



珠江三角洲西缘晚第四纪沉积演化和最大海侵古岸线的重建

周良, 王洋, 杜学斌, 卜建军, 吴俊, 吕万军, 刘秀娟

引用本文:

周良, 王洋, 杜学斌, 卜建军, 吴俊, 吕万军, 刘秀娟. 珠江三角洲西缘晚第四纪沉积演化和最大海侵古岸线的重建[J]. 沉积学报, 2022, 40(1): 119–135.

ZHOU Liang, WANG Yang, DU XueBin, BU JianJun, WU Jun, LÜ WanJun, LIU XiuJuan. Sedimentary Evolution and Reconstruction of Maximum Coastline Transgression During the Late Quaternary at the Western Margin of the Pearl River Delta[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2022, 40(1): 119–135.

相似文章推荐 (请使用火狐或IE浏览器查看文章)

Similar articles recommended (Please use Firefox or IE to view the article)

鲁北平原晚第四纪地层结构及沉积演化

Stratigraphic Structure and Sedimentary Evolution during Late Quaternary in Lubei Plain

沉积学报. 2016, 34(1): 90–101 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.01.008>

山东广饶地区晚更新世以来沉积演化与古气候变迁

Depositional Evolution and Paleoclimate Changes Since Late Pleistocene in Guangrao Area, Shandong Province

沉积学报. 2016, 34(1): 79–89 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.01.007>

江苏南通地区晚第四纪下切河谷沉积与环境演变

Sedimentary Characteristics and Environmental Evolution of the Late Quaternary Incised-Valley Fills in the Nantong Area of Jiangsu Province, China

沉积学报. 2016, 34(2): 268–280 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.02.006>

南黄海西部日照海域海侵沉积地层及其古环境意义

Transgressive Succession Offshore Rizhao in Western South Yellow Sea and Paleo-environmental Implications

沉积学报. 2020, 38(4): 790–809 <https://doi.org/10.14027/j.issn.1000-0550.2019.063>

晚更新世江苏海岸带沉积分布模拟研究

Simulations of Coastal Sediment Patterns during the Late Pleistocene in Jiangsu Coasts

沉积学报. 2016, 34(4): 670–678 <https://doi.org/10.14027/j.cnki.cjxb.2016.04.007>

文章编号:1000-0550(2022)01-0119-17

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2020.087

珠江三角洲西缘晚第四纪沉积演化和最大海侵古岸线的重建

周良^{1,2}, 王洋¹, 杜学斌², 卜建军³, 吴俊³, 吕万军², 刘秀娟²

1. 中国地质调查局海口海洋地质调查中心, 海口 570100

2. 海洋地质资源湖北省重点实验室, 中国地质大学, 武汉 430074

3. 中国地质调查局武汉地质调查中心, 武汉 430200

摘要 第四纪以来,受全球气候和海平面变化影响,海岸带地区发生了一系列强烈的海陆相互作用和海侵—海退等地质事件,包含了丰富的沉积环境演化和海平面变化等信息。选用珠江三角洲西缘台山地区的30个地质钻孔,通过¹⁴C、光释光、地球化学特征、底栖有孔虫、磁化率数据,建立了晚更新世以来的地层框架,重建了最大海侵古岸线的位置。研究表明:1)研究区自下而上划分为4个沉积单元(石排组、西南镇组、三角组、横栏组),经历了晚更新世中晚期的河流—海相交替沉积环境、末次冰期的海退暴露环境以及全新世滨海、浅海沉积环境。MIS3和MIS1的高海面时期发生了2次主要的海侵事件。2)依据钻孔圈定的晚更新世和全新世最大海侵界线最远向陆延伸分别为15.4 km和16.3 km,两条最大海侵线距离接近,走势相同。这与当时实际海平面高度之间的显著差异不符,可能是由于构造抬升作用导致晚更新世海侵时古地势较低。两期海侵沉积物的高程和年代资料揭示了研究区晚更新世以来整体处于构造抬升状态,抬升速率为+0.51 mm/a,而全新世以来整体处于沉降状态,沉降速率为-0.61 mm/a,重建的MIS3和MIS1时期最大海侵古岸线分别与研究区当前2.8 m和3 m等高线相符。此外,中国沿海不同地区由于新构造背景不同,晚第四纪海侵发生次数和最大范围在空间上整体具有“北强南弱”的特点,同一地区不同时期之间海侵强度差异并未完全遵循“早弱晚强”的特征,主要原因是除不同构造单元存在着构造差异外,海平面高度和沉积物供给变化同样对海侵强度有着一定的影响。

关键词 珠三角西缘;晚第四纪;沉积演化;最大海侵古岸线;新构造运动

第一作者简介 周良,男,1996年出生,硕士研究生,海洋地质与资源,E-mail: 1272301982@qq.com

通信作者 刘秀娟,女,副教授,E-mail: xjliu@cug.edu.cn

中图分类号 P532 **文献标志码** A

0 引言

在21世纪全球气候变暖的背景下,气温升高导致两极冰盖消融引起全球性海平面上升,对沿海地区造成一系列的影响,如沿海低地被淹没、海岸受侵蚀、海水入侵等地质环境问题,越来越引起人类社会的广泛关注^[1]。晚第四纪全球性气候波动导致海平面升降变化,沿海地区形成了多套海相与陆相交替沉积的地层^[2]。对沿海地区最大海侵古岸线的研究,不仅有助于我们了解沿海地区晚更新世以来的古气候、古环境演变,而且可以对未来发生海侵的影响提供对策和帮助。

前人对广东沿岸海侵的研究,主要集中在珠江

三角洲和粤东韩江三角洲等区域^[3-5],对珠江三角洲以西到雷州半岛之间广阔的粤西地区研究较少。20世纪70年代前,由于缺少系统的年代学研究,认为珠江三角洲地区第四系只发育全新统^[6]。70年代开始,随着¹⁴C、热释光等年代测试技术的发展,通过野外钻孔取心,从岩性、古地磁、孢粉、第四纪测年、古生物学等特征进行分析,确立了珠江三角洲开始的沉积年代为MIS3期,晚更新世以来主要有2套较大的沉积旋回,相对应2次规模较大的海侵(MIS3和全新世)和1次大的海退^[7-10]。珠江三角洲晚更新世最大海侵范围达到了太平—中堂—顺德一线以南^[11],全新世最大海侵范围更大,大致在黄埔—石楼—大良一线附近^[12]。前人在韩江三角洲的研究证实了该地区

收稿日期:2020-06-23; 收修改稿日期:2020-10-10

基金项目:中国地质调查局项目(DD20160064,DD20208013)[Foundation: China Geological Survey Project, No. DD20160064, DD20208013]

第四系沉积始于晚更新世中期,韩江三角洲在晚更新世中期整体沉降,这期海侵在 20 ka B.P. 左右达到最大范围,最西到达贾里附近^[13],仅影响到三角洲外侧平原;全新世后沉积环境趋于稳定,冰后期以来海平面大幅上升,在 7 800 a B.P. 海侵达到最大范围,最大海侵古岸线东北段达到潮州附近^[13-14]。

第四纪海侵造成中国沿海大部分低洼平原地区被淹没,最大海侵线甚至向陆延伸达 300 km^[15]。早期学者在开展调查时,主要以¹⁴C测年等测年方法确定地层年代,并根据生物组合和沉积特征来推测古海岸线位置^[16]。或者利用贝壳堤、古海蚀崖等典型的古岸线地貌和沉积标志,来恢复古海平面等^[17-18]。由于这些古岸线标志物不易完整的保存下来,导致恢复的古海岸线位置存在不确定性。因此前者仍是恢复最大海侵古岸线较为有效的方法,这种方法通过海相地层的分布来确定最大海侵古岸线,第四纪沿海地区发生周期性的海进海退,发育了海、陆交互的沉积地层,海相地层向陆方向延伸并减薄至尖灭,尖灭的位置即最大海侵古岸线的大致位置(不考虑沉积物压实和后期改造),而探测海相地层的分布主要有探地雷达^[19]和钻孔两种手段^[20]。

总得来说,前人的研究主要集中在晚第四纪海侵地层的时代归属、海侵的最大波及范围等问题,对最大海侵范围与构造升降、海平面变化之间的关系等问题的认识仍然不够深入,然而这些都是今后评价海侵对沿海地区影响的重要理论依据,值得我们进一步研究。本文结合前人研究,借助钻井资料和样品测试资料,对珠江三角洲西缘台山地区晚更新世以来的沉积记录进行综合分析,研究台山沿海地区晚第四纪沉积演化特征,并尝试重建最大海侵古岸线的位置,探讨其与新构造运动和海平面变化的关系,为研究本区新构造运动速率提供新证据、新思路。

1 区域地质概况

研究区位于广东省中南部、南海北岸、珠江三角洲西缘(图 1a),东北侧百公里之外有珠江三角洲的崖门、鸡啼门、虎跳门及磨刀门四个河流入海口,西北侧有镇江河的入海口,广海湾的北部还有一个小型河流三夹海河入海。台山沿海一带的地貌主要是丘陵、低山,海岸弯曲,岛屿众多,具港湾海岸地貌特征。研究区中南部地形较平坦,发育开阔的三角洲

冲积平原和海积平原;东部和南部多丘陵,地形起伏较大,地表为残坡积土体或不同程度的风化花岗岩。区内低山、丘陵、平原交错,海岸发育沙洲,地貌单元丰富(图 1b)。

研究区划属华南地层区东江分区和沿海分区,地层发育,分布范围颇广。主要出露侏罗纪和第四纪地层^[21]。第四纪地层以河口三角洲沉积为主,主要由晚更新世的礼乐组和全新世的桂洲组组成。礼乐组不整合于基岩风化壳之上,自下而上划分为石排组、西南镇组和三角组,时代属晚更新世;桂洲组指平行不整合覆于礼乐组或超覆于基岩风化壳之上的一套地层,自下而上可划分为杏坛组/三角组、横栏组、东升组、万顷沙组和灯笼沙组,时代属全新世。

研究区构造上属于华南褶皱系粤中凹陷南部的增城—台山隆断束(图 1a),区内断裂构造较发育,按断裂构造产出形态主要发育 NNE 向断裂,控制着河道延伸方向、古海岸线和第四系沉积物的展布。喜马拉雅运动期研究区第三纪一直处于隆升状态,一直到第四纪晚更新世才接受沉积。在地壳的继承性和差异性的新构造升降运动中,大多数学者认为研究区整体上主要以继承性构造抬升为主^[21]。

2 材料与方法

项目于 2017 年 1 月到 2018 年 7 月在台山市陆域以及广海湾、川山群岛海域共采集 30 个钻孔岩心。岩心经现场剖开,进行详细的岩性描述、分层、拍照。

