

引用格式: 赵红梅, 毛欣, 刘春雷, 等, 2023. 福建泉州湾海岸带 MIS 3 阶段以来的海侵—海退过程 [J]. 地质力学学报, 29 (4): 569–583.

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023046

Citation: ZHAO H M, MAO X, LIU C L, et al., 2023. Transgression–regression processes since the MIS 3 in the coastal zone of Quanzhou Bay, Fujian [J].

Journal of Geomechanics, 29 (4): 569–583. DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023046

福建泉州湾海岸带 MIS 3 阶段以来的海侵—海退过程

赵红梅^{1,2}, 毛欣^{1,2}, 刘春雷^{1,3}, 李亚松^{1,3}, 刘林敬^{1,2}

ZHAO Hongmei^{1,2}, MAO Xin^{1,2}, LIU Chunlei^{1,3}, LI Yasong^{1,3}, LIU Linjing^{1,2}

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄 050061;
2. 中国地质科学院第四纪年代学与水文环境演变重点实验室, 河北石家庄 050061;
3. 福建省水循环与生态地质过程重点实验室, 福建厦门 361009

1. *The Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;*

2. *Key Laboratory of Quaternary Chronology and Hydro-Environmental Evolution, China Geological Survey, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;*

3. *Fujian Provincial Key Laboratory of Water Cycling and Eco-Geological Processes, Xiamen 361009, Fujian, China*

Transgression–regression processes since the MIS 3 in the coastal zone of Quanzhou Bay, Fujian

Abstract: The coastal zone is sensitive to sea–land interaction, making it an ideal place to study the transgression–regression process in Quaternary coastal areas. Based on the stratigraphic and lithologic characteristics of two Quaternary drill cores (DZ01 and DZ02) in the coastal zone of Quanzhou Bay, Fujian Province, a stratigraphic chronological framework was established by using AMS-14C and OSL dating methods. Combined with the statistical analysis results of geochemical element content of indicating facies in modern sediments in Quanzhou Bay, the geochemical element ratios, foraminifers, and ostracods' environmental indicators were used to identify transgressive strata since the Late Pleistocene. The transgression–regression processes since the MIS 3 in Quanzhou Bay were analyzed by comparing it with the regional borehole data. The results show that the Sr/Ba and Mn/Fe values vary significantly in the marine sediments at different water depths in Quanzhou Bay, making them suitable as indicator elements in the marine and sea–land transitional sediments in the Quanzhou Bay coast, with the limit values of Sr/Ba<0.16 and Mn/Fe<0.23, respectively; there have been two transgression–regression processes since the MIS 3 in Quanzhou Bay. The first transgression occurred in the MIS3, corresponding to the regional "Fuzhou transgression," which peaked at about 35 ka B.P. The second transgression occurred in the Holocene, corresponding to the regional "Changle transgression," which peaked at about 7–4 ka B.P. The research results are significant for reconstructing the history of sedimentary environment changes in coastal zones, understanding sea–land interaction, and predicting future environmental changes.

Keywords: Quanzhou Bay; coastal zone; MIS 3; transgression; geochemical element ratio; sedimentary environment

摘要: 海岸带是海陆相互作用的敏感地带, 是沿海地区研究第四纪海侵—海退过程的理想场所。基于福建泉州湾沿岸两个第四纪钻孔岩芯 (DZ01、DZ02), 以地层岩性和岩相组合特征为基础, 利用加速器质谱碳同位素 (AMS-¹⁴C) 和光释光 (OSL) 两种测年方法建立地层年代框架, 结合泉州湾现代沉积物具有指相性的地球化学元素含量统计分析结果, 运用地球化学元素比值、有孔虫和介形类环境指标判别晚

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20190303, DD20221773, DD20221929); 中国地质科学院水文地质环境地质研究所基本科研业务费项目 (SK202105, SK202213)

This research is financially supported by the Geological Survey Projects of the China Geological Survey (Grants DD20190303, DD20221773 and DD20221929) and the Special Fund of Chinese Central Government for Basic Scientific Research Operations in Commonweal Research Institutes (Grants SK202105 and SK202213).

第一作者: 赵红梅 (1981—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事第四纪地层与沉积环境研究。E-mail: zhmay81@126.com

通讯作者: 毛欣 (1989—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事第四纪环境演变研究。E-mail: maoxin.iheg@cnu.edu.cn

收稿日期: 2023-03-31; 修回日期: 2023-06-11; 责任编辑: 范二平

更新世以来的海侵地层,对比区域钻孔资料,探讨了泉州湾 MIS 3 阶段以来的海侵—海退过程。结果表明: Sr/Ba、Mn/Fe 在泉州湾不同水深海相沉积物中变化规律明显,适宜作为泉州湾海岸带海相及海陆过渡相沉积物的指相元素,其界限值分别为 Sr/Ba>0.16、Mn/Fe<0.23;泉州湾 MIS 3 阶段以来发生过两次海侵—海退过程。第一次海侵发生于 MIS 3 阶段,对应区域上的“福州海侵”,其极盛期发生在距今约 35 ka;第二次海侵发生在全新世,对应于区域上的“长乐海进”,其极盛期发生在距今约 7~4 ka。研究成果对于重建海岸带沉积环境变化历史、深入认识海陆相互作用及预测未来环境变化具有重要意义。

关键词: 泉州湾; 海岸带; MIS 3; 海侵; 地球化学元素比值; 沉积环境

中图分类号: P534.63 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6616 (2023) 04-0569-15

DOI: 10.12090/j.issn.1006-6616.2023046

0 引言

IPCC 发布的《气候变化中的海洋和冰冻圈特别报告》(2019)指出,全球海平面在 20 世纪上升了约 15 cm,而目前的上升速度达到每年 3.6 mm,这一速度还在加快。近 40 年来,中国沿海海平面呈加速上升趋势,沿海地区面临的海平面上升风险进一步加大(自然资源部, 2022)。海平面上升增加了极端海平面事件发生的频率,沿海低洼城市和小岛将面临不断升级的洪水风险(IPCC, 2019)。因此,加强沿海地区古环境、古海侵事件研究,对沿海城市防灾减灾具有重要意义。

第四纪以来的若干次冰期—间冰期旋回导致全球海平面发生周期性的升降波动(Linsley, 1996; Lambeck and Chappell, 2001),引起了沿海地区发生数次海侵—海退事件,如 MIS 7、MIS 5、MIS 3 和 MIS 1 时期的全球高海平面时期(Chappell et al., 1996)。气候变化强烈影响着地表水体的再分配,是第四纪海平面波动的一个主要驱动力,而高达 100~150 m 的海平面变化则与冰盖的消长有关(Woodroffe and Murray-Wallace, 2012)。MIS 3 时期是晚更新世以来的一个特殊阶段,气候波动剧烈,已有报道重建的古海平面高度存在 -40~-80 m(Shackleton, 1987; Cooper et al., 2018)和 -15~-20 m(Mauz and Hassler, 2000; Rodriguez et al., 2000; Sun et al., 2015)两种观点,可能与区域构造活动有关。MIS 2 时期,全球气温降低,冰川增长导致海平面持续下降。LGM(末次冰盛期)期间,全球海平面位于现今海平面 120~130 m 以下(Lambeck and Chappell, 2001),引发大规模海退,大部分陆架出露为陆地(Hanebuth et al., 2000)。末次冰消期以来,海平面以阶段式上升为特征,引发了全新世海侵过程(Peltier and Fairbanks, 2006; Bard et al., 2010)。

海岸带是海陆相互作用的敏感地带,受全球气候变化、海平面升降及区域地质构造的影响,其环境变化频繁、强烈,沉积物记录了丰富的沉积环境变化信息,是沿海地区研究第四纪沉积环境变化、海侵—海退过程的理想场所。福建沿海地区海侵历史的系统研究可追溯到 20 世纪 70—80 年代(林景星, 1979; 蓝东兆等, 1986; 杨建明, 1988),然而该区晚更新世以来究竟发生了几次海侵,迄今为止仍有较大争议。根据已有报道,目前存在两期(林景星, 1979; 蓝东兆等, 1986; 杨建明, 1988; 韩书华和张静, 1992; 陈润生等, 2004; 何梅等, 2021)、三期(王绍鸿等, 1994; 孙丹丹等, 2022)和五期海侵(陈承惠等, 1990; 曾从盛, 1997)三种不同观点,对于历次海侵发生的时间也有不同认识。已有报道对该区的海侵事件研究主要集中在福州盆地、厦门湾、九龙江河口以及漳州龙海平原等地。鉴于区域海侵过程受基底地形及区域新构造运动影响较大,文章选择该区晚第四纪海侵研究较少、但对海侵事件响应敏感的泉州湾海岸带开展相关研究,以期为区域海侵历史的系统研究和梳理提供新的证据。

文章基于福建泉州湾沿岸两个第四纪钻孔岩芯(DZ01、DZ02),以地层岩性和岩相组合特征为基础,利用 AMS-¹⁴C 和光释光(OSL)两种测年方法建立地层年代框架,结合泉州湾现代沉积物具有指相意义的地球化学元素含量统计结果,运用地球化学元素比值、有孔虫和介形类环境指标判别晚更新世以来的海侵地层,对比区域钻孔资料,探讨了泉州湾 MIS 3 阶段以来的海侵—海退过程。研究成果对于重建海岸带沉积环境变化历史、深入认识海陆相互作用及预测未来环境变化具有重要意义。

