C Y. Holocene delta evolution and sequence stratigraphy of the Pearl River Delta in South China[J]. Science China Earth Sciences,2011,54(10):1523-1540.
- [14] 吴加学. 现代三角洲动力沉积过程与沉积体系发育机制评述:以珠江三角洲为例[J]. 气候变化研究快报,2012(1):113-120.
- [15] 赵焕庭. 珠江河口湾伶仃洋的地形[J]. 海洋学报,1981,3(2):255-274.
- [16] 王文介. 珠江口的沉积作用和沉积相[J]. 沉积学报,1985,3(2):129-139.
- [17] 周 蒂,范时清. 珠江口外现代沉积物运移方向的统计分析[J]. 热带海洋,1989,8(3):96-103.
- [18] 陈耀泰. 珠江口现代沉积速率与沉积环境[J]. 中山大学学报:自然科学版,1992,31(2):100-106.
- [19] 陈耀泰. 珠江口沉积分区[J]. 中山大学学报:自然科学版,1995,34(3):109-114.
- [20] 刘沛然,黄先玉,任 杰,等. 珠江口伶仃洋泥沙运动的沉积动力作用[J]. 台湾海峡,2000,19(3):304-309.
- [21] 彭晓彤,周怀阳,叶 瑛,等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示[J]. 沉积学报,2004,22(3):487-493.
- [22] 江四义,郑兆勇. 从珠江口沉积物粒度参数特征分析泥沙来源及其运移趋势[J]. 中山大学学报:自然科学版,2008,47(增刊):126-129.
- [23] 李春初,雷亚平,何 为,等. 珠江河口演变规律及治理利用问题[J]. 泥沙研究,2002,(3):44-51.
- [24] 田向平. 珠江河口伶仃洋最大混浊带研究[J]. 热带海洋,1986,5(2):27-35.
- [25] 肖志建,李团结,廖世智. 伶仃洋表层沉积物特征及其泥沙运移趋势[J]. 热带海洋学报,2011,30(4):58-65.
- [26] 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.
- [27] Tang C, Zhou D, Endler R, et al. Sedimentary development of the Pearl River Estuary based on seismic stratigraphy[J]. Journal of Marine System,2010,82(Suppl):3-16.
- [28] 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.
- [29] 甘华阳,梁 开,林进清. 北部湾北部滨海湿地沉积物中铀与镉和汞元素的分布与累积[J]. 海洋地质与第四纪地质,2013,33(3):15-28.
- [30] 何起祥. 中国海洋沉积地质学[M]. 北京:海洋出版社,2006:129-131.
- [31] 龙运作. 珠江三角洲沉积地质学[M]. 北京:地质出版社,1997:38-45.

## LATE QUATERNARY EVOLUTION AND SEQUENCE STRATIGRAPHY OF THE LINGDINGYANG ESTUARY IN SOUTH CHINA

SHI Cui<sup>1,2,3</sup>, GAN Huayang<sup>2,3</sup>, MA Shengzhong<sup>2,3</sup>, XIA Zhen<sup>2,3</sup>, LIN Jinqing<sup>2,3</sup>

(1 School of Geography and Planning, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2 Key Laboratory of Marine Mineral Resources, Ministry of Land Resources, Guangzhou 510075, China;

3 Guangzhou Marine Geological Survey, CGS, Guangzhou 510075, China)

**Abstract:** According to the data of sediment grain size, element geochemistry and paleontology, as well as  $^{14}\text{C}$  dating in the Lingdingyang Estuary cores, we studied and discussed the sequence stratigraphy and sedimentary evolution in this paper. Using the spotted clay layer as the marker of erosion, the deposits since Pleistocene could be divided into two groups, the Pleistocene under the surface of erosion and the Holocene above the erosion surface. There are six stages of evolution including two transgressions. Each stage is elaborated in climate change, sea level fluctuations, sedimentary characteristics and sedimentary processes.

**Key words:** Lingdingyang Estuary; Late Quaternary; stratigraphic framework; sedimentary evolution