选取 ZK06、ZK11、ZK22、ZK29、ZK45 孔的 10 个层位的样品和 DZK02 孔的 3 个层位样品分别送往北京大学第四纪年代测试实验室和美国 Beta 分析实验室进行¹⁴C测年,其中贝壳样品 4 件,含碳屑泥质沉积物样品 4 件,腐木和植物碎屑样品 5 件。测试结果通过 CALIB 程序对¹⁴C 的放射性年龄数据校正为日历年龄,在校正曲线的选择上,贝壳等海洋无机碳样品选用的是 Marine13 校正曲线,对于淤泥样品中的有机质,由于样品来自海陆交互的海岸带地区,校正曲线选择海洋和北半球大气混合曲线。根据 Southon *et al.*^[23]对中国南海地区区域海洋碳储库效应的研究,我们在校正过程中选用 $\Delta R = -25 \pm 20$ a 进行校正。采集 ZK22、ZK25、ZK34 孔的 8 份样品送往南京师范大学光释光实验室进行石英颗粒(4~11 μm)的光释光测年。采用 XL3t950 型手持式 XRF 矿石元素分析仪对 DZK02 钻孔的岩心样品进行元素测试,采样间隔

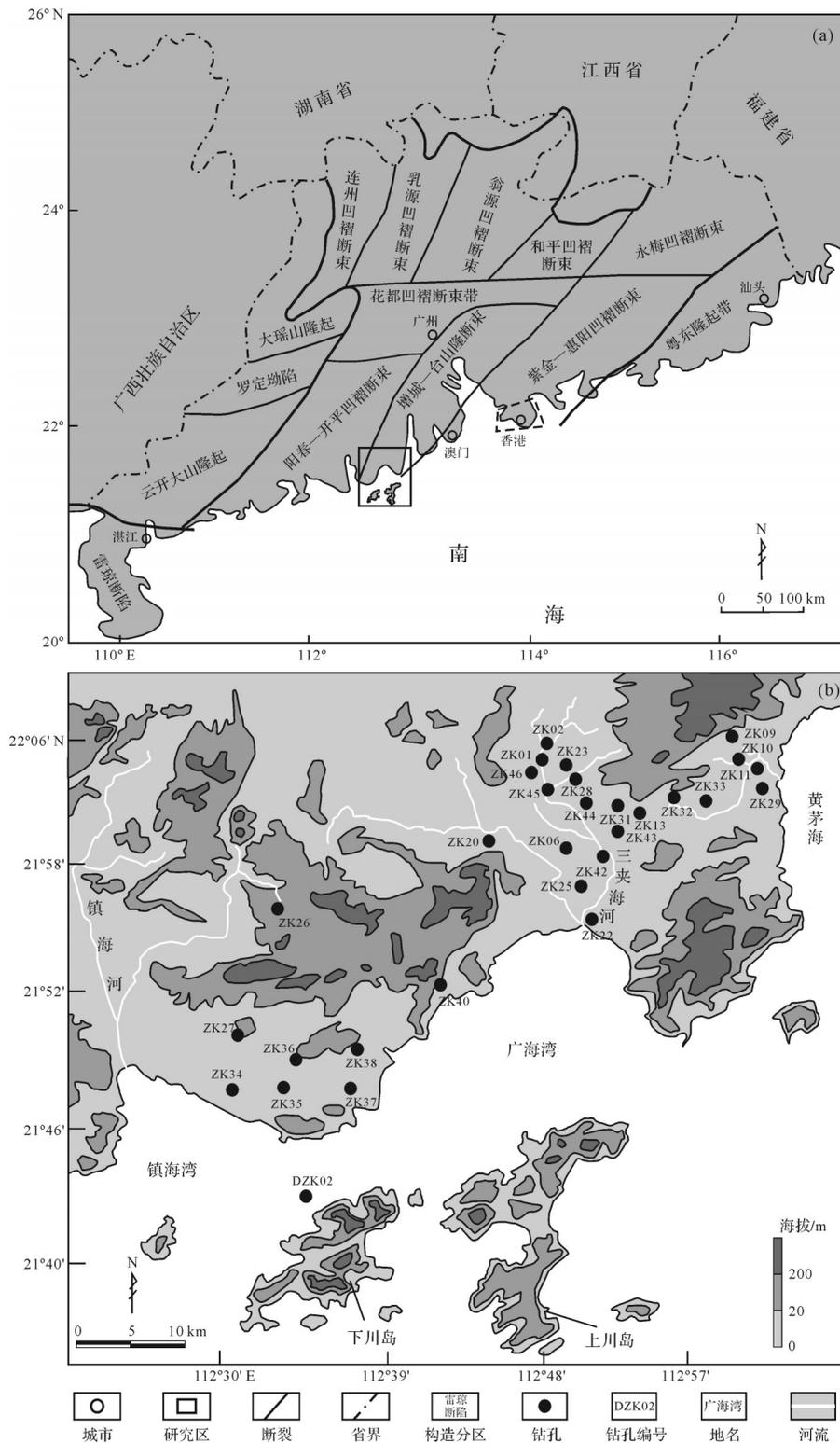


图1 (a)广东省大地构造简图(修改自吴富强等^[21]);(b)珠江三角洲西缘钻孔位置图
 Fig.1 (a) Geotectonic schematic map of Guangdong province(modified from Wu *et al.*^[21]);
 (b) Location of boreholes in western Pearl River Delta

约 10 cm,共测试样品 340 个。使用 SM-30 型便携式磁化率仪,以 20 cm 为间隔对 ZK06、ZK20、ZK33、DZK02 孔进行磁化率测试,共测试样品 450 个。

对 DZK02 孔 23 个沉积物样品进行微体化石(有孔虫)的处理、化石挑选后送至中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室进行鉴定。

3 结果

3.1 测年结果及岩性地层划分

^{14}C 和光释光测年结果显示年代随地层埋深的增大而逐渐变老(表1,2)。顶部人工填土沉积物年代基本限定在1 ka B.P.之内,其下部淤泥层沉积物年代在11~1 ka B.P.,大约在16~11 ka B.P.(末次冰期)期间形成了花斑黏土层,花斑黏土层下部的粉砂/黏土年代大约在38~16 ka B.P.,底部最老地层年代大致在50 ka B.P.(图2)。

研究区钻孔整体上以海陆交互作用沉积为主,发育两期海相层,根据钻井取心岩性综合分析,研究区从基底往上,共划分为4个沉积地层单元(表3),每个沉积单元岩性组合和识别特征明显。

3.2 地球化学特征

蓝先洪等^[24]分析珠江三角洲第四系和现代河流与浅海的表层样品地球化学数据,使用Sr和Ba的含量和比值判别海相与陆相等沉积特征,将 $\text{Sr}>100$ 、

$\text{Ba}>400$ (单位为 10^{-6} ,下同)用来指示珠江三角洲海相沉积物, $\text{Sr}<50$ 、 $\text{Ba}<300$ 指示珠江三角洲陆相沉积物; $(\text{Sr}/\text{Ba})<0.5$ 时代代表微咸水沉积环境, Sr/Ba 值在0.5~1.0时代代表半咸水沉积环境, $(\text{Sr}/\text{Ba})>1.0$ 时代代表海水沉积环境。研究区利用元素含量和比值判断海陆相沉积时参考珠江三角洲的判别标准。 Ba/Al 和 Zn/Al 代表的古生产力指标主要与东亚冬季季风和夏季季风的强化有关。

基岩和风化层以上至深度30 m, $\text{Ba}<400$, $\text{Sr}<50$, Sr/Ba 值均小于0.5, Ba/Al 值基本稳定在0.04~0.05, (Zn/Al) 值基本稳定在0.005左右;深度在21~30 m, $\text{Ba}>400$, $\text{Sr}>50$,仍处于微咸水环境, Ba/Al 值和 Zn/Al 值整体上出现了较为明显的升高,在26 m处达到了一个峰值;在18~21 m的花斑黏土层,各项指标在这个阶段都出现了明显的降低, $\text{Ba}<300$, $\text{Sr}<50$, $(\text{Sr}/\text{Ba})<0.5$, $(\text{Ba}/\text{Al})<0.05$, $(\text{Zn}/\text{Al})<0.01$;之后18 m以上,整体上 Ba 、 Sr 含量分别大于400、100, Sr/Ba 值波动上升,在10 m处达到峰值,处于半咸水环境,之后逐渐

表1 ^{14}C 测年结果
Table 1 AMS ^{14}C dates

钻孔编号	埋深/m	测年材料	常规年龄/a B.P.	平均日历年龄/cal a B.P.
ZK06	2.70	淤泥	1 270±25	1 223
ZK06	15.40	淤泥	9 725±40	11 178
ZK11	5.50	贝壳	4 380±25	4 922
ZK11	19.20	黏土	39 490±340	43 182
ZK22	15.35	腹足类	7 310±30	8 112
ZK22	24.80	植物碎屑	34 390±230	38 861
ZK29	13.50	贝壳	7 895±35	8 682
ZK29	23.20	腐木	36 360±290	41 025
ZK45	6.14	海月	7 300±45	8 110
ZK45	13.20	植物茎	35 190±260	39 765
DZK02	7.80	贝壳	6 040±30	6 485
DZK02	12.30	贝壳	6 700±30	7 255
DZK02	18.20	淤泥	8 400±30	9 030

表2 光释光测年结果
Table 2 OSL dates

钻孔编号	深度/m	测年材料	年龄/ka	误差/ka
ZK22	21.2	暗灰色细粉砂质黏土	29.7	3.1
ZK25	18.7	灰黄色—灰白色黏土	15.7	1.6
ZK25	19.8	深灰色淤泥夹粗中砂	16.1	1.5
ZK25	28.5	灰白色中粗砂	43.5	4.4
ZK25	32	灰黄色含黏土含砂质砾石	50.6	4.7
ZK34	18.5	灰白色含泥砂层	37.8	3.6
ZK34	20.9	灰白、浅黄色含泥砂层	40.7	3.5
ZK34	26.1	灰白色砂砾	50.7	4.8