1 研究区概况

1.1 自然地理概况

泉州湾位于福建省东南沿海,北接惠安县,西

临泉州市,南缘晋江市和石狮市,东面向台湾海峡开敞,是一个半封闭海湾,晋江、洛阳江两大河流在此汇入东海(莫文超, 2017; 图 1)。泉州湾地区属南

亚热带海洋季风气候,温和湿润,光照充足,年平均气温为 19.9℃,年均降水量为 1095.4 mm,年均相对湿度为 78%(林津等, 2021)。

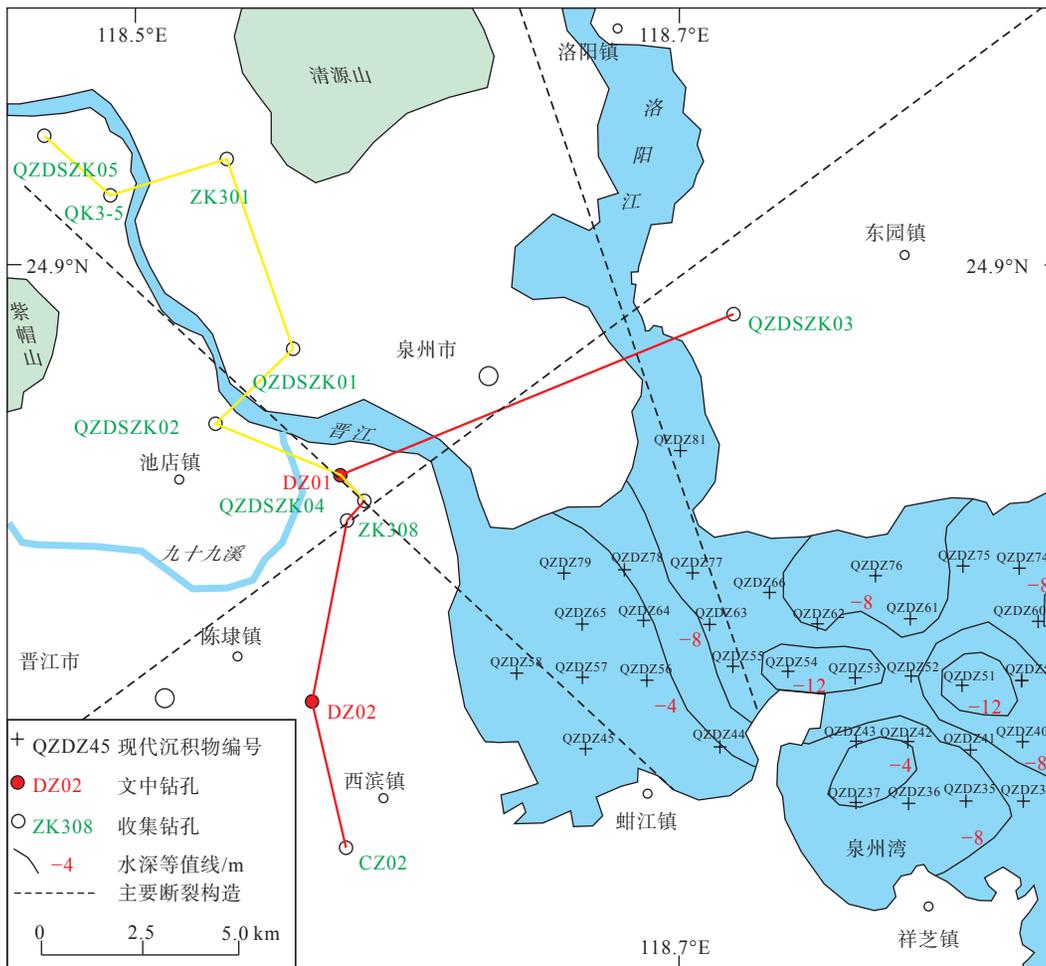


图 1 研究区及钻孔、取样位置示意图

Fig. 1 Location of the study area, drill cores and sampling

1.2 地质概况

泉州湾受太平洋板块和欧亚板块相互作用的影响,中—新生代构造、火山、地震活动强烈(张景文等, 1982; 韦德光等, 1997)。构造上,泉州湾处于闽东南滨海断隆带,除泉州湾东部海域为小范围的局部沉降,泉州市及其周边的地壳垂直形变呈振荡性升降变化,总体以缓慢上升为主,周边地区分布早古生代志留纪侵入粗粒二长花岗岩。受北东向惠安—晋江断裂、北北西向洛阳江断裂及北西向晋江—永安断裂拉张作用的控制(姚庆元, 1982; 陈伟光, 1983),第四纪早期该区发生断陷并经历了断陷盆地—海湾—平原的演变过程。

1.3 地貌概况

作为构造成因的海湾,泉州湾海底构造格局构

成了泉州湾海岸带地形地貌的基本骨架(吴承强等, 2011)。泉州湾海域水深为 0~20 m,等深线走向基本平行于海岸线走向。水下地貌主要分为潮间带和 underwater 岸坡。陆上地貌主要为沿海成片分布的侵蚀台地,面积大且波状起伏,一般高度在 50 m 之下;较少成片分布的海积平原主要分布在泉州湾西南方向的晋江市,大部分为围垦滩地,由黏土和砂质黏土组成(莫文超, 2017)。

1.4 第四纪地层概况

已有报道对泉州湾海岸带的第四纪地层及沉积环境演化研究相对较少。该区海陆相互作用强烈,第四系缺失下、中更新统,仅发育上更新统和全新统,为冲洪积层和海积层,总厚度为 30~40 m(程乾盛, 1993; 张璞等, 2005; 何耀堂, 2011; 沈林南

等, 2017)。其中全新统分布较为广泛, 但厚度变化较大, 上更新统厚度小、分布范围小(沈林南等, 2017)。这些海陆交互作用形成的第四纪沉积物是研究区域海侵—海退事件的良好载体。

2 材料和方法

2.1 钻孔和表层样品采集

在泉州湾两个第四纪钻孔(DZ01、DZ02)岩芯中采集相关样品用于 AMS-¹⁴C 测试、光释光测试、地球化学元素分析以及微体古生物研究。另外, 2020年7月采集泉州湾海域现代沉积物样品 33 个,

采样深度为 0~20 cm, 水深介于 0.9~24.3 m(图 1, 表 1)。

2.2 实验方法

2.2.1 年代测试

放射性碳测年方法(AMS-¹⁴C)是测定全新世及晚更新世年龄最常用的方法。在两个钻孔中采集淤泥、炭屑或者贝壳作为 AMS-¹⁴C 测试材料, 共采集 AMS-¹⁴C 样品 11 个(表 1)。在中国地震局地质研究所完成石墨制备后, 在北京大学重离子物理研究所进行测试分析, 获得样品的 ¹⁴C 年龄。样品年代数据采用牛津大学 OxCal v4.2 软件进行校正(尹金辉等, 2005; Ramsey, 2009; 表 2)。

表 1 泉州湾钻孔及样品统计

Table 1 Statistics of the drill cores and samples from Quanzhou Bay

钻孔编号	地理位置	高程/ m	孔深/ m	取芯率/ %	AMS- ¹⁴ C 样品个数	OSL样品 个数	化学元素分析 样品个数	微体样品 组数
DZ01	晋江河口西岸(118°37'20.68"E, 24°51'27.48"N)	28.0	24.1	86.5	5	2	107	9
DZ02	晋江市江头村(118°36'46.84"E, 24°48'27.24"N)	19.0	28.0	92.1	6	1	136	43

表 2 钻孔 AMS-¹⁴C 测年结果

Table 2 AMS-¹⁴C test results of the samples from the two drill cores

序号	样品编号	深度/m	样品物质	测试年龄/a BP	校正年龄/Cal a BP
1	DZ01-15	2.65	淤泥	770±20	696±15
2	DZ01-66	9.05	淤泥	6250±25	7196±44
3	DZ01-74	9.85	淤泥	6575±25	7473±30
4	DZ01- ¹⁴ C-2	11.65	炭屑	11540±100	13373±98
5	DZ01-109	15.85	淤泥	31660±410	35580±430
6	DZ02-15	3.45	淤泥	2615±20	2749±6
7	DZ02- ¹⁴ C-2	4.95	贝壳碎片	3905±35	4338±56
8	DZ02- ¹⁴ C-5	12.45	贝壳	6180±50	7081±72
9	DZ02- ¹⁴ C-7	18.15	炭屑	7620±60	8431±56
10	DZ02-168	21.45	淤泥	8270±35	9264±80
11	DZ02-190	23.65	淤泥	8350±30	9375±49

光释光测年是国际上广泛应用的测量晚更新世以来沉积物年龄的方法。其测年对象为石英、长石等第四纪沉积物中最常见的矿物, 普遍易得, 尤其适合于含炭质稀少的沉积物。两个钻孔共采集光释光样品 3 个, 用不锈钢取样管直接扣入进行取样, 之后两端用黑色塑料袋包裹, 避免暴露在光照下, 样品量约为 300 g, 在中国地质调查局第四纪年代学与水文环境演变重点实验室 Daybreak 1150(美国)光释光仪上进行测试分析。样品采用石英细颗

粒(4~11 μm)简单多片再生法获得等效剂量值; 用饱和指数方法进行拟合, 样品生长曲线拟合良好, 天然测片 L_i/T_i 较为集中, 生长曲线无明显饱和, 测试数据基本可信(表 3)。

2.2.2 环境指标测试

地球化学元素样品共计 276 个, 其中在两个钻孔岩芯获取样品 243 个, 取样间隔约 10 cm; 泉州湾海域现代沉积物样品 33 个, 取样距离为 2~4 km。样品采用 X 射线荧光分析法进行测试分析。在进

表3 钻孔光释光测年结果

Table 3 OSL test results of the samples from the two drill cores

序号	样品编号	深度/m	U/ $\times 10^{-6}$	Th/ $\times 10^{-6}$	K/%	等效剂量/Gy	年剂量/(Gy/ka)	含水量/%	测试年龄/ka
1	DZ01-OSL-4	19.25	5.09 \pm 0.11	14.82 \pm 0.38	2.91 \pm 0.02	344.90 \pm 12.37	5.10 \pm 0.31	20 \pm 5	67.6 \pm 4.7
2	DZ01-OSL-5	20.20	3.42 \pm 0.11	17.09 \pm 0.44	2.68 \pm 0.03	401.85 \pm 11.78	4.73 \pm 0.28	17 \pm 5	85.0 \pm 5.6
3	DZ02-OSL-1	24.80	5.83 \pm 0.42	19.88 \pm 1.20	4.54 \pm 0.17	204.36 \pm 9.47	6.92 \pm 0.40	22 \pm 5	29.5 \pm 2.2

行测试前将样品研磨后过 200 目(74 μm)筛, 在 105 $^{\circ}\text{C}$ 温度下烘干, 将 5 g 左右过筛样品在压片机上以一定压力制成 ≥ 7 mm 厚度的薄片。仪器为荷兰帕纳科公司 PANalytical PW4400 型 X 射线荧光光谱仪(波长色散型 Axios), 分析测试误差低于 10%。