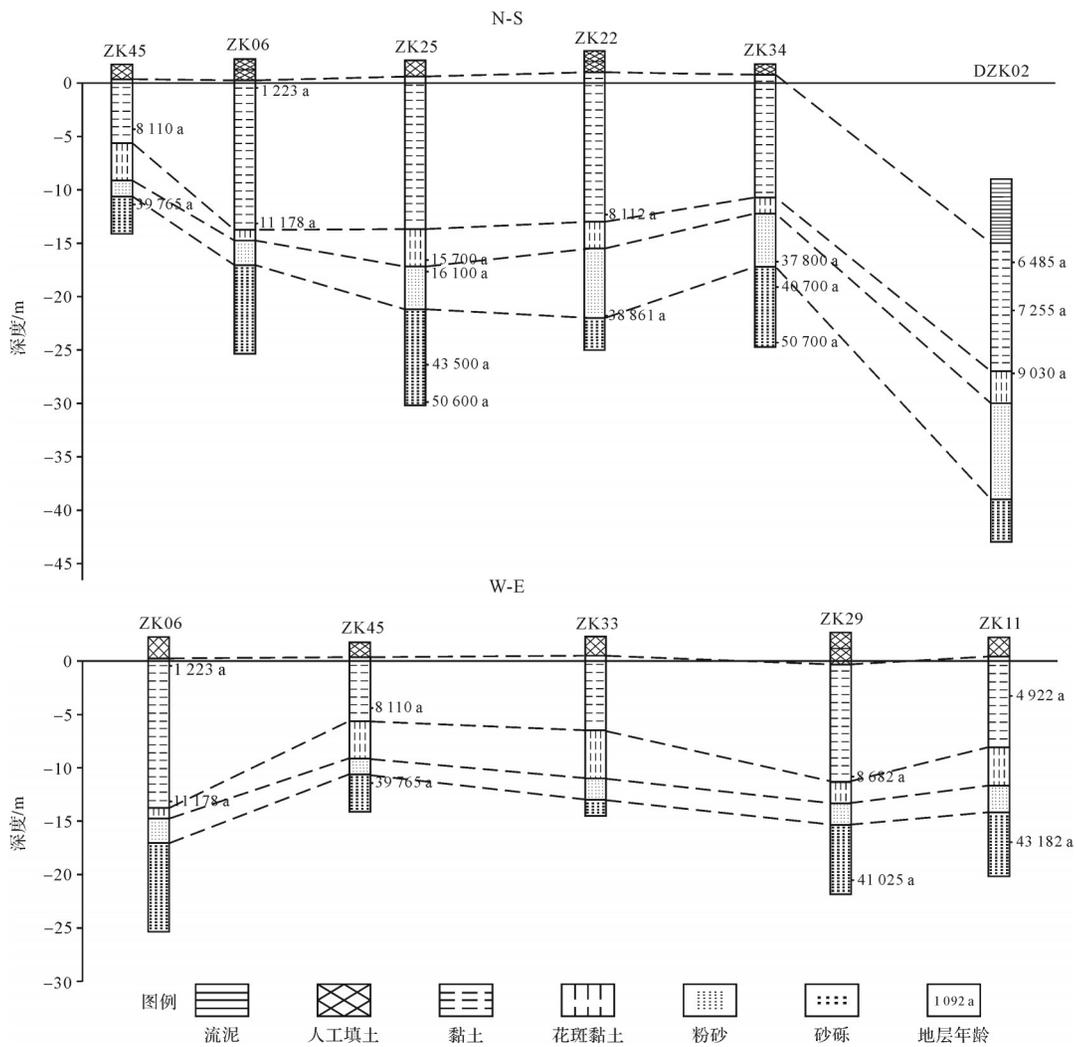


图2 研究区钻孔 N-S 和 W-E 方向地层对比横剖面图

Fig.2 Comparison of strata in N-S and W-E directions determined from nearby cores

表3 研究区岩性地层划分

Table 3 Lithological stratigraphic division of study area

地层	年代/ka B.P.	岩性特征
第1沉积单元 (上部流泥层、 下部黑色淤泥,含贝壳)	11 ka 至今	上部为褐灰色流泥,很湿,流塑,局部含有少量粉细砂和贝壳,形态不成条形,比较偏软,有腥味。 下部为深灰—灰黑色淤泥层、砂泥互层、富含贝壳等钙质壳体,底部见碳屑,局部见大量的贝壳碎片。
第2沉积单元 (花斑黏土层)	16~11	浅灰、灰白、黄白、红黄色花斑黏土,粉砂质黏土,砂质黏土,是研究区内介于晚更新世和全新世之间的标志层。
第3沉积单元 (深色黏土泥)	38~16	粉砂质、泥质沉积为主,颜色多为灰色,局部见碳屑,偶见生物碎片。
第4沉积单元 (砂岩组合)	50~38	砂砾层、砂层为主,并且砂层以中粗砂为主,砂层颜色为灰色、褐黄色,较松散。

减小,恢复到微咸水环境, Ba/Al 和 Zn/Al 值开始升高,然后转为降低并逐步趋于稳定(图3)。

3.3 有孔虫

经镜下鉴定统计,本批次样品中均见有数量不等的有孔虫化石,除个别样品中数量较丰富外,大多

数样品中的有孔虫丰度及分异度均较低或极低。

钻孔下部深度 30 m 以下 18~21 m 的样品产出有孔虫数量较少,丰度和分异度均较低,近乎为 0;深度 28 m 以上有孔虫丰度和分异度升高,几乎全为底栖有孔虫,主要为个体较小的 *Ammonia aomoriensis*,

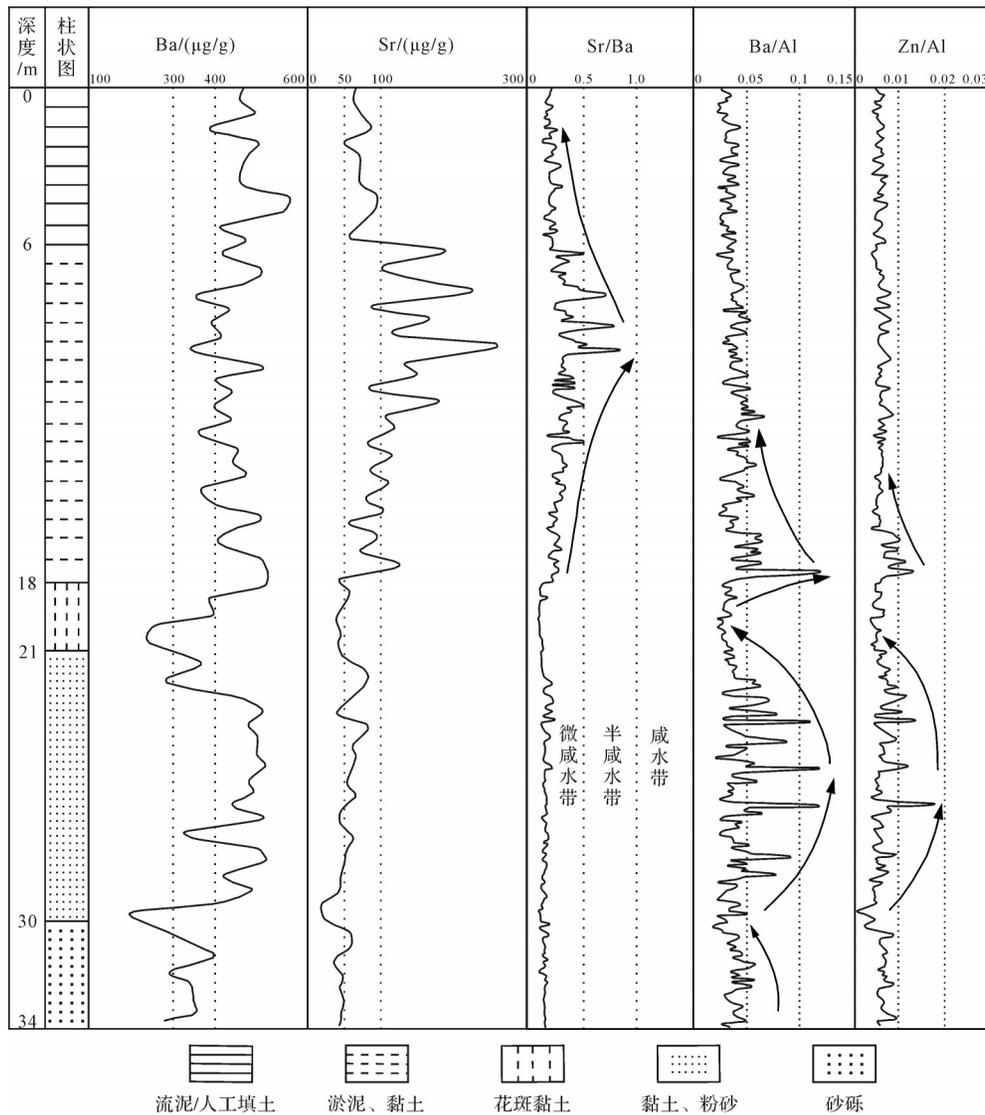


图3 DZK02孔指相元素浓度分布图

Fig.3 Concentrations of indicator elements in core DZK02

Ammonia beccarii vars. 等弱海相性代表属种, 偶见有 *Rotalidium annectens*, *Elphidium advenum*, *Elphidium hispidum* 等破碎壳体, 应为搬运再沉积壳体。至花斑黏土层有孔虫丰度和分异度又逐渐降低, 接近于0。总体来说, 上部0~18 m有孔虫丰度和分异度较高, 深度18~9 m丰度和分异度出现大幅度增大, 后又迅速下降; 深度6 m以上有孔虫分异度仍处于增大趋势。该段有孔虫以底栖类型为主, 仅个别层位见有少量极细小的浮游类型壳体。底栖类型数量最多的为钙质透明壳的 *Elphidium*、*Rotalidium*、*Ammonia* 等属, 瓷质壳类型的 *Quinqueloculina*、*Massilina*、*Spiroloculina* 等属亦有少量属种出现。优势属种组合为 *Elphidium hispidulum*、*Elphidium advenum*、*Rotalidium annectens*、

Ammonia beccarii 等, 优势属种在深度6~18 m和21~30 m两部分较富集, 该类型组合多为广盐性分子, 主要出现于近岸的温暖浅水环境中, 本化石群中偶见有一些海陆交互环境中的典型分子(如 *Ammonia beccarii vars.*、*Cribrononion subincertum* 等), 同时又极少或未见浮游类型(图4)。

3.4 磁化率

气候温暖阶段, 大洋环流增强、淡水注入增多会带入较多的外源碎屑矿物, 在较强氧化条件下, 磁性矿物浓度增加, 磁化率较高一般指示较高的沉积水位^[25]。钻孔下部磁化率普遍比较稳定, 仅有部分轻微的波动, 往上粉砂层磁化率有了一定幅度的波动上升, 到花斑黏土层底部磁化率较低且稳定, 斑黏土层