微体古生物样品共计 52 组, 根据地层岩性特征, 主要在灰黑色淤泥、深灰色粉质黏土中进行采样, 平均取样间隔约为 50 cm。室内分析方法为: 取 20 g 样品放入烧杯中, 注入 15% 浓度的双氧水溶液, 浸泡 1~2 小时。将分散后的样品用一套孔筛[20 目(8540 μm)和 200 目(74 μm)]进行冲洗以去掉所含的泥质。样品烘干后, 在 OLYMPUS SZX16 体视显微镜下进行古生物挑选和属种鉴定(郝诒纯等, 1980; 侯枯堂等, 2002; Lei and Li, 2016)。根据镜下有孔虫和介形类化石鉴定统计分析结果, 计算化石丰度, 并按照主要化石的数量以及优势属种(含量大于 2%)的变化特征作出百分比含量图式, 根据图式结果划分组合带, 判别沉积环境。

3 研究结果

3.1 钻孔年代地层框架

根据地层年龄数据(表 2), 两个钻孔主要揭露了全新统、上更新统和时代未分的残积层。其中 DZ01 钻孔距离晋江河口较近, 以陆相河流冲积物及海陆交互河口沉积物为主, 其全新统和上更新统的界线在 11.5 m 处, 更新统和残积层的界线在 22.3 m 处。DZ02 钻孔以厚层的海相沉积物为主, 下伏陆相冲洪积物和强风化残积层, 全新统和上更新统的界线在 23.9 m 处, 更新统和残积层的界线在 26.6 m 处(图 2)。

3.2 微体古生物化石鉴定结果

地层中有孔虫和介形类化石组合及类群的分布与水深、盐度等关系密切, 依据其特征可大致分辨出海相、海陆过渡相和陆相淡水沉积环境, 所以可作为海相地层的重要指征。文中两个钻孔中共鉴定出微体古生物化石 52 组, 大部分化石壳体保存

完整, 极少量样品壳体有破损, 不计入统计分析。

DZ01 钻孔(孔深 275~1605 cm)共分析微体古生物化石样品 9 组, 仅在深度 935 cm 处见极少量广盐滨岸种介形类化石 4 属 4 种, 包括 *Cytheropteron miurense*(三浦翼花介)、*Munseyella japonica*(日本穆赛介)、*Pistocythereis bradyi*(布氏纯艳花介)、*Sinocytheridea impressa*(凹陷中华花介), 以及广温浅水种有孔类化石 *Ammonia beccarii*(毕克卷转虫)。

DZ02 钻孔(孔深 355~2465 cm)共分析微体古生物化石样品 43 组, 其中 34 组样品中发现有孔类和介形类化石(赵红梅等, 2022a)。有孔类化石共计 26 属 38 种, 主要包括玻璃壳底栖有孔虫化石 *Elphidium advenum*(异地希望虫, 18.04%)、*Ammonia beccarii*(毕克卷转虫, 13.78%)、*Ammonia annectence*(同现卷转虫, 11.39%); 瓷质壳底栖有孔虫化石 *Quinqueloculina semimula*(半缺五块虫, 7.92%)等。各层位有孔类化石丰度变化较大, 最高值为 9536 枚/20 g, 最低值为 1 枚/20 g, 平均值为 1740 枚/20 g。介形类化石出现层位与有孔类化石大致相同, 共有 24 属 29 种, 主要包括 *Neomonoceratina dongtaiensis*(东台新单角, 25.93%)、*Loxoconcha ocellata*(眼点弯背介, 22.06%)、*Sinocytheridea impressa*(凹陷中华花介, 18.56%)、*Bicornucythere bisanensis*(皮桑双角花介, 8.44%)、*Pistocythereis bradyi*(布氏纯艳花介, 7.77%)等。各层位介形化石丰度变化较大, 最高值为 4060 枚/20 g, 最低值为 1 枚/20 g, 平均值为 646 枚/20 g。

3.3 泉州湾海相沉积物地球化学元素特征

沿海地区海侵地层的识别主要采用对盐度较为敏感的有孔虫、介形类、硅藻等古生物化石指标(Hashimoto et al., 1970; 汪品先等, 1981; 刘健等, 2004; Liu et al., 2010, 2018; Wang et al., 2013), 但在海陆交互相地层发育的河口海湾区, 受河流和潮汐的双重作用, 沉积物极易遭受扰动, 使得微体古生物化石不易保存或保存不完整, 从而影响了利用其对海侵地层的识别(汪品先, 1992; Wang and Chappell, 2001; Berkeley et al., 2009; Charrieau et al., 2018)。

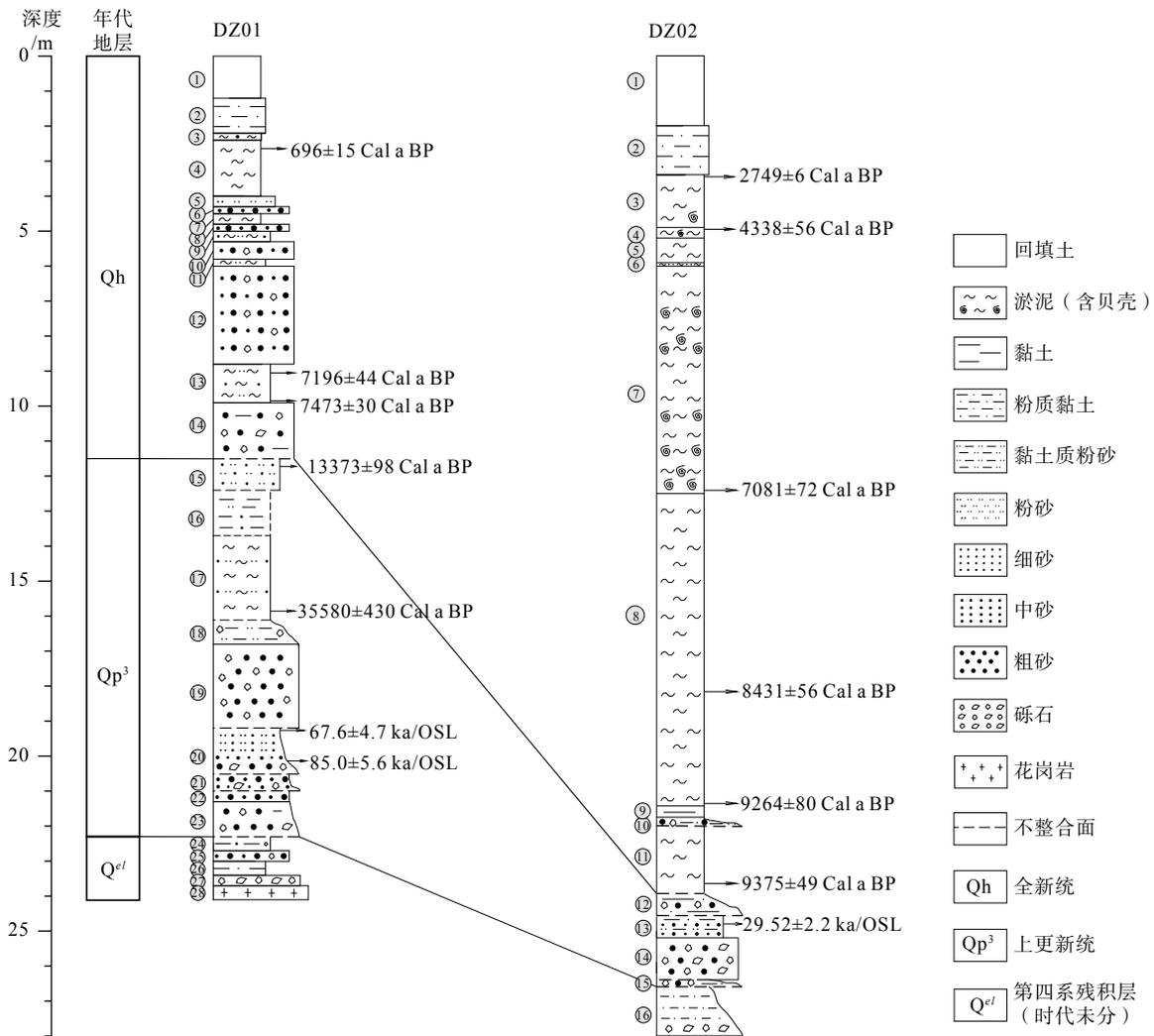


图2 钻孔年代地层对比

Fig. 2 Chronostratigraphic correlation in the two drill cores of Quanzhou Bay

在沉积作用过程中,不同的沉积环境具有不同的动力条件,介质性质、气候条件、生物作用、地形特征等均不同(林旭等, 2021; 綦琳等, 2021),导致沉积物中各种化学元素的分散与聚集规律也不同,从而为利用元素地球化学方法来判别海、陆相沉积环境提供了依据(曾从盛, 2000)。特定化学元素的含量及比值作为指相标志的意义,近年来更加受到重视(熊小辉和肖加飞, 2011; 梅西等, 2019; 孙丹丹等, 2022)。已有报道多采用 B、Ga、Sr、Ba、Rb、K、Mn 和 Fe 等元素的含量及其比值来作为判别标志(王益友等, 1979; 王益友和吴萍, 1983; 曾从盛, 2000)。虽然目前已有研究对这些元素及其比值指示海相或海陆过渡相沉积物的范围值进行了标定,但由于物质来源、风化程度、母质元素组成、搬运距离等差异,导致不同区域不同研究中的指相元素及比值的范围差别较大,如一般认为 $Sr/Ba > 1$ 指示

海相沉积(王益友等, 1979),但也有研究认为 $Sr/Ba > 0.35$ 即是海相沉积(Chen et al., 1997)。因此有必要对研究区现代沉积物的地球化学元素特征、微体古生物特征以及两个钻孔中有明确微体古生物数据的同层位海相沉积物的地球化学元素特征进行统计分析对比,从而确定适合该区域的指相元素或比值及其范围。文章选择 Sr、Ba、Rb、K、Mn、Fe 元素的含量及 Sr/Ba 、 Rb/K 和 Mn/Fe 比值作为特征指标,共统计泉州湾现代沉积物样品 32 组,钻孔河口湾相样品 15 组,钻孔浅海相样品 20 组。

统计结果显示(表 4),对比钻孔河口湾相和浅海相两类沉积物的 Sr 平均含量(88.88×10^{-6} 、 140.12×10^{-6})和 Sr/Ba 平均值(0.20、0.32),后者明显增加;而泉州湾现代沉积物 Sr 含量(118.68×10^{-6})和 Sr/Ba 平均值(0.25)均介于钻孔河口湾相和浅海相之间;Rb、K 平均含量和 Rb/K 平均值在三类沉积物中没