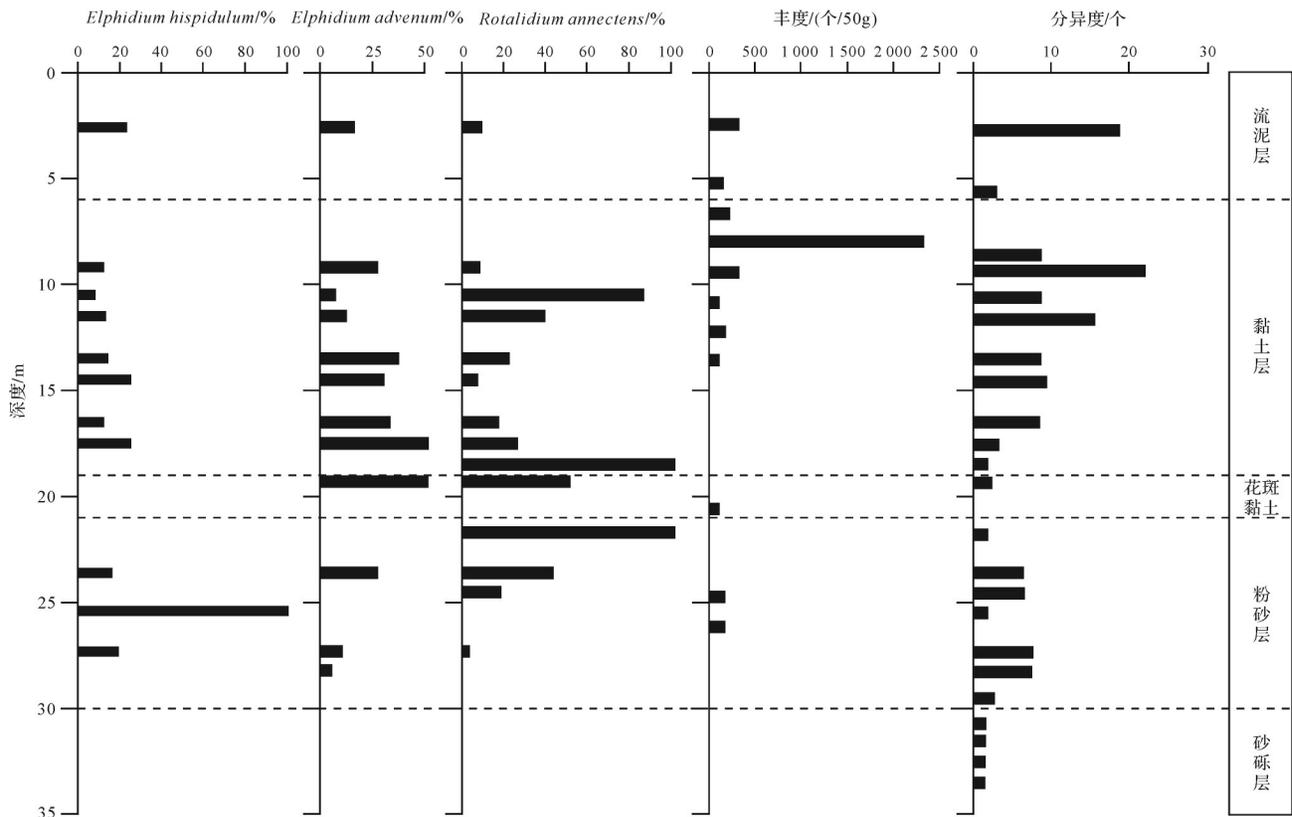


图4 DZK02孔有孔虫优势种属分布及丰度、分异度变化特征

Fig.4 Relative abundance of main species and total abundance and diversity of planktonic foraminiferal fauna in core DZK02

上部至上部淤泥层磁化率开始显著升高,磁化率较离散,波动幅度较大(图5)。

3.5 最大海侵古岸线的划定

若只考虑是否发育同一期海侵地层,那么晚更新世最大海侵时,最大海侵线达到了ZK46、ZK45、ZK06、ZK42、ZK13、ZK33、ZK11和ZK01、ZK44、ZK43、ZK31、ZK32、ZK10以及ZK27、ZK35、ZK37和ZK26、ZK36、ZK38之间;全新世最大海侵时,最大海侵线大致在ZK01、ZK44、ZK43、ZK13、ZK33、ZK10和ZK02、ZK23、ZK28、ZK31、ZK32、ZK09以及ZK27、ZK36、ZK38和ZK26、ZK40之间(图6)。然而,由于研究区丘陵分布广泛,我们不难发现ZK34、ZK35、ZK37三个钻孔南北两侧均有丘陵地貌分布(图1b),海侵时海水会绕过海拔较高的山地丘陵地区而首先淹没海拔较低的平原区,结合地形特征我们推断ZK34、ZK35、ZK37三个钻孔两侧应该存在2条晚更新世最大海侵古岸线才是合理的,除上述外在ZK34、ZK35、ZK37以南还应该存在一条(图6)。同样,该区域全新世最大海侵古岸线理论上也应该存在两条,但是由于ZK34、ZK35、ZK37三个钻孔以南缺少钻孔

资料,我们只能确定ZK34、ZK35、ZK37三个钻孔以南存在另一条全新世最大海侵古岸线,但无法确定其准确位置。因此,我们根据海侵地层尖灭点圈定最大海侵古岸线时,一定不能忽视地形地貌对最大海侵古岸线分布的影响。

晚更新世海侵最大海侵界线向陆最远位置在ZK46和ZK01之间,距现今岸线约15.4 km,全新世海侵最大海侵界线向陆最远位置在ZK01和ZK02之间,距现今岸线约16.3 km,两条最大海侵古岸线走势大致相同(图6),全新世最大海侵范围略大于晚更新世最大海侵范围,总得来说极为接近。

4 讨论

4.1 研究区沉积演化特征

根据钻孔岩性特征,并结合测年数据、微体古生物分布、地球化学和磁化率等数据,研究区晚更新世以来的沉积演化主要分为5个阶段。

第1阶段(石排组):50~38 ka B.P.

在此之前,研究区与珠江三角洲地区一样,一直处于风化、剥蚀、侵蚀的环境,基岩裸露,直到这个阶

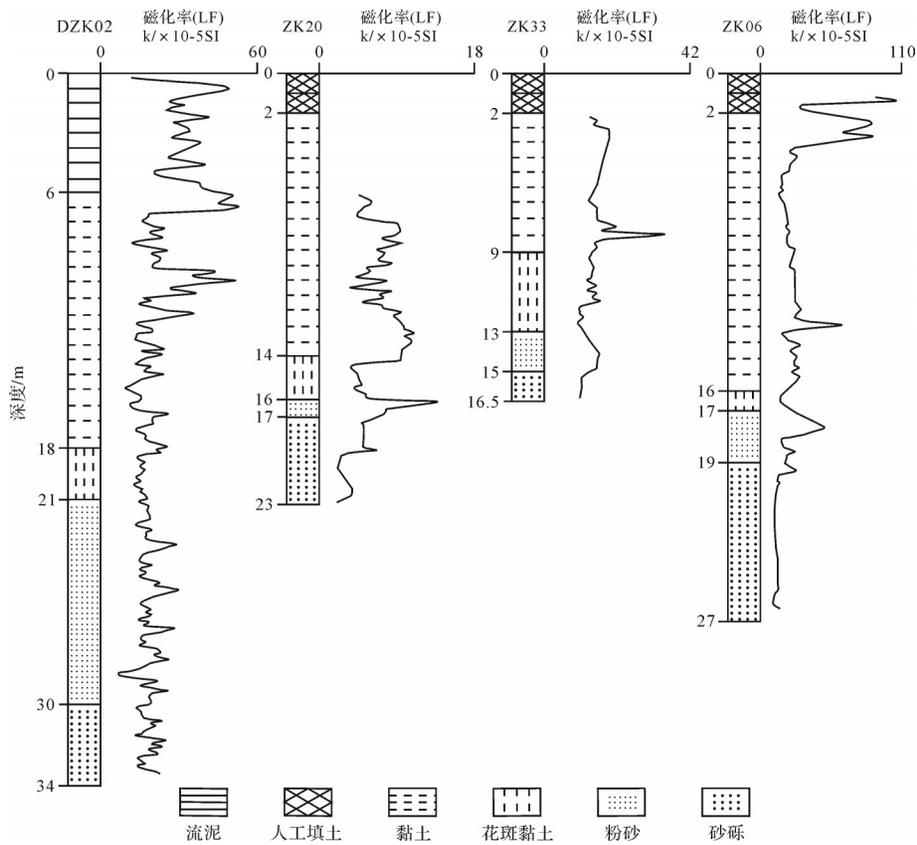


图5 DZK02、ZK20、ZK33、ZK06孔磁化率变化曲线

Fig.5 Changes of magnetic susceptibility in cores DZK02, ZK20, ZK3 and ZK06

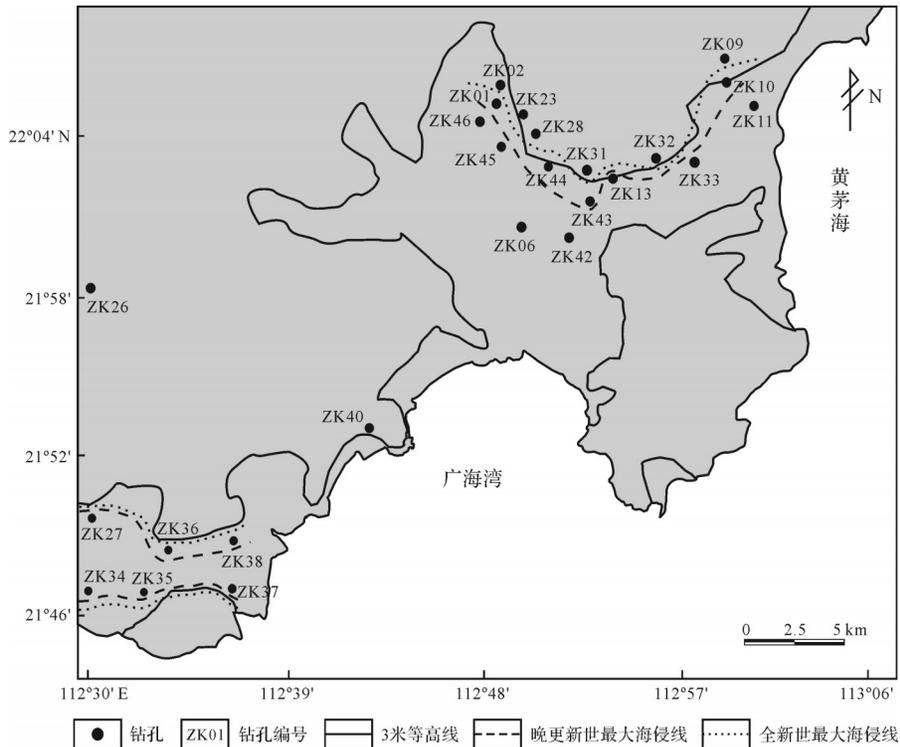


图6 研究区晚第四纪两次最大海侵古岸线位置及3米等高线分布

Fig.6 Location of maximum transgression coastline in Late Quaternary and 3 m contour

段才开始接受第四纪沉积^[6]。该时段沉积了较厚的冲积砂砾层,沉积地层中未发现各类微体古生物记录、贝壳碎片和腐木碎屑等,Ba、Sr、Sr/Ba值均处于低值,磁化率变化幅度小,代表了古河流的河流冲积作用。

第2阶段(西南镇组):38~16 ka B.P.