有明显变化规律。两类钻孔沉积物中 Ba 平均含量 (450.03×10^{-6} 、 438.99×10^{-6})、Mn 平均含量 (1215.79×10^{-6} 、 736.73×10^{-6}) 和 Mn/Fe 平均值 (0.22、0.15) 随水深增加呈明显减小的趋势, Fe 平均含量随水深增加

有些许减小趋势 (5.07%、4.91%), 泉州湾现代沉积物中 Mn/Fe 平均值 (0.23) 接近于钻孔河口湾相沉积物 (0.22)。

表 4 泉州湾海相及过渡相沉积物指相地球化学元素统计特征

Table 4 Statistical characteristics of geochemical elements of indicating facies in the marine and transitional sediments of Quanzhou Bay

沉积物类型	统计类型	Sr/ 10^{-6}	Ba/ 10^{-6}	Sr/Ba	Rb/ 10^{-6}	K/%	Rb/K	Mn/ 10^{-6}	Fe/%	Mn/Fe	有孔虫丰度/(枚/20 g)	介形类丰度/(枚/20 g)
泉州湾现代沉积物	平均值	118.68	472.48	0.25	142.70	2.90	0.05	1112.87	5.24	0.23	131.00	96.00
	最大值	199.55	762.10	0.37	175.68	4.35	0.06	1850.53	7.98	0.67	224.00	120.00
	最小值	76.41	305.37	0.17	95.75	2.03	0.04	768.89	2.03	0.15	36.00	80.00
	标准差	22.91	84.81	0.04	13.08	0.44	0.01	254.51	1.34	0.12	84.75	17.28
	变异系数	0.19	0.18	0.17	0.09	0.15	0.10	0.23	0.26	0.51	0.65	0.18
钻孔河口湾相	平均值	88.88	450.03	0.20	142.65	2.58	0.06	1215.79	5.07	0.22	22.86	9.00
	最大值	108.33	497.20	0.24	152.04	2.92	0.06	4060.88	6.88	0.59	86.00	26.00
	最小值	74.80	426.52	0.16	137.20	2.37	0.05	623.39	4.38	0.12	1.00	0.00
	标准差	12.43	23.84	0.03	5.74	0.19	0.002	1256.63	0.85	0.17	36.77	10.02
	变异系数	0.14	0.05	0.15	0.04	0.07	0.04	1.03	0.17	0.76	1.61	1.11
钻孔浅海相	平均值	140.12	438.99	0.32	141.27	2.66	0.05	736.73	4.91	0.15	2612.67	855.67
	最大值	267.82	480.10	0.65	158.18	2.92	0.06	1209.30	5.99	0.23	9536.00	4060.00
	最小值	87.90	400.82	0.19	131.26	2.48	0.05	512.66	4.46	0.11	232.00	34.00
	标准差	63.36	25.18	0.16	8.14	0.12	0.00	241.64	0.45	0.04	3240.64	1170.28
	变异系数	0.45	0.06	0.49	0.06	0.05	0.05	0.33	0.09	0.26	1.24	1.37

综上所述表明, Sr、Ba、Mn、Fe 含量及 Sr/Ba、Mn/Fe 随着水深增加变化规律明显, 适宜作为泉州湾海岸带海相及海陆过渡相沉积物的指相元素, 与福建宁德三沙湾的研究结果相似(孙丹丹等, 2022)。而 Rb、K 含量及 Rb/K 则不适宜在泉州湾海岸带作为指相元素。由于元素比值摒除了沉积环境以外因素对元素分布的影响, 能更直观地反映元素的相对富集程度, 比单个元素更能有效地提供沉积环境的变化信息(王国平等, 2005), 因此文中最终采用 Sr/Ba 和 Mn/Fe 来有效区分海陆相沉积环境。其中 Sr/Ba 采用的是钻孔河口湾相的最小值 0.16, 即 Sr/Ba > 0.16 为海相及海陆过渡相沉积; 而 Mn/Fe 在钻孔河口湾相中变异系数较大, 因此采用现代沉积物中的平均值 0.23 为界限值, 即 Mn/Fe < 0.23 为海相及海陆过渡相沉积。综上, 文章在钻孔岩性特征的基础上, 根据 Sr/Ba 和 Mn/Fe 的海陆指相界限值, 结合微体化石及与已有研究结果的对比来综合判定陆相、海相及海陆过渡相沉积物。

3.4 泉州湾钻孔海侵地层的识别和对比

根据上述分析, 以钻孔地层岩性特征为基础,

利用有孔虫和介形类化石的丰度和类型、Sr/Ba 和 Mn/Fe 在钻孔地层中的变化, 结合地层年龄, 识别出泉州湾钻孔 MIS 3 阶段以来存在两期海侵地层(图 3)。

3.4.1 第 I 期海侵地层

在靠近河口区域(DZ01 钻孔), 该期海侵地层主要以河口—海湾相沉积单元为主, 细分为上、中、下三段:

(1) 上段(2.2~4.0 m), 岩性为灰黑色淤泥、含砂质淤泥, 偶见炭屑。Sr/Ba 平均值为 0.17, Mn/Fe 平均值为 0.18, 推测沉积相为河口湾相。在 2.65 m 处测得淤泥的 AMS- ^{14}C 年龄为 696 ± 15 a BP, 为全新世晚期海侵地层。

(2) 中段(4.0~8.8 m), 岩性为灰黑色淤泥质中细砂、含细砾中粗砂, 局部夹淤泥, 偶见植物根系和炭屑, 砾石直径 2~5 mm, 磨圆一般, 分选差。Sr/Ba 平均值为 0.15, Mn/Fe 平均值为 0.19, 推测其为受河流影响更大的河口河道相沉积。

(3) 下段(8.8~9.9 m), 岩性为灰黑色淤泥, 局部夹粉细砂。Sr/Ba 平均值相对较高, 为 0.22,

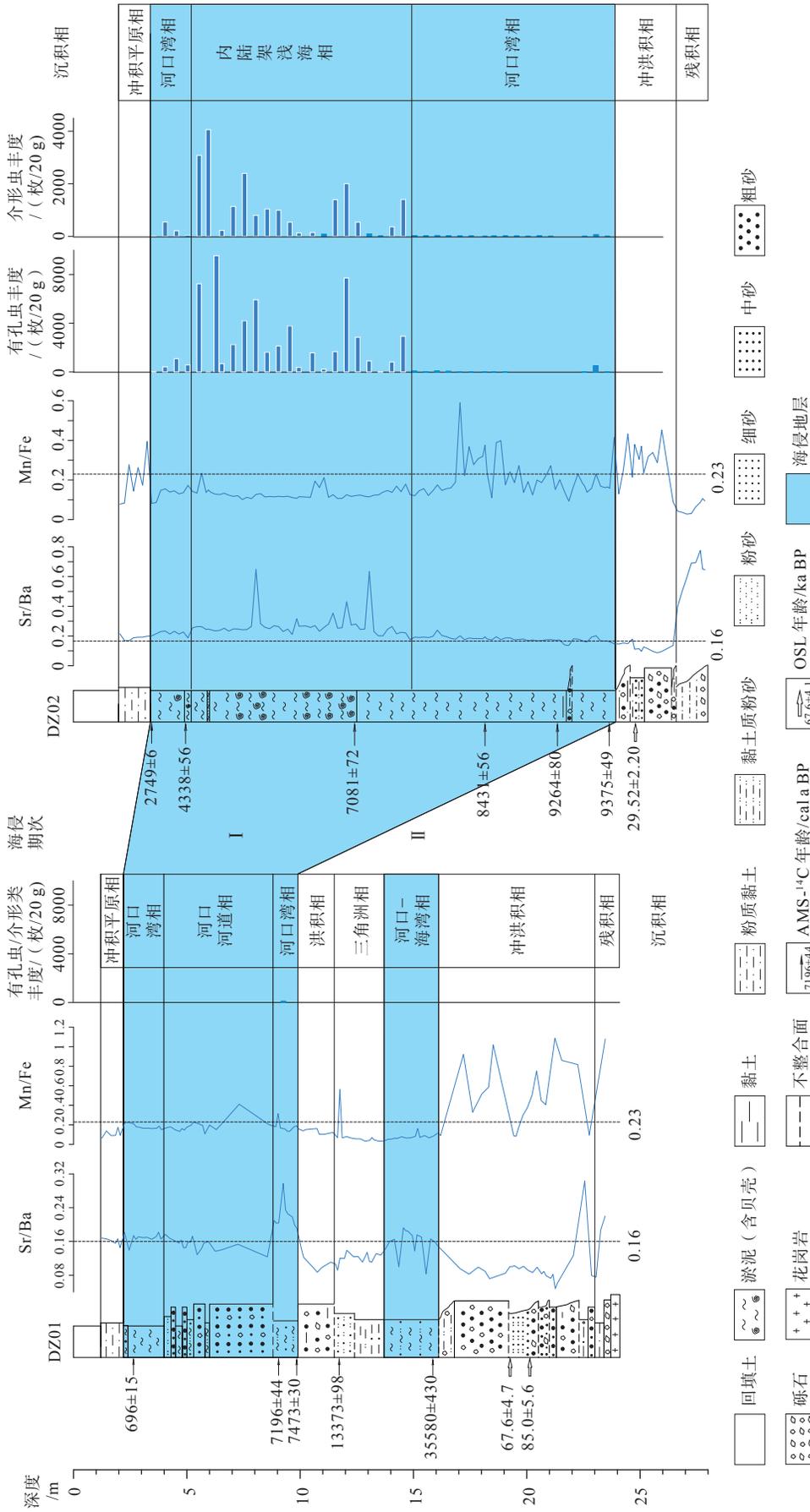


图3 泉州湾海岸带钻孔海侵地层识别和对比

Fig. 3 Identification and correlation of transgressive strata in the drill cores of Quanzhou Bay

Mn/Fe 平均值为 0.18。该层在 9.35 m 处见极少量广盐滨岸种介形类化石 4 属 4 种, 包括 *Cytheropteron miurense*(三浦翼花介)、*Munseyella japonica*(日本穆赛介)、*Pistocythereis bradyi*(布氏纯艳花介)和 *Sinocytheridea impressa*(凹陷中华美花介), 以及广温浅水种有孔类化石 *Ammonia beccarii*(毕克卷转虫), 反映该段总体为海陆交互作用环境下的河口湾沉积。在 9.05 m 和 9.85 m 处分别测得淤泥的 AMS-¹⁴C 年龄为 7196±44 a BP 和 7473±30 a BP, 为全新世中期海侵地层。