晚更新世玉木亚间冰期,随着气候转暖,海平面波动上升(图7),研究区发生了晚更新世以来第一次海侵,发育了以粉砂质黏土至淤泥质细砂为主的沉积地层,代表海相性种属的底栖有孔虫 *Elphidium hispidulum*、*Elphidium advenum* 较富集,Ba、Sr元素值指示微咸水环境,磁化率开始出现突变,代表了河流与海水潮流动力相互作用的浅海相沉积环境,约26~24 ka B.P.到达本次海侵高海平面期,在此阶段中国东海、珠江三角洲、红海等地区基本都发育了此次海侵地层,且最高海平面期的年代也基本一致^[26-28],说明此次海侵具有一定的普遍性。

虽然众多学者关于广东沿海晚更新世海侵层的年代现在仍无定论,比如Zong *et al.*^[29]认为此次海侵层经历了之后末次冰期时的暴露环境,地层遭受风化,导致测年数据比地层真实年龄普遍偏年轻,但仍存在较大争议,但研究区和珠江三角洲众多钻孔的测年数据^[7-10]仍显示晚更新世这次海侵年代上属于MIS3期。

第3阶段(三角组):16~11 ka B.P.

约22 ka B.P.以后,全球进入了末次冰期,全球

海平面发生大幅下降(图7)^[30],研究区甚至南海北部都处于陆相暴露侵蚀的环境,该时期广泛发育了由风化作用形成的杂色花斑黏土,可见少量零星底栖有孔虫,壳体呈黄褐色,遭受过风化作用,Ba、Sr元素含量重回低值,磁化率降低至稳定,指示较强的氧化环境。前人研究认为,该时期全球最低海平面大致在16~18 ka B.P.^[31],与研究区末次冰期最低海平面时间基本相同。

第4阶段(横栏组):11~1 ka B.P.

进入全新世,全球气候变暖,海平面开始迅速回升,研究区开始发生晚更新世以来第二次海侵,发育深色淤泥和粉细砂,钻孔中出现大量微体古动物群记录,优势属种组合为 *Elphidium hispidulum*、*Elphidium advenum*、*Rotalidium annectens*、*Ammonia beccarii* 等海相属性底栖有孔虫,Ba、Sr、Sr/Ba值指示半咸水环境,磁化率再次突变至高值,代表浅海潮坪沉积体系。至6~5 ka B.P.,海平面上升至最高值(图7),研究区除丘陵山地外,大部分平原地区均被海水淹没,形成了古河口湾。这次海侵发生于全新世大暖期,持续时间较长,范围也比晚更新世海侵更广,与珠江三角洲地区研究结果相一致^[9,13-14]。

第5阶段(现代沉积层):1 ka B.P.至今

4 000年以来,全球海平面基本与现今海平面一致(图7),并伴随着小规模波动变化,研究区现今海陆格局基本形成,开始接受现代沉积,该阶段的沉积环境会受到一定程度人类活动的影响。

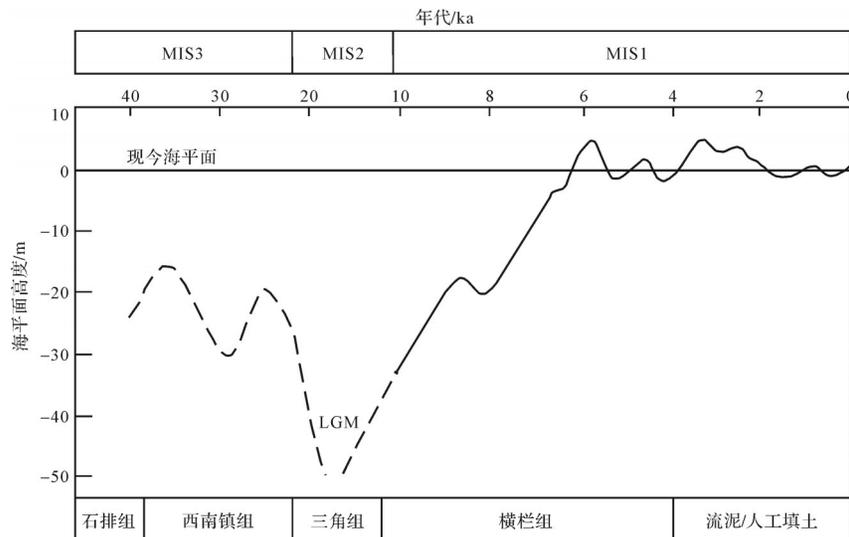


图7 50 ka B.P.以来南海及其邻近海区海平面变化曲线与研究区沉积序列对应关系(修改自张虎南等^[30])
Fig.7 Sea-level change in South China Sea and adjacent seas since 50 ka B.P., and relationship to sedimentary sequence (modified from Zhang *et al.*^[30])

4.2 研究区晚第四纪最大海侵古岸线分布与构造运动、海平面变化的关系

第四纪以来,以冰期—间冰期交替为主要特征的全球气候变化造成海平面频繁波动^[32]。根据古气候研究结果,晚更新世中晚期最高海平面大约低于现今海平面数20~60 m,全新世最高海平面高于现今海平面约2~5 m,两个海侵时期的最高海平面相距数十米^[33-34],两次最大海侵范围的极度接近与海侵时期实际全球海平面高度之间的显著差异不符,造成这种现象的主要原因可能是在全球海平面变化的大背景下,研究区构造抬升作用引起的可容空间逐渐减小造成的。研究区晚更新世以来的海进—海退,主要受两极冰盖体积控制的全球绝对(水动型)海面变化和该区构造垂直升降共同控制的,“水动型”和“地动型”海面变化相互叠加^[35],还构造运动的本来面目,是深入了解研究区晚更新世以来沉积演化特征的基础和关键。

目前众多学者对华南沿海晚更新世以来的海平面变化仍存在较多争议,其中主要分为两种观点。一种观点认为晚更新世到末次冰期华南海平面从-2 m或-4 m降至-25 m以下,进入早全新世海平面开始大幅度回升,约在距今4 ka时接近现今海平面高度^[18,36]。而另一种观点则认为40~10 ka B.P.以来海平面在-2 m至-12 m波动,并不存在低于-20 m的低海面时期^[37],全新世开始大幅度上升,距今6 ka左右接近现代海面,距今4 ka期间曾出现高于现今海平面2~3 m的高海面^[38]。张虎南等^[30]根据华南236个样品的年代、埋深和构造升降等数据,绘制出符合华南地区的晚第四纪海平面变化曲线,本文在计算和分析时主要参考此古海面资料。

构造升降速率的计算方法较多,前人在研究中通过海南、台湾海域的珊瑚礁等古标志物的分布高度,得到了全新世以来的构造抬升速率^[18],为研究新构造运动提供了一种新思路。本文根据前人的研究思路,引入了构造升降速率的计算公式:

$$V=(A+E)/t \quad (1)$$

其中: V 代表垂直构造运动速率(+代表构造抬升,-代表构造沉降), A 代表海相沉积物的海拔高度, E 代表海相沉积物沉积时的古海面高度(高于现今海平面为正值)^[37-38]。

根据研究区晚第四纪两次海侵层位的现代埋深,暂不考虑构造沉降和沉积物压实等引起的地层

升降,从最大海侵古岸线向海一侧的钻井资料可以看出,研究区晚更新世海侵地层埋深的现代标高在-3.9~-12.7 m(图8a),这与众多学者研究所认为的晚更新世中晚期存在-20~-60 m的最高海平面的结论不符合^[18,36,38],可以得到的是,晚更新世海侵以来,研究区域构造运动整体上应该发生了明显的地层抬升,ZK22和ZK35孔内深度23.5 m和11.9 m处的样品测年结果分别为29 704 a B.P.和28 148 a B.P.,据此推算的抬升速率分别为+0.32 mm/a和+0.70 mm/a,平均抬升速率为+0.51 mm/a(表4)。全新世海侵层的现今海拔为+1.1~-15.4 m(图8b),一般认为全新世最高海面高于现今海平面5 m左右^[30],黄玉昆等^[39]根据调查资料,认为高出现代海面的沉积物大部分位于上升地区,而在下降区(韩江三角洲、珠江三角洲、漠阳江河口等)海侵层都分布在现代平均潮面以下,ZK06和ZK11孔内深度4.6 m和5.5 m处的样品测年结果分别为4 859 a B.P.和4 922 a B.P.,据此推算的沉降速率分别为-0.51 mm/a和-0.71 mm/a,平均值为-0.61 mm/a(表4)。

本文计算结果没有考虑沉积物压实、静力均衡沉降以及后期侵蚀等非构造因素的影响,加上目前学术界比较认同不存在适应于全球性的海平面变化曲线^[38],在进行不同研究时选用的海平面曲线有所差异,而且在对晚更新世海相沉积物的计算中没有按照不同的年代数据细分为晚更新世以来和全新世以来两大时段,其计算所得抬升速率表示晚更新世以来升降相抵后的整体平均速率^[36],导致不同研究计算所得构造升降速率可能会存在一定的偏差,和前人研究结果相比,虽有一定偏差,倒也合理(表5)。

掌握了研究区晚第四纪构造升降速率的基本信息,结合两次海侵时期最高海平面高度,消除构造升降和后期沉积的影响,可以反推出两次最大海侵古岸线的大致位置。全新世最大海侵时代约6 ka B.P.,当时海平面高于现今海平面约2 m(图7),估算全新世最大海侵以来研究区整体沉降了约4.2 m,根据钻孔估算全新世最大海侵以来研究区地层平均沉积厚度约为5.3 m,理论计算得到全新世最大海侵古岸线大致与研究区现今3 m等高线大致相符(图6);晚更新世最大海侵时代约25 ka B.P.,当时海平面高度低于现今海平面约20 m(图7),晚更新世最大海侵以来研究区整体抬升了约12.8 m,根据钻孔估算晚更新世最大海侵以来研究区地层平均沉积厚度约为10 m,

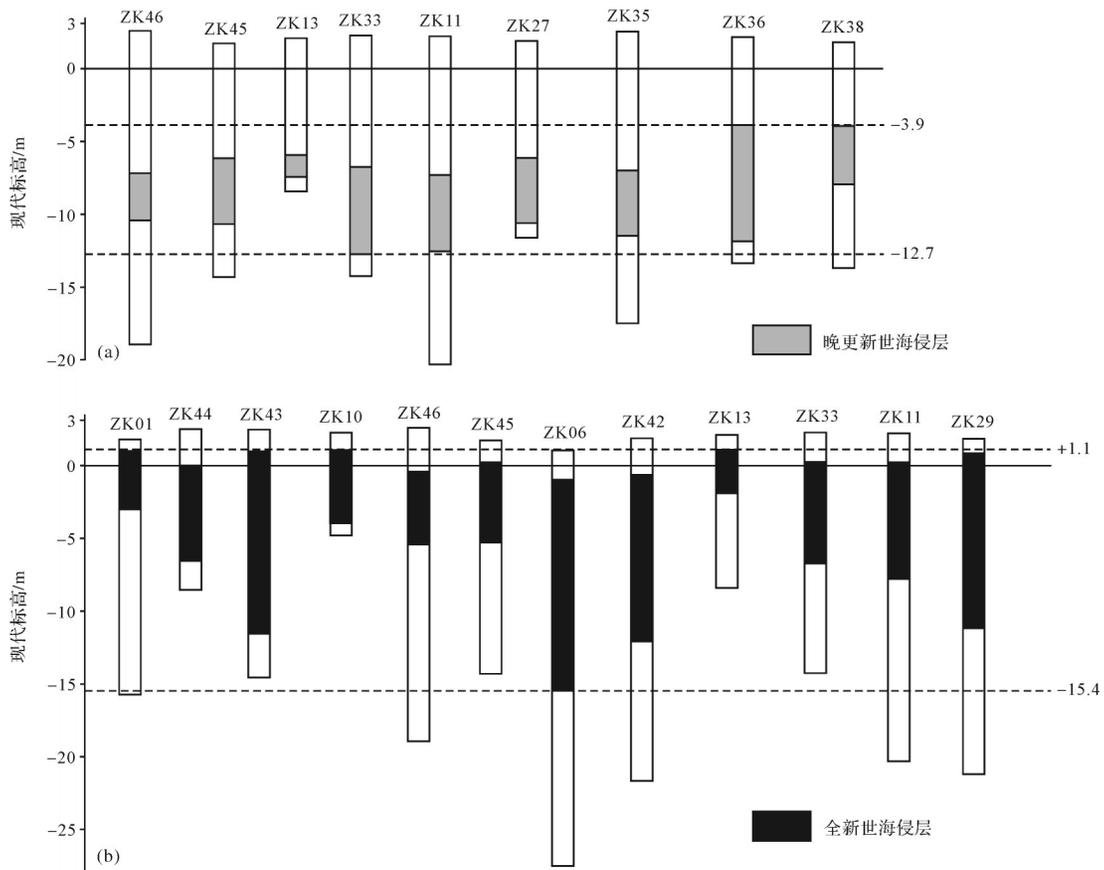


图8 研究区晚第四纪两期海侵地层的现代标高
(a)全新世;(b)晚更新世

Fig.8 Modern elevation of marine facies stratum
(a) Holocene; (b) Late Pleistocene

表4 两期海侵沉积物样品构造升降速率计算结果

Table 4 Rate of vertical tectonic motion calculated from sediment transgression

全新世					晚更新世				
钻孔编号	标高/m	年龄/a B.P.	古海面高度/m	构造升降速率/(mm/a)	钻孔编号	标高/m	年龄/a B.P.	古海面高度/m	构造升降速率/(mm/a)
ZK06	-2.4	4 859	+0.1	-0.51	ZK22	-20.5	29 704	-30	+0.32
ZK11	-3.3	4 922	+0.2	-0.71	ZK35	-9.4	28 148	-29	+0.70

表5 台山地区新构造运动研究成果

Table 5 Neotectonic movement in Taishan area, as determined in this study

地区	时代	构造升降特征
台山	近代	-1~ -2 mm/a ^[40]
台山—阳江	20世纪60年代以来	-1~ 0 mm/a ^[41]
台山	1954—1989年	广州地区至恩平地区构造升降由负值转换为正负交接,恩平地区+0.7mm/a,恩平东侧的台山地区-0.5~0 mm/a ^[42] 。
台山海晏、沙腰、都斛	全新世	0.5 mm/a ^[38]
粤中地区	晚第四纪	除少数地方外,大多数地方从晚更新世或全新世以来,总趋势大致呈继承性的海岸升降运动,晚更新世以来形成的三角洲、盆地内部呈继承性沉降,盆地边缘及外部总趋势主要表现为抬升,整体抬升速率约为0.55 mm/a ^[37] 。
恩平—台山	晚更新世以来	本区新构造活动活跃,存在海拔分别为450 m、350 m、200 m的三级阶梯,表明晚更新世以来地壳运动以间断性上升为主 ^[22] 。

因此,可以得到晚更新世最大海侵古岸线大致与研究区现今2.8 m等高线大致相符(图6)。这个结果进一步论证了研究区晚第四纪两次最大海侵古岸线走势相似、距离相近的主要原因,由于在全球海平面变化的大背景下,不同时期构造升降情况不一致,但整体上仍处于构造抬升的状况,从而导致的晚更新世海侵时期的古地势相较于全新世海侵时偏低,提供了发生海侵所具备的可容空间,即使最高海平面较低的情况下仍发育了范围与全新世海侵相近的海相沉积地层。

4.3 中国沿海晚第四纪海侵的新构造背景

晚第四纪以来,受冰期—间冰期控制,在中国沿海尤其是渤海、黄海和东海及华南沿海平原均发生了数次与全球气候和区域海平面变化相吻合的海侵事件^[43]。前人关于渤海湾西侧和长江三角洲地区晚第四纪海侵研究已取得了大量的研究成果,晚第四纪以来渤海湾西侧华北平原发现了 MIS5 期的沧州海侵、MIS3 期的献县海侵和 MIS1 期的黄骅海侵,最大海侵范围献县海侵 > 沧州海侵 > 黄骅海侵^[44-47](图 9a)。长江三角洲地区晚第四纪以来发生过 3 次海侵,分别被命名为太湖海侵(晚更新世早期),漏湖海侵(晚更新世中晚期)和镇江海侵(全新世),其中镇江海侵范围最广,漏湖海侵次之,太湖海侵最小^[48-50](图 9b)。渤海湾西岸和长江三角洲地区晚第四纪以来主要以持续的构造沉降为主^[46,50],前人研究发现,晚更新世早期本区古地势较高,物源供应较丰富,海水主要沿古河谷入侵,海侵规模较小^[44-45]。但由于剥蚀作用和长期构造沉降,晚更新世中晚期和全新世期间该区极易受海平面波动影响而发生海侵^[46]。即使 MIS3 期海侵时最高海面低于全新世和晚更新世早期最高海面数十米,该时期最大海侵范围仍大于晚更新世早期时的海侵,这主要是由于构造沉降的结果。但在渤海湾西岸,虽然持续的构造沉降作用导致全新世古地势相对较低,但在 8 500 a 左右黄河改道,从渤海入海^[51],为渤海的西海岸提供了大量的沉积物供给,从而补偿了构造沉降所增加的可容空间,导致黄骅海侵范围较小。

福建沿海平原区晚更新世以来发生了两次海侵,为晚更新世的福州海侵和全新世的长乐海侵,福州海侵相对较弱,海水仅侵入到了福州市区一带,长乐海侵范围更广,其范围达到了福州西侧的闽侯一

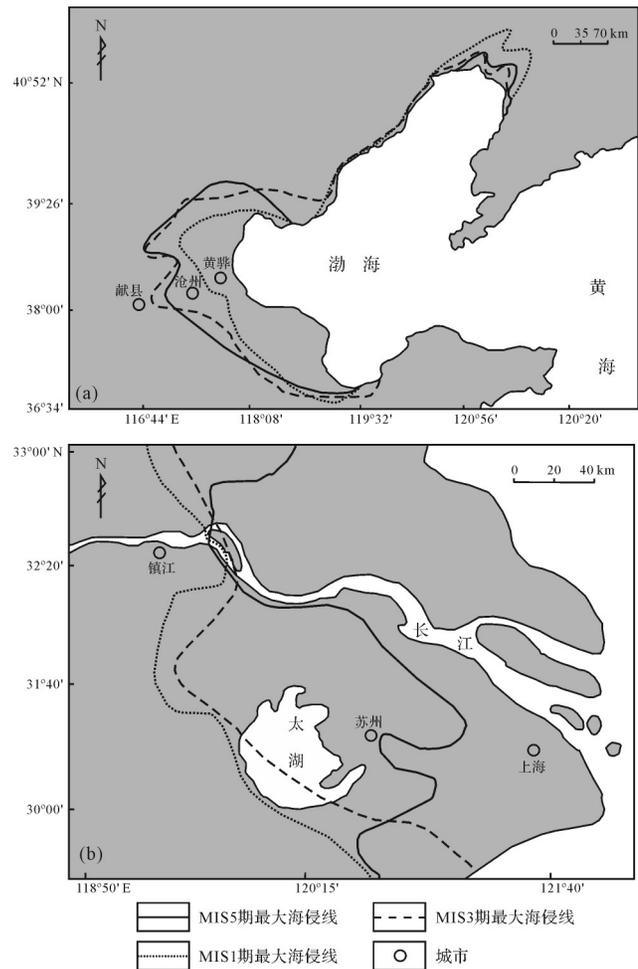


图9 晚第四纪最大海侵古岸线分布

(a)渤海湾西岸;(b)长江三角洲(修改自Lin *et al.*^[48])

Fig.9 Location of maximum coastline transgression in the Late Quaternary

(a) west coast of Bohai Bay (b) Yangtze River Delta (modified from Lin *et al.*^[48])

带^[48,52](图 10a)。福建沿海整体处于新构造运动的上升区,但不同地区差异显著,表现为以闽江为界,南升北降^[53]。闽江南侧地区海侵强度较弱,两次海侵最大范围相近,表现出与台山沿海相似的特征。在对珠江三角洲地区钻孔样品和微体古生物研究表明,晚更新世以来该区发育两套海侵地层^[7-10],全新世海侵主要发生在 10~4 ka B.P.,最大海侵古岸线从现在的海岸向内陆延伸了约 50 km^[48](图 10b),晚更新世海侵最大范围小于全新世海侵^[11,35],此次海侵地层发育不普遍。珠江三角洲晚更新世海侵的时代归属有 3~5 万年的晚更新世中晚期(相当于 MIS3)^[7,10]和 10 万年左右的晚更新世初期(相当于 MIS5)^[54]两种观点,同样也是影响三角洲地区新构造升降速率估算的重要因素。