在远离河口的海湾沿岸(DZ02 钻孔), 该期海侵地层岩性以厚层灰黑色淤泥为主, 偶见炭屑, 局部夹粉砂, 部分层段见大量完整贝壳或碎片。从上到下分为三段:

(1) 上段(3.4~5.2 m), Sr/Ba 平均值为 0.22, Mn/Fe 平均值为 0.13; 含有孔虫和介形虫化石, 丰度较低, 均值分别为 0.52 千枚/20 g 和 0.20 千枚/20 g, 有孔虫以 *Ammonia aomoriensis*(同现卷转虫)、*Ammonia tepida*(暖水卷转虫)和 *Elphidium hispidulum*(粗糙希望虫)等广温、广盐的滨岸浅水种为主, 介形虫以广盐海相介形类 *Sinocytheridea impressa*(凹陷中华美花介)为主(赵红梅等, 2022a), 反映该段总体为海陆交互的河口湾沉积。在 3.45 m 和 4.95 m 处分别测得淤泥和贝壳碎片的 AMS-¹⁴C 年龄为 2749±6 a BP 和 4338±56 a BP, 为全新世晚期海侵地层。

(2) 中段(5.2~15.0 m), Sr/Ba 平均值为 0.27, Mn/Fe 平均值为 0.13; 含大量有孔虫和介形虫, 平均丰度分别为 2.97 千枚/20 g 和 1.07 千枚/20 g; 有孔虫以 *Ammonia beccarii*(毕克卷转虫)、*Ammonia aomoriensis*(奥茅卷转虫)和 *Elphidium spp.*(希望虫属)等为主, 另可见对水体盐度要求相对较高的瓷质壳类底栖有孔虫 *Quinqueloculina spp.*(五块虫属), 指示该层段盐度较高, 水动力条件相对和缓; 介形类在滨岸、内陆架中数量及种类较高, 可见 *Sinocytheridea impressa*(凹陷中华美花介)、*Neomonoceratina dongtaiensis*(东台新单角介)、*Bicornucythere bisanensis*(皮桑双角花介)和 *Pistocythereis bradyi*(布氏纯艳花介)等(赵红梅等, 2022a); 总体反映水体较深的内陆架浅海相沉积。在 12.45 m 处测得贝壳的 AMS-¹⁴C 年龄为 7081±72 a BP, 为全新世中期海侵地层。

(3) 下段(15.0~23.9 m), Sr/Ba 平均值为 0.18, Mn/Fe 平均值为 0.21; 有孔虫和介形虫化石丰度不高, 平均为 0.06 千枚/20 g 和 0.01 千枚/20 g, 有孔虫

以典型的滨岸化石种 *Ammonia spp.*(卷转虫属)为主, 介形类化石以广盐滨岸种 *Sinocytheridea impressa*(凹陷中华美花介)为主(赵红梅等, 2022a), 反映该段总体为近岸滨海或河口湾相沉积。在 18.15 m、21.45 m 和 23.65 m 处分别测得 AMS-¹⁴C 年龄为 8431±56 a BP、9264±80 a BP 和 9375±49 a BP, 为全新世早期海侵地层。该段海侵层 22.0 cm 深度处夹一段厚 0.4 m 的薄层深灰色—灰绿色黏土、粉质黏土, 密实、坚硬, 底部含砂砾, 与下伏淤泥层呈不整合接触, 未见微体古生物化石, 地层颜色体现了经常性或阶段性水下还原环境, 其上细下粗的二元岩性结构特征以及粒度明显变粗、分选性变差的特点, 反映了河口河道相沉积, 推测其为局部时段海平面波动下降导致的沉积相变化及沉积间断。

3.4.2 第 II 期海侵地层

在靠近河口区域(DZ01 钻孔), 该期海侵地层岩性为灰黑色淤泥与含淤泥粉细砂互层, 砂质均匀, 分选好, Sr/Ba 平均值为 0.156, Mn/Fe 平均值为 0.08, 该段虽未发现微体古生物化石, 但 Sr/Ba 平均值接近 0.16, 而 Mn/Fe 平均值远低于 0.23, 因此结合岩性特征推测其为受海水和河流双重影响的河口湾相沉积。该段地层在 15.85 m 处淤泥测得 AMS-¹⁴C 年龄为 35580±430 a BP, 为 MIS 3 阶段海侵。在远离河口的海湾沿岸(DZ02 钻孔)则未发现该海侵地层, 表明 MIS 3 阶段海侵程度较弱, 海水仅沿河道向上影响到河口区域, 未波及到沿岸平原。

4 讨论

以 DZ01 和 DZ02 两个钻孔的沉积记录及对海侵地层的判别为基础, 结合泉州湾沿岸、晋江沿岸其他钻孔(图 1, 表 5)和相关调查研究资料, 探讨了泉州湾海岸带 MIS 3 阶段以来的海侵—海退过程。泉州湾海岸带记录了晚更新世晚期(相当于 MIS 3 阶段)和全新世(MIS 1 阶段)两次海侵事件, 相当于区域上的福州海侵(蓝东兆等, 1986; 郑荣章等, 2005)和长乐海进(林景星, 1979; 韩书华和张静, 1992)。

MIS 3 阶段海侵地层在该区分布范围相对较小, 泉州湾仅沿岸部分钻孔可见, 如泉州湾晋江河口 DZ01 钻孔埋深 13.7~16.1 m 段的灰黑色淤泥与含淤泥粉细砂互层沉积, 虽然在沉积物中未检测出微体化石, 但根据岩性特征、Sr/Ba 和 Mn/Fe 判断,

表 5 泉州湾沿岸、晋江沿岸钻孔信息表

Table 5 Drill cores along Quanzhou Bay and Jinjiang Rivers

序号	钻孔编号	钻孔位置	钻孔深度/m	测试数据	资料来源
1	DZ01	晋江河口西岸	24.1	¹⁴ C、光释光、粒度、微体等	文中
2	DZ02	晋江市江头村	28.0	¹⁴ C、光释光、粒度、微体等	
3	CZ01	晋江市杏田村	7.7	¹⁴ C、光释光	赵红梅等, 2022b
4	ZK301	泉州北门养殖场附近	22.07	微体、孢粉、 ¹⁴ C	程乾盛, 1991
5	ZK308	泉州平原入海口附近的池店东侧	24.73	微体、孢粉、 ¹⁴ C	
6	QK3-5	浮桥镇新步村	35.69	¹⁴ C、光释光	张璞等, 2005
7	QZDSZK01	大淮新村刺桐南路	35.1	¹⁴ C、光释光	
8	QZDSZK02	池店镇江滨中学	21.6	¹⁴ C、光释光	
9	QZDSZK03	台商投资区百崎乡煤场南税务局对面砂场	28.7	¹⁴ C、光释光	陈大桂等, 2016
10	QZDSZK04	晋江大桥西南	25.9	¹⁴ C、光释光	
11	QZDSZK05	延陵村西南	27.7	¹⁴ C、光释光	

应为河口湾沉积环境, 沉积年代约为 35.6 ka。QZDSZK03 钻孔在埋深 21.8~24.0 m 段为分选较好的灰色细

砂, 22.2 m 处光释光年龄为 34.90±3.75 ka, 应是同时代沉积的河口相海侵地层(陈大桂等, 2016; 图 4)。

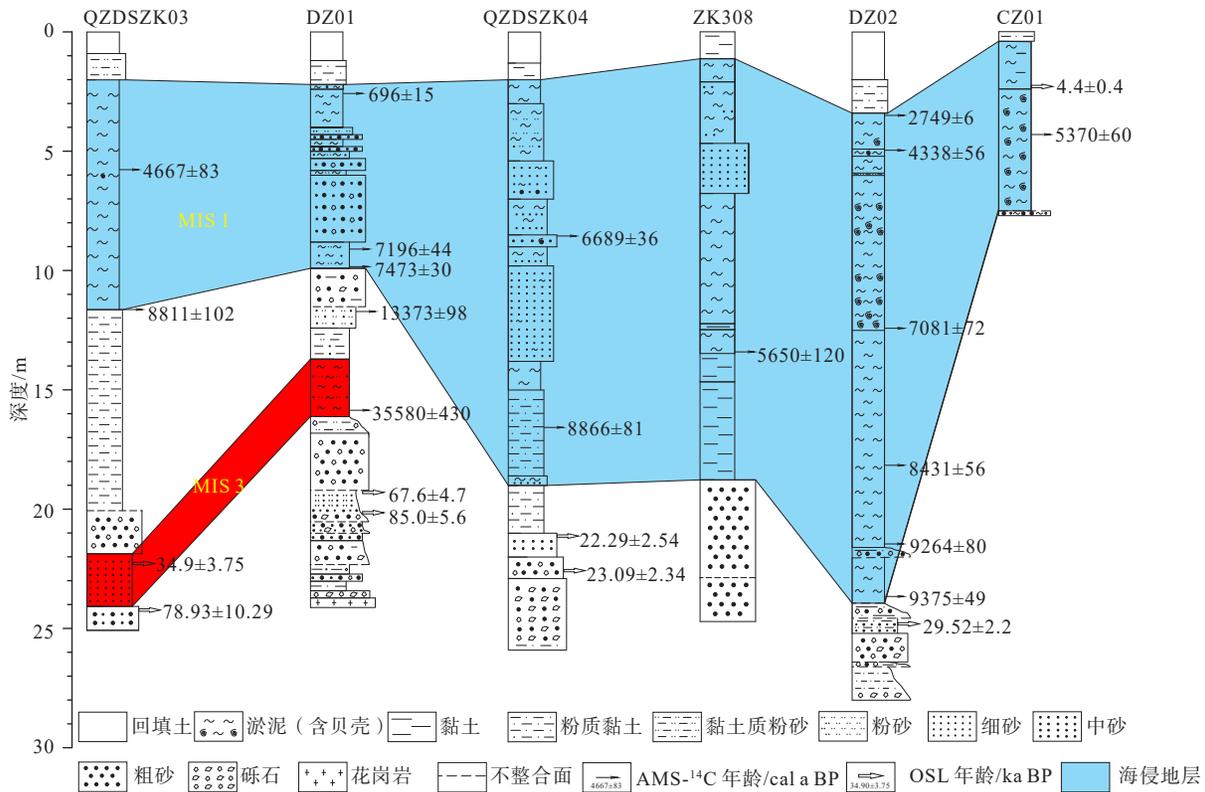


图 4 泉州湾沿岸钻孔海侵层对比 (剖面位置见图 1)

Fig. 4 Correlation of transgressive layers in the drill cores along the Quanzhou Bay coast (the location of the section is shown in Fig. 1)

闽南沿海其他地区也显示该次海侵程度较弱。厦门湾-九龙江河口地区钻孔中少见该期海侵层, 厦门湾筭筭湖、同安区、翔安区内皆出现河湖相沉积(瓦西拉里等, 2014), 厦门海沧东屿 ZK28 钻孔在该层中发现少量海相有孔虫和硅藻化石, ¹⁴C 年

龄约为 31.6 ka(蔡丽珠, 1988), 九龙江河口地区为陆相河流沉积(陈慧娟等, 2014)。漳州龙海平原 ZK14 钻孔在埋深 25.73~29.62 m 的紫灰色泥质中粗砂中, 发现少量硅藻, 包括横滨盒形藻、圆筛藻等, 推测沉积环境为半咸水—淡水的河口潮间带, 年代

大于 33.2 ka(曾金炉等, 1991)。因此, 推测该海侵事件仅在极盛期时波及该区低洼地带。根据福建沿海地区的研究结果(蓝东兆等, 1986; 郑荣章等, 2005), 该次海侵对应区域上的“福州海侵”, 其极盛期约在距今 35 ka。

晚更新世海侵之后进入末次盛冰期, 约在 25~14 ka 期间, 海平面大幅度震荡下降, 海水后退。这一时期气候寒冷干旱, 中国东部沿海地区海平面大幅下降, 幅度达 120~150 m(郭旭东, 1979; 赵希涛等, 1979; Peltier, 2002), 从而引起海岸带地层基准面下降, 导致区域地层大面积出露地表, 遭受风化剥蚀, 形成 5~3 ka 的沉积间断, 区域地层表现为岩相突变面或花斑状黏土层(瓦西拉里等, 2014)。

全新世海侵在该区分布非常广泛。全新世早期为海进初期, 钻孔地层记录显示泉州湾沿岸和晋

江沿岸地层岩性主要为灰色、灰黑色的黏土、砂质黏土、泥质粉砂或淤泥(图 4, 图 5)。DZ02 钻孔埋深约 22.0~23.9 m 处的地层记录了这一时期的海进, 岩性为灰黑色淤泥, 含少量有孔虫和介形虫化石, 反映了河口湾沉积环境, 地层年龄约为 9.4 ka。晋江中上游的 QZDSZK05(陈大桂等, 2016)、QK3-5(张璞等, 2005) 钻孔也记录了这一时期的海进, 地层年龄为 10.9~9.0 ka, 岩性为深灰色淤泥或灰色淤泥质黏土。QZDSZK03(陈大桂等, 2016) 钻孔在该期沉积岩性主要为灰色细砂夹淤泥。部分钻孔由于古地貌原因缺失这一时期的海侵地层, 如 QZDSZK03、DZ01、CZ01 钻孔等。针对闽南泉州湾外海峡西部 756 个柱状剖面的硅藻分析(支崇远等, 2003) 也表明, 距今 9.0 ka 的沉积地层中含大量海水种硅藻, 揭示了海平面的上升。

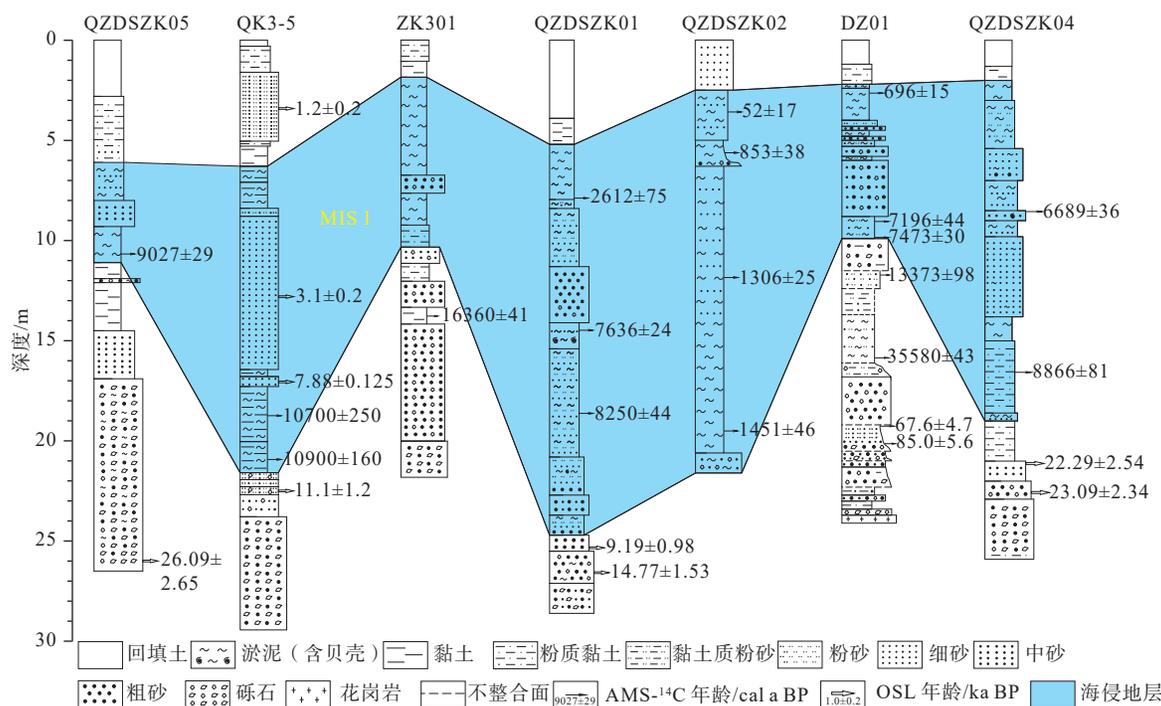


图 5 晋江沿岸钻孔海侵层对比 (剖面位置见图 1)

Fig. 5 Correlation of transgressive layers in drill cores along the Jinjiang River coast (the location of the section is shown in Fig. 1)

中全新世(8.2~4.2 ka; Walker et al., 2012), 气候炎热湿润, 海面急剧上升至最高, 是全新世海侵的极盛期。泉州湾海岸带处于内陆架浅海环境, 无论是靠近河口的 DZ01 钻孔, 还是处于海湾的 DZ02 钻孔, 均沉积了厚层的河口—海湾相灰黑色砂、砂质淤泥和淤泥, 且含丰富的有孔虫和介形类化石(图 3)。根据 QZDSZK05、QK3-5、ZK301 钻孔(陈大桂等, 2016) 的全新世海侵地层特征, 此时期海侵范围可

至泉州清源山和晋江紫帽山山脚, 与已有研究结果一致(何耀堂, 2011)。厦门湾在此期间海平面可达现代海平面之上约 3 m, 主要沉积灰、深灰、灰黑色淤泥、粉砂质黏土和黏土质粉砂。厦门岛筭筭湖 XM8 钻孔此时期地层中含有大量的有孔虫化石和圆筛藻, 说明当时的海侵淹没该区, 沉积了较厚的海相淤泥层(瓦西拉里等, 2014)。九龙江河口平原此时期沉积了较厚的海相灰、深灰、灰黑色淤泥、

砂质淤泥,并同时出现有孔虫和半咸水硅藻组合(陈慧娴等,2014)。漳州龙海平原 ZK5 孔此时期地层中含有丰富的海水种和浮游种,海侵最盛期(6~5 ka)海水沿九龙江入侵达漳州天宝,淹没了整个漳州盆地(陈文瑞等,1998)。

晚全新世(4.2 ka)以来,海面开始下降,至距今约 2.0 ka,与现今海平面高度基近一致。泉州湾北部的崇武西沙湾全新世海滩岩 ^{14}C 测年为 1980±85 a,记录了该处当时海岸线和海平面的位置(何耀堂,2014)。文中 DZ01、DZ02 钻孔此时期均为河口湾相沉积;之后,泉州湾沿岸海水陆续退出,成为冲积平原。但 QZDSZK02、DZ01、QZDSZK04 和 ZK308 钻孔位于距晋江河口较近的河流下游地带,此时仍为受海水影响的河口海湾环境,直至距今约 0.05 ka,海水才彻底退出转为河流和冲积平原(图 4,图 5),此时,泉州湾范围明显缩小,接近于现代海湾形态。厦门湾南部湖里区晚全新世为海岸沙滩,局部为潟湖沉积,沉积物粒度也由细变粗,但仍可发现有孔虫化石和圆筛藻(瓦西拉里等,2014)。九龙江河口湾中晚全新世约 1.0 ka 以来河口淤积加剧(陈文瑞等,1998),形成典型的湾内三角洲,河口沙坝、潮滩、潮道或水下分汊河道不断侧向迁移,形成了复杂的横向沉积相变(陈慧娴等,2014)。

5 结论

(1)通过对泉州湾现代沉积物以及泉州湾沿岸 DZ01、DZ02 钻孔中有明确微体古生物数据的同层位海相沉积物的地球化学元素特征进行统计分析,确认 Sr/Ba、Mn/Fe 在不同水深海相沉积物中变化规律明显,适宜作为泉州湾海岸带海相及海陆过渡相沉积物的指相元素,并提出将 $\text{Sr/Ba}>0.16$ 、 $\text{Mn/Fe}<0.23$ 作为该区海相及海陆过渡相沉积的界限值。

(2)以泉州湾沿岸 DZ01、DZ02 钻孔的地层岩性、岩相为基础,利用有孔虫和介形类化石的丰度和类型、Sr/Ba 和 Mn/Fe 在钻孔地层中的变化,结合地层年龄,并与区域钻孔进行对比,确认泉州湾 MIS 3 阶段以来发生过两次海侵—海退过程。第一次海侵发生于 MIS 3 阶段,对应区域上的“福州海侵”,其极盛期发生在距今约 35 ka;第二次海侵发生在全新世,对应于区域上的“长乐海进”,其极盛期发生在距今约 7~4 ka。距今约 2 ka,泉州湾沿岸海水陆续退出,成为冲积平原,而在距晋江河口较近的河流下游地带,直至距今约 0.05 ka,海水才彻底退出