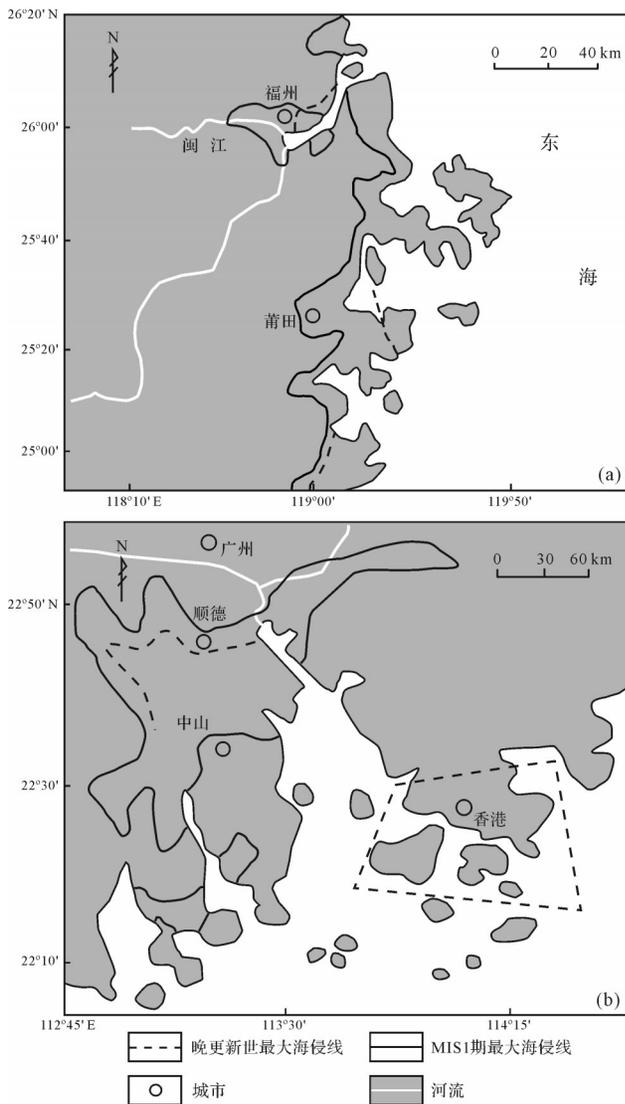


图10 晚第四纪最大海侵古岸线分布
(a)福建沿海;(b)珠江三角洲(修改自Lin *et al.*^[48])

Fig.10 Location of maximum coastline transgression in the Late Quaternary

(a) coastal zone of Fujian province;(b) Pearl River Delta (modified from Lin *et al.*^[48])

我国海岸带跨越多个亚板块块体^[55],由于新构造差异活动,我国海岸带可分为山地丘陵海岸(福建沿海、台山)和平原海岸(渤海湾西岸、长江三角洲),前

者基本上属于上升区,后者则属于下降区^[48]。从以上粗略对比可以看出:1)中国沿海不同地区由于新构造背景不同,晚第四纪海侵发生次数和最大范围在空间上整体具有“北强南弱”的特点(表6);2)中国沿海晚第四纪海侵发生的次数和最大范围差异显著,除不同构造单元存在着构造差异外,海平面高度和沉积物供给变化同样对海侵强度有着一定的影响,导致同一地区不同时期之间海侵强度差异并未完全遵循传统意义上“早弱晚强”^[55]的规律(表6);3)研究模拟表明,未来一段时间,全球海平面理论上以2.0 mm/a作为预估的海平面上升速率较为合适^[56],加上人类对流域治理水平日趋成熟,流域沉积物供给会更加稳定,由此可见,今后海岸地区构造运动将成为影响海侵发生的重要因素。

5 结论

(1) 珠江三角洲西缘台山地区晚第四纪地层自下而上可划分为4个沉积单元(石排组、西南镇组、三角组、横栏组),经历了晚更新世中晚期的河流—海相交替沉积环境、末次冰期的海退暴露环境以及全新世滨海、浅海沉积环境。

(2) 在 MIS3 和 MIS1 的高海面时期发生了2次主要的海侵事件,最大海侵古岸线最远分别向陆地延伸 15.4 km 和 16.3 km,两条最大海侵线距离接近,走势相同。两次海侵时期实际最高海平面高程之差达数十米,而两条最大海侵古岸线却极为接近,造成这种现象的原因主要是研究区晚更新世以来整体处于构造抬升状态,使得晚更新世海侵时的古地势较低,从而导致 MIS3 期最高海平面较低的情况下仍发育了范围与全新世海侵相近的海相沉积地层。

(3) 两期海侵沉积物的高程和年代资料揭示了研究区晚更新世以来整体抬升速率为+0.51 mm/a,全新世中晚期转变为沉降状态,沉降速率为-0.61 mm/a,

表6 晚第四纪中国沿海部分地区海侵强度对比

Table 6 Comparison of transgression intensity in Chinese coastal areas in the Late Quaternary

地区	海侵次数	构造特征	最远向陆延伸距离/km		
			MIS5	MIS3	MIS1
渤海湾西岸	3	沉降	130	140	100
长江三角洲	3	沉降	120	140	150
福建沿海	2	以闽江为界,南升北降	—	10	20
珠江三角洲	2	沉降	40	40	50
台山沿海	2	抬升,全新世中后期转为沉降	—	15.4	16.3

MIS3 和 MIS1 最大海侵古岸线分别与研究区当前 2.8 m 和 3 m 等高线相符。

(4) 中国沿海晚第四纪海侵发生次数和最大范围在空间上整体具有“北强南弱”的特点,同一地区不同海侵之间不完全遵循“早弱晚强”的特点。构造运动、海平面变化和沉积物供给共同影响海侵的发生和最大海侵古岸线的分布,随着全球海平面上升速率和流域沉积物供给量趋于稳定,构造升降将会在未来成为应对海平面上升对海岸带地区的影响中不可忽视的重要影响因素。

致谢 样品测试过程中受到贺洋、赵珂、贾冀新、魏子谦、董鑫等同学的协助,在此一并感谢。

参考文献(References)

- [1] Ericson J P, Vörösmarty C J, Dingman S L, et al. Effective sea-level rise and deltas: Causes of change and human dimension implications[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 50(1/2): 63-82.
- [2] 王靖泰,汪品先. 中国东部晚更新世以来海面升降与气候变化的关系[J]. *地理学报*, 1980, 47(4): 299-312. [Wang Jingtai, Wang Pinxian. Relationship between sea-level changes and climatic fluctuations in East China since Late Pleistocene [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1980, 47(4): 299-312.]
- [3] 赵焕庭,陈木宏,余家桢,等. 珠江三角洲海进层微体古生物的初步研究[J]. *热带海洋*, 1987, 5(1): 28-36, 101-102. [Zhao Huanting, Chen Muhong, Yu Jiazhen, et al. A preliminary study on the micropaleontology of transgressive layers in Zhujiang (Pearl River) Delta [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 1987, 5(1): 28-36, 101-102.]
- [4] 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): 49-61. [Yuan Jiayi, Chen Muhong, Yu Jiazhen, et al. Sedimentary characteristics since Late Pleistocene in the northern Pearl River Delta [J]. *Marine Science Bulletin*, 1988, 7(2): 49-61.]
- [5] 宗永强. 韩江三角洲第四系沉积旋回[J]. *热带地理*, 1987, 7(2): 117-127. [Zong Yongqiang. Depositional cycles of the Quaternary in the Hanjiang Delta [J]. *Tropical Geography*, 1987, 7(2): 117-127.]
- [6] 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 since Late Pleistocene in eastern Guangdong [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1987, 9(2): 216-222.]
- [7] 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.]
- [8] 李平日,郑建生,方国祥. 广州地区第四纪地质[M]. 广州:华南理工大学出版社,1989: 11-52. [Li Pingri, Zheng Jiansheng, Fang Guoxiang. *Quaternary geology in Guangzhou area* [M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 1989: 11-52.]
- [9] 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(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(1): 67-74.]
- [10] 龙云作,霍春兰,司桂贤,等. 对珠江三角洲沉积特征和沉积模式的一些认识[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1985(4): 49-57. [Long Yunzuo, Huo Chunlan, Si Guixian, et al. On sedimentary characteristics and model of Zhujiang River Delta [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1985(4): 49-57.]
- [11] 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.]
- [12] 蓝先洪. 珠江三角洲 $\Delta 22$ 孔的沉积特征及地层划分[J]. *海洋与湖沼*, 1991, 22(2): 148-154. [Lan Xianhong. Sedimentary characteristics and strata division of core $\Delta 22$ of the Zhujiang River Delta [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1991, 22(2): 148-154.]
- [13] 李平日,黄镇国,宗永强. 韩江三角洲地貌发育的新认识[J]. *地理学报*, 1988, 43(1): 19-34. [Li Pingri, Huang Zhenguo, Zong Yongqiang. New views on geomorphological development of the Hanjiang River Delta [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1988, 43(1): 19-34.]
- [14] Zong Y Q. Mid-Holocene sea-level highstand along the southeast coast of China [J]. *Quaternary International*, 2004, 117(1): 55-67.
- [15] 施雅风,孔昭宸,王苏民,等. 中国全新世大暖期鼎盛阶段的气候与环境[J]. *中国科学(B辑)*, 1993, 23(8): 865-873. [Shi Yafeng, Kong Zhaochen, Wang Sumin, et al. The climatic fluctuation and important events of Holocene Megathermal in China [J]. *Science China Chemistry*, 1993, 23(8): 865-873.]
- [16] 王绍鸿. 莱州湾西岸晚第四纪海相地层及其沉积环境的初步研究[J]. *海洋与湖沼*, 1979, 10(1): 9-23. [Wang Shaohong. A preliminary study of marine bed and its depositional conditions in Late Quaternary off the west coast of Laizhou Bay [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1979, 10(1): 9-23.]
- [17] 王宏,商志文,李建芬,等. 渤海湾西侧泥质海岸带全新世岸线的变化与海洋的影响[J]. *地质通报*, 2010, 29

- (5): 627-640. [Wang Hong, Shang Zhiwen, Li Jianfen, et al. Holocene shoreline changes and marine impacts on the muddy coast, western Bohai Bay, China[J]. Geological Bulletin of China, 2010, 29(5): 627-640.]
- [18] 赵希涛,耿秀山,张景文. 中国东部20000年来的海平面变化[J]. 海洋学报, 1979, 1(2): 269-281. [Zhao Xitao, Geng Xiushan, Zhang Jingwen. Sea level changes of the eastern China during the past 20000 years[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1979, 1(2): 269-281.]
- [19] 祁雅莉,黄海军,刘艳霞,等. 探地雷达在确定全新世海侵线方面的应用[J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 109-116. [Qi Yali, Huang Haijun, Liu Yanxia, et al. The application of ground penetrating radar in determination of Holocene transgressive boundary [J]. Marine Sciences, 2014, 38(11): 109-116.]
- [20] 魏灵,贾玉连,易朝路,等. 近4万年渤海西岸海侵时古海面的现代标高对比研究[J]. 第四纪研究, 2006, 26(3): 361-369. [Wei Ling, Jia Yulian, Yi Chaolu, et al. Comparison study of elevations of ancient sea level during transgressions of the west coast of Bohai Sea in the past 40ka[J]. Quaternary Sciences, 2006, 26(3): 361-369.]
- [21] 吴富强,徐小连,周硕. 广东台山海岸带构造特征研究[J]. 西北地质, 2018, 51(4): 53-59. [Wu Fuqiang, Xu Xiaolian, Zhou Shuo. Structure characteristics of Taishan coast in Guangdong [J]. Northwestern Geology, 2018, 51(4): 53-59.]
- [22] 李洪艺,张澄博,张永定,等. 广东台山—恩平地区环境地质问题及其影响因子[J]. 地质灾害与环境保护, 2011, 22(2): 9-13. [Li Hongyi, Zhang Chengbo, Zhang Yongding, et al. Environmental geology problems and their effect factors in the Taishan-Enping area, Guangdong province [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 2011, 22(2): 9-13.]
- [23] Southon J, Kashgarian M, Fontugne M, et al. Marine reservoir corrections for the Indian Ocean and Southeast Asia [J]. Radiocarbon, 2002, 44(1): 167-180.
- [24] 蓝先洪,马道修,徐明广,等. 珠江三角洲若干地球化学标志及指相意义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1987, 7(1): 39-49. [Lan Xianhong, Ma Daoxiu, Xu Mingguang, et al. Some geochemical indicators of the Pearl River Delta and their facies significance [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 1987, 7(1): 39-49.]
- [25] Mazzini I, Anadon P, Barbieri M. 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.
- [26] Zhao B C, Wang Z H, Chen J, et al. Marine sediment records and relative sea level change during Late Pleistocene in the Changjiang Delta area and adjacent continental shelf [J]. Quaternary International, 2008, 186(1): 164-172.
- [27] Fairbridge R W. Eustatic changes in sea level [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 1961, 4: 99-185.
- [28] 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.
- [29] Zong Y, Yim W W S, Yu F, et al. Late Quaternary environmental changes in the Pearl River mouth region, China [J]. Quaternary International, 2009, 206(1/2): 35-45.
- [30] 张虎男,赵红梅. 华南沿海晚更新世晚期—全新世海平面变化的初步探讨[J]. 海洋学报, 1990, 12(5): 620-630. [Zhang Hunan, Zhao Hongmei. The primary discussion of sea level changes during Late Pleistocene to Holocene in coastal Huanan [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1990, 12(5): 620-630.]
- [31] 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. Their environmental significance in the Zhujiang River Estuary [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 828-833.]
- [32] Lambeck K, Esat T M, Potter E K. Links between climate and sea levels for the past three million years [J]. Nature, 2002, 419(6903): 199-206.
- [33] Shackleton N J. Oxygen isotopes, ice volume and sea level [J]. Quaternary Science Reviews, 1987, 6(3/4): 183-190.
- [34] Aharon P, Chappell J. Oxygen isotopes, sea level changes and the temperature history of a coral reef environment in New Guinea over the last 105 years [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 1986, 56(3/4): 337-379.
- [35] Lambeck K, Chappell J. Sea level change through the last glacial cycle [J]. Science, 2001, 292(5517): 679-686.
- [36] 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.]
- [37] 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 and Geology, 2001, 23(4): 527-536.]
- [38] 陈伟光,张虎男,李子权. 闽粤沿海全新世垂直构造运动的速率[J]. 地震地质, 1986, 8(2): 33-42. [Chen Weiguang, Zhang Hunan, Li Ziquan. The velocity of Holocene vertical tectonic motion in the coastal area of Fujian and Guangdong [J]. Seismology and Geology, 1986, 8(2): 33-42.]
- [39] 黄玉昆,夏法,黄导繁,等. 南海北部沿岸全新世海面变动与近代地壳运动[J]. 海洋学报, 1982, 4(6): 713-723. [Huang Yukun, Xia Fa, Huang Daofan, et al. Holocene sea level change and recent crustal movement in the northern

- coasts of South China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1982, 4(6): 713-723.]
- [40] 胡惠民, 黄立人, 杨国华. 中国东部沿海地区的近代地壳垂直运动[J]. *地质科学*, 1993, 28(3): 270-278. [Hu Huimin, Huang Liren, Yang Guohua. Recent vertical crustal deformation in the coastal area of eastern China [J]. *Scientia Geologica Sinica*, 1993, 28(3): 270-278.]
- [41] 陈伟光, 丁丽青. 华南沿海现代海平面变动和新构造运动[J]. *热带地理*, 1995, 15(3): 252-257. [Chen Weiguang, Ding Liqing. Modern sea level changes and neotectonic movement of the coastal area in South China [J]. *Tropical Geography*, 1995, 15(3): 252-257.]
- [42] 卢汝圻. 广东沿海地区现代地壳垂直运动研究[J]. *华南地震*, 1997, 17(1): 25-33. [Lu Ruqi. Study on the modern crustal vertical movement in Guangdong coast [J]. *South China Journal of Seismology*, 1997, 17(1): 25-33.]
- [43] 王强, 田国强. 中国东部晚第四纪海侵的新构造背景[J]. *地质力学学报*, 1999, 5(4): 41-48. [Wang Qiang, Tian Guoqiang. The Neotectonic setting of Late Quaternary transgressions on the eastern coastal plain of China [J]. *Journal of Geomechanics*, 1999, 5(4): 41-48.]
- [44] 姚政权, 石学法. 渤海湾沿岸第四纪海侵研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2015, 31(2): 9-16, 70. [Yao Zhengquan, Shi Xuefa. A review of Quaternary transgression researches along the Bohai Bay [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2015, 31(2): 9-16, 70.]
- [45] 高茂生, 郭飞, 侯国华, 等. 渤海南部莱州湾晚更新世以来沉积演化特征[J]. *中国地质*, 2018, 45(1): 59-68. [Gao Maosheng, Guo Fei, Hou Guohua, et al. The evolution of sedimentary environment since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea [J]. *Geology in China*, 2018, 45(1): 59-68.]
- [46] 段永侯. 环渤海新构造活动与渤海形成演化对现今地质环境之影响[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 1998, 9(增刊1): 110-117. [Duan Yonghou. New tectonic movement and the formation and evolution of the Bohai Sea and their effects on the current geological environment [J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 1998, 9(Suppl. 1): 110-117.]
- [47] Wang F, Li J, Chen Y, et al. The record of Mid-Holocene maximum landward marine transgression in the west coast of Bohai Bay, China [J]. *Marine Geology*, 2015, 359: 89-95.
- [48] Lin J X, Dai L P, Wang Y, et al. Quaternary marine transgressions in eastern China [J]. *Journal of Palaeogeography*, 2012, 1(2): 105-125.
- [49] 吴标云, 李从先. 长江三角洲第四纪地质[M]. 北京: 海洋地质出版社, 1987: 4-60. [Wu Biaoyun, Li Congxian. *Quaternary geology of Yangtze River Delta* [M]. Beijing: Marine Geology Press, 1987: 4-60.]
- [50] 丁大林, 张训华, 于俊杰, 等. 长江三角洲北翼后缘晚第四纪以来的沉积粒度特征及环境演化[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2019, 39(4): 34-45. [Ding Dalin, Zhang Xunhua, Yu Junjie, et al. Sediment grain size distribution patterns of the Late Quaternary on the back side of northern Yangtze River Delta and their environmental implications [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2019, 39(4): 34-45.]
- [51] Xu Q M, Yang J L, Yuan G B, et al. Stratigraphic sequence and episodes of the ancient Huanghe Delta along the southwestern Bohai Bay since the LGM [J]. *Marine Geology*, 2015, 367: 69-82.
- [52] 马明明, 刘秀铭, 周国华, 等. 福建沿海地区晚第四纪海侵研究进展及存在的问题[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2016, 11(3): 9-19. [Ma Mingming, Liu Xiuming, Zhou Guohua, et al. A review of Late Quaternary transgression studies and some basic questions in Fujian coastal area [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2016, 11(3): 9-19.]
- [53] 童永福, 徐书勇. 福建省沿海第四系与活动构造[J]. *福建地质*, 1989(2): 81-99. [Tong Yongfu, Xu Shuyong. The Quaternary and active fault in coastal area of Fujian [J]. *Geology of Fujian*, 1989(2): 81-99.]
- [54] Yim W W S, Huang G, Fontugne M R, et al. Postglacial sea-level changes in the northern South China Sea continental shelf: Evidence for a post-8200 calendar yr B. P. meltwater pulse [J]. *Quaternary International*, 2006, 145-146: 55-67.
- [55] 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. *地质学报*, 1981, 55(1): 1-13. [Wang Pinxian, Min Qiubao, Bian Yunhua, et al. Strata of Quaternary transgressions in East China: A preliminary study [J]. *Acta Geologica Sinica*, 1981, 55(1): 1-13.]
- [56] 张虎男. 断块构造的垂直运动对海平面变化的影响: 以华南沿海地区为例[J]. *华南地震*, 1997, 17(3): 59-65. [Zhang Hunan. Influence of the fault block tectonic vertical movement on sea level change: Taking the coast of South China for example [J]. *South China Journal of Seismology*, 1997, 17(3): 59-65.]

Sedimentary Evolution and Reconstruction of Maximum Coastline Transgression During the Late Quaternary at the Western Margin of the Pearl River Delta

ZHOU Liang^{1,2}, WANG Yang¹, DU XueBin², BU JianJun³, WU Jun³, LÜ WanJun², LIU XiuJuan²

1. Haikou Marine Geological Survey Center, China Geological Survey, Haikou 570100, China

2. Hubei Key Laboratory of Marine Geological Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Wuhan Center, China Geological Survey, Wuhan 430200, China

Abstract: A series of intense sea-land interactions and transgression/regression geological events occurred in coastal areas from the beginning of the Quaternary, influenced by global climate and sea-level changes. These have left rich information about the sedimentary environment evolution in the transgression records. Based on 30 new drilled holes at the western margin of the Pearl River Delta, combined with ¹⁴C and OSL dating, geochemistry, micropaleontology and magnetic susceptibility, sedimentary evolution and the reconstruction of the maximum transgression coastline was completed. This study found the following: (1) The study area is divided into four sedimentary units from bottom to top: consecutive fluvial-marine alternating sedimentary environments in the middle to late Pleistocene; a regressive exposed environment in the Last Glacial Period; and coastal and shallow marine sedimentary environments in the Holocene. Two major marine transgression events occurred during the MIS3 and MIS1 high sea-level periods. (2) The maximum landward positions of the transgressions inland from the present shoreline were about 15.4 km in the Late Pleistocene and 16.3 km in the Holocene. This similarity in distance and trend, which is inconsistent with the global pattern of sea-level change, was probably caused by tectonic uplift in addition to global climate fluctuation. The elevation and age data of the two-stage transgression sediments reveals that from the Late Pleistocene the whole area was experiencing tectonic uplift at a rate of +0.51 mm/a. The whole area has been in a tectonic subsidence state at a rate of -0.61 mm/a since the Holocene. The reconstructed maximum transgressions of the MIS3 and MIS1 coastlines are consistent with the current 2.8 m and 3 m contour lines in the research area. In addition, due to neotectonic movement, the transgression frequency and maximum range in the Late Quaternary may be summarized as “north powerful and south weak” in China’s coastal regions. Transgressive intensity differences in the same area at different times were not fully consistent with “early weak, later powerful” characteristics, the main reason being that, besides the tectonic differences in different tectonic units, the changes in sea level and sediment supply influenced the intensity of transgression to a certain extent.

Key words: western margin of the Pearl River Delta; Late Quaternary; sedimentary evolution; maximum transgression coastline; neotectonic movement