转为河流和冲积平原。

References

- BARD E, HAMELIN B, DELANGHE-SABATIER D, 2010. Deglacial melt-water pulse 1B and younger Dryas sea levels revisited with boreholes at Tahiti[J]. *Science*, 327(5970): 1235-1237.
- BERKELEY A, PERRY C T, SMITHERS S G, et al., 2009. Foraminiferal biofacies across mangrove-mudflat environments at Cocoa Creek, North Queensland, Australia[J]. *Marine Geology*, 263(1-3): 64-86.
- CAI L Z, 1988. A preliminary study on ZK 3702 Quaternary micropaleobiocoensis and marine transgression of Xiamen Yuandang Harbour, Fujian[J]. *Geology of Fujian*, 7(3): 178-185. (in Chinese with English abstract)
- CHAPPELL J, OMURA A, ESAT T, et al., 1996. Reconciliation of late Quaternary sea levels derived from coral terraces at Huon Peninsula with deep sea oxygen isotope records[J]. *Earth and Planetary Science letters*, 141(1-4): 227-236.
- CHARRIEAU L M, FILIPSSON H L, LJUNG K, et al., 2018. The effects of multiple stressors on the distribution of coastal benthic foraminifera: a case study from the Skagerrak-Baltic Sea region[J]. *Marine Micropaleontology*, 139: 42-56.
- CHEN C H, LAN D Z, YU Y F, et al., 1990. Late quaternary stratigraphy in the Western Taiwan strait[J]. *Quaternary Sciences*(4): 301-307.
- CHEN D G, YE W C, ZHENG G M, et al., 2016. Report on evaluation results of engineering geological survey of Haixi harbor industrial zone[R]. Fujian Geological survey Institute: 45-59. (in Chinese)
- CHEN H X, LUO M M, WANG J H, et al., 2014. Sedimentary characteristics and depositional environmental evolution of the Quaternary in Jiulongjiang Estuary, Fujian Province[J]. *Journal of Palaeogeography*, 16(2): 263-273. (in Chinese with English abstract)
- CHEN R S, LIN D Y, LIU N Z, et al., 2004. Preliminary study on Quaternary stratigraphic division and Late Pleistocene sea-level changes in the south of Fujian[C]//Geoscience and technology forum of six provinces and one city in East China. Fuzhou: Chinese Geological Society, Fujian Provincial Geological Society: 67-72. (in Chinese)
- CHEN W G, 1983. Sedimentation and modern fault block movement of coastal Quaternary basins (or troughs) in Fujian Province[J]. *South China Journal of Seismology*, 3(3): 26-32. (in Chinese)
- CHEN W R, LAN D Z, CHEN C H, 1998. Late Quaternary diata and sea level changes in estuarine plain of the Jiulong River[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 20(2): 65-72. (in Chinese with English abstract)
- CHEN Z Y, CHEN Z L, ZHANG W G, 1997. Quaternary stratigraphy and trace-element indices of the Yangtze delta, Eastern China, with special reference to marine transgressions[J]. *Quaternary Research*, 47(2): 181-191.
- CHENG Q S, 1991. Neotectonics of Quanzhou Plain, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 10(4): 309-320. (in Chinese with English abstract)
- CHENG Q S, 1993. Classification and correlation of Quaternary System in Quanzhou Plain, Fujian[J]. *Journal of oceanography in Taiwan Strait*, 12(3): 257-265. (in Chinese with English abstract)
- COOPER J A G, MEIRELES R P, GREEN A N, et al., 2018. Late Quaternary

- stratigraphic evolution of the inner continental shelf in response to sea-level change, Santa Catarina, Brazil[J]. *Marine Geology*, 397: 1-14.
- GUO X D, 1979. Sea level changes since Late Pleistocene in China[J]. *Scientia Geologica Sinica*(4): 330-341. (in Chinese with English abstract)
- HAN S H, ZHANG J, 1992. Quaternary stratigraphic division and marine bed analysis of Mawei area, Fuzhou[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 12(1): 85-95. (in Chinese with English abstract)
- HANEBUTH T J J, STATTEGGER K, GROOTES P M, 2000. Rapid flooding of the Sunda shelf: a late-glacial sea-level record[J]. *Science*, 288(5468): 1033-1035.
- HAO Y C, QIU S Y, LIN J X, et al., 1980. Foraminifera[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- HASHIMOTO W, TAIRA K, KURIHARA K, et al., 1970. Studies on the Younger Cenozoic deposits in Taiwan (Formosa): Part 1. The younger Cenozoic deposits of the middle Part of West Taiwan[J]. *Geology and Palaeontology of Southeast Asia*, 8: 237-252.
- HE M, LIU G Y, ZHOU G H, et al., 2021. Transgression-regression process recorded by borehole sediments in Fuzhou Basin since MIS3[J]. *Journal of Earth Environment*, 12(1): 44-56. (in Chinese with English abstract)
- HE Y T, 2011. The sedimentary sporopollen and microbody paleontology and its paleoenvironment significance of the Late Quaternary period basin in Quanzhou city, Fujian province[J]. *Geology of Fujian*, 30(3): 224-232. (in Chinese with English abstract)
- HE Y T, 2014. Characteristic of Holocene beach rock and source environment analysis in Quanzhou gulf, Fujian Province[J]. *Geology of Fujian*, 33(2): 112-118. (in Chinese with English abstract)
- HOU H T, GOU Y X, CHEN D Q, 2002. Ostracoda of China[M]. Beijing: Science Press. (in Chinese)
- IPCC, 2019: Summary for Policymakers. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H. -O. Pörtner, D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N. M. Weyer (eds.)]. In press.
- LAMBECK K, CHAPPELL J, 2001. Sea level change through the last glacial cycle[J]. *Science*, 292(5517): 679-686.
- LAN D Z, YU Y F, CHEN C H, et al., 1986. Preliminary study on Late Pleistocene transgression and Holocene sea-level fluctuation in Fuzhou Basin[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 6(3): 103-111. (in Chinese with English abstract)
- LEI Y L, LI T G, 2016. Atlas of benthic foraminifera from China seas: the Bohai Sea and the Yellow Sea[M]. Berlin: Springer.
- LIN J, HONG Y, LIN Z W, et al., 2021. Spatiotemporal dynamics and its driving mechanism of the Quanzhou Bay Estuary Wetland, Fujian Province of eastern China[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 43(6): 75-82. (in Chinese with English abstract)
- LIN J X, 1979. Preliminary understanding of Holocene transgression along the coast of Fujian[J]. *Chinese Science Bulletin*(11): 517-520. (in Chinese)
- LIN X, LIU H J, WU Z H, et al., 2021. Provenance study on geochemical elements of detrital K-feldspar in Quaternary gravel layer in Yichang and its geological significance[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(6): 1024-1034. (in Chinese with English abstract)
- LINSLEY B K, 1996. Oxygen-isotope record of sea level and climate variations in the Sulu Sea over the past 150, 000 years[J]. *Nature*, 380(6571): 234-237.
- LIU J, WANG H, LI S Q, et al., 2004. Postglacial transgressive sedimentary records of muddy sedimentary areas in the north of the South Yellow Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 24(3): 1-10. (in Chinese with English abstract)
- LIU J, SAITO Y, KONG X H, et al., 2010. Delta development and channel incision during marine isotope stages 3 and 2 in the western South Yellow Sea[J]. *Marine Geology*, 278(1-4): 54-76.
- LIU J, ZHANG X H, MEI X, et al., 2018. The sedimentary succession of the last ~ 3.50 Myr in the western South Yellow Sea: paleoenvironmental and tectonic implications[J]. *Marine Geology*, 399: 47-65.
- MAUZ B, HASSLER U, 2000. Luminescence chronology of Late Pleistocene raised beaches in southern Italy: new data of relative sea-level changes[J]. *Marine Geology*, 170(1-2): 187-203.
- MEI X, ZHANG X H, LIU J, et al., 2019. Elemental geochemical record of land and sea environmental evolution since 3.50 Ma in South Yellow Sea[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 49(1): 74-84. (in Chinese with English abstract)
- Ministry of Natural Resources, 2022. Sea level bulletin of China in 2021[EB/OL]. (2022-04-08). http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html. (in Chinese)
- MO W C, 2017. Study on remote sensing monitoring and landscape pattern dynamics of Quanzhou Bay coastal wetland during the past 20 years[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University. (in Chinese with English abstract)
- PELTIER W R, 2002. On eustatic sea level history: Last glacial maximum to Holocene[J]. *Quaternary Science Reviews*, 21(1-3): 377-396.
- PELTIER W R, FAIRBANKS R G, 2006. Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record[J]. *Quaternary Science Reviews*, 25(23-24): 3322-3337.
- QI L, QIAO Y S, LIU Z X, et al., 2021. Geochemical characteristics of the Tertiary and Quaternary Eolian deposits in eastern Gansu province: Implications for provenance and weathering intensity[J]. *Journal of Geomechanics*, 27(3): 475-490. (in Chinese with English abstract)
- RAMSEY C B, 2009. Bayesian analysis of radiocarbon dates[J]. *Radiocarbon*, 51(1): 337-360.
- RODRIGUEZ A B, ANDERSON J B, BANFIELD L A, et al., 2000. Identification of a -15 m Wisconsin shoreline on the Texas inner continental shelf[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 158(1-2): 25-43.
- SHACKLETON N J, 1987. Oxygen isotopes, ice volume and sea level[J]. *Quaternary Science Reviews*, 6(3-4): 183-190.
- SHEN L N, LI C, CHEN D G, et al., 2017. Late Holocene palynological record and its paleoenvironmental implication in the Western Quanzhou Bay, Fujian Province, East China[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 34(2): 218-226. (in Chinese with English abstract)
- SUN D D, LIU P, ZHANG J, et al., 2022. Identification and significance of the Late Pleistocene transgressive strata in the bays of northern Fujian Province based on geochemical element indicators of sedimentary origin[J]. *Journal of Palaeogeography*, 24(1): 139-151. (in Chinese)

- with English abstract)
- SUN Z Y, LI G, YIN Y, 2015. The Yangtze River deposition in southern Yellow Sea during Marine Oxygen Isotope Stage 3 and its implications for sea-level changes[J]. *Quaternary Research*, 83(1): 204-215.
- WA X L L, WANG J H, ZHENG Y W, et al., 2014. Pollen characteristics and their Paleoclimatic significance since MIS4 in Xiamen Bay and Jiulong River estuary[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 53(6): 53-62. (in Chinese with English abstract)
- WALKER M J C, BERKELHAMMER M, BJÖRCK S, et al., 2012. Formal subdivision of the Holocene series/Epoch: a discussion paper by a working Group of INTIMATE (Integration of ice-core, marine and terrestrial records) and the Subcommittee on quaternary stratigraphy (International Commission on Stratigraphy)[J]. *Journal of Quaternary Science*, 27(7): 649-659.
- WANG G P, LIU J S, ZHAI Z L, 2005. Ratio of elements and their implications within typical sedimentation profile in the marsh: Salinization indicators and climatic change between the arid and the humid[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 25(3): 3335-3339. (in Chinese with English abstract)
- WANG P X, MIN Q B, BIAN Y H, et al., 1981. Strata of quaternary transgressions in East China: a preliminary study[J]. *Acta Geologica Sinica*(1): 1-13. (in Chinese with English abstract)
- WANG P X, 1992. The use and misuse of microfossils in marine transgression studies[J]. *Quaternary Sciences*, 12(4): 321-331. (in Chinese with English abstract)
- WANG P X, CHAPPELL J, 2001. Foraminifera as Holocene environmental indicators in the south Alligator River, Northern Australia[J]. *Quaternary International*, 83-85: 47-62.
- WANG S H, YANG J M, ZENG C S, et al., 1994. Sea level changes since Late Pleistocene along Fujian coast[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 13(2): 166-175. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y Y, GUO W Y, ZHANG G D, 1979. Application of some geochemical indicators in determining of sedimentary environment of the Funing Group(Paleogene), Jin-Hu depression, Kiangsu Province[J]. *Journal of Tongji University*(2): 51-60. (in Chinese with English abstract)
- WANG Y Y, WU P, 1983. Geochemical criteria of sediments in the coastal area of Jiangsu and Zhejiang provinces[J]. *Journal of Tongji University*(4): 79-87. (in Chinese with English abstract)
- WANG Z H, JONES B G, CHEN T, et al., 2013. A raised OIS 3 sea level recorded in coastal sediments, southern Changjiang delta plain, China[J]. *Quaternary Research*, 79(3): 424-438.
- WEI D G, JIE Y J, HUANG T G, 1997. Regional geological structure of Fujian[J]. *Regional Geology of China*, 16(2): 162-170. (in Chinese with English abstract)
- WOODROFFE C D, MURRAY-WALLACE C V, 2012. Sea-level rise and coastal change: the past as a guide to the future[J]. *Quaternary Science Reviews*, 54: 4-11.
- WU C Q, CAI F, WU J Z, et al., 2011. Topographic and morphologic features in the coastal zone of Quanzhou Bay and their controlling factors[J]. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 31(4): 75-81. (in Chinese with English abstract)
- XIONG X H, XIAO J F, 2011. Geochemical indicators of sedimentary environments—a summary[J]. *Earth and Environment*, 39(3): 405-414. (in Chinese with English abstract)
- YANG J M, 1988. The last marine transgression and sea level changes along the Fujian coast during Late Pleistocene[J]. *Marine Sciences*(5): 5-9. (in Chinese with English abstract)
- YAO Q Y, 1982. Neotectonic movement and earthquakes along the southeast coast of Fujian (Quanzhou Bay—Dongshan island)[J]. *South China Journal of Seismology*, 2(1): 18-23. (in Chinese)
- YIN J H, ZHENG Y G, LIU Y X, 2005. An overview of radiocarbon calibration[J]. *Seismology and Geology*, 27(4): 678-688. (in Chinese with English abstract)
- ZENG C S, 1997. Transgressions and sea level changes along the Northeast Coast of Fujian during the Late Quaternary[J]. *Journal of Fujian Teachers University (Natural Science)*, 13(4): 94-101. (in Chinese with English abstract)
- ZENG C S, 2000. Geochemical characters of the “Old Red Sands” along the coast of Southeast Fujian[J]. *Journal of Desert Research*, 20(3): 248-251. (in Chinese with English abstract)
- ZENG J L, WU L, HAN M K, 1991. Quaternary division and sea level changes in the Jiulong River Estuary Plain, Fujian Province[C]//Proceedings on quaternary geology along the Southeast Coast of China: 115-121. (in Chinese)
- ZHANG J W, LI G Y, ZHAO X T, 1982. Chronology studies on the Late Quaternary stratigraphy and Neotectonic movement along the coastal area of South Fujian and East Guangdong[J]. *Seismology and Geology*, 4(3): 27-37. (in Chinese with English abstract)
- ZHANG P, CHEN J Q, TIAN M Z, et al., 2005. Grain-size characteristics of quaternary sediments and its sedimentary environment implication in Quanzhou City, Fujian province[J]. *Journal of Salt Lake Research*, 13(2): 25-33. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H M, LIU C L, MAO X, et al., 2022a. Evolution of holocene stratigraphy and sedimentary environment in Quanzhou Bay coast[J]. *Journal of Stratigraphy*, 46(4): 401-410. (in Chinese with English abstract)
- ZHAO H M, LIU T B, MAO X, et al., 2022b. Special report on Quaternary transgression records and sedimentary environment evolution in Xiamen, Zhangzhou and Quanzhou coastal zone[R]. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences: 19-20. (in Chinese)
- ZHAO X T, GENG X S, ZHANG J W, 1979. Sea level changes of the Eastern China during the past 20000 years[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1(2): 269-281. (in Chinese with English abstract)
- ZHENG R Z, CHEN G H, XU X W, et al., 2005. Strata division of buried Late Quaternary of Fuzhou Basin[J]. *Seismology and Geology*, 27(4): 556-565. (in Chinese with English abstract)
- ZHI C Y, WANG K F, LAN D Z, et al., 2003. Study on the relationship between diatom assemblage and paleoenvironment of the Late Quaternary in the Taiwan Channel and Xiamen Island[J]. *Acta Micropalaeontologica Sinica*, 20(3): 244-252. (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 蔡丽珠, 1988. 厦门筭筭港 ZK3702 第四纪微体古生物群及海侵初探[J]. *福建地质*, 7(3): 178-185.
- 陈承惠, 蓝东兆, 于永芬, 等, 1990. 台湾海峡西部海域晚第四纪地

- 层[J]. 第四纪研究(4): 301-307.
- 陈大桂, 叶文超, 郑国明, 等, 2016. 海西临港工业区工程地质调查评价成果报告[R]. 福建省地质调查研究院: 45-59.
- 陈慧娴, 骆美美, 王建华, 等, 2014. 福建九龙江河口第四纪沉积物特征及沉积环境演变[J]. 古地理学报, 16(2): 263-273.
- 陈润生, 林东燕, 刘乃忠, 等, 2004. 闽南地区第四纪地层划分及晚更新世海平面变化的初步研究[C]//2004年华东六省一市地学科技论坛论文集. 福州: 中国地质学会, 福建省地质学会: 67-72.
- 陈文瑞, 蓝东兆, 陈承惠, 1998. 九龙江河口平原晚第四纪硅藻及海平面变化初探[J]. 海洋学报, 20(2): 65-72.
- 陈伟光, 1983. 福建省沿海第四纪盆地(或槽地)的沉积与近代断层运动[J]. 华南地震, 3(3): 26-32.
- 程乾盛, 1991. 泉州平原的新构造[J]. 福建地质, 10(4): 309-320.
- 程乾盛, 1993. 泉州平原第四纪地层的划分对比[J]. 台湾海峡, 12(3): 257-265.
- 郭旭东, 1979. 晚更新世以来中国海平面的变化[J]. 地质科学(4): 330-341.
- 韩书华, 张静, 1992. 福州市马尾地区第四纪地层划分及海相层分析[J]. 海洋地质与第四纪地质, 12(1): 85-95.
- 郝谄纯, 裴松余, 林甲兴, 等, 1980. 有孔虫[M]. 北京: 科学出版社.
- 何梅, 刘庚余, 周国华, 等, 2021. 福州盆地钻孔沉积物记录的 MIS3 以来海侵—海退过程[J]. 地球环境学报, 12(1): 44-56.
- 何耀堂, 2011. 福建泉州晚第四纪盆地沉积的孢粉和微体古生物及其古环境意义[J]. 福建地质, 30(3): 224-232.
- 何耀堂, 2014. 福建泉州湾全新世海滩岩特征及物源环境分析[J]. 福建地质, 33(2): 112-118.
- 侯祐堂, 勾韵娴, 陈德琼, 2002. 中国介形类化石[M]. 北京: 科学出版社.
- 蓝东兆, 于永芬, 陈承惠, 等, 1986. 福州盆地晚更新世海侵及全新世海面波动的初步研究[J]. 海洋地质与第四纪地质, 6(3): 103-111.
- 林津, 洪宇, 林志玮, 等, 2021. 福建泉州湾河口湿地时空动态及其驱动机理[J]. 北京林业大学学报, 43(6): 75-82.
- 林景星, 1979. 福建沿海全新世海进的初步认识[J]. 科学通报(11): 517-520.
- 林旭, 刘海金, 吴中海, 等, 2021. 宜昌第四纪砾石层钾长石主、微量元素物源研究及其地质意义[J]. 地质力学学报, 27(6): 1024-1034.
- 刘健, 王红, 李绍全, 等, 2004. 南黄海北部泥质沉积区冰后期海侵沉积记录[J]. 海洋地质与第四纪地质, 24(3): 1-10.
- 梅西, 张训华, 刘健, 等, 2019. 南黄海 3.50 Ma 以来海陆环境演变的元素地球化学记录[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 49(1): 74-84.
- 自然资源部, 2022. 2021年中国海平面公报[EB/OL]. (2022-04-08). http://gi.mnr.gov.cn/202205/t20220507_2735509.html.
- 莫文超, 2017. 近 20 年泉州湾滨海湿地遥感监测与景观格局分析[D]. 福州: 福建农林大学.
- 蔡琳, 乔彦松, 刘宗秀, 等, 2021. 陇东新近纪红粘土与第四纪黄土地球化学特征及其物源和风化指示意义[J]. 地质力学学报, 27(3): 475-490.
- 沈林南, 李超, 陈大桂, 等, 2017. 福建泉州湾西部晚全新世孢粉组合特征及其古环境意义[J]. 微体古生物学报, 34(2): 218-226.
- 孙丹丹, 刘平, 张杰, 等, 2022. 基于沉积成因地化元素指标的闽北海湾晚更新世海侵地层辨识及其意义[J]. 古地理学报, 24(1): 139-151.
- 瓦西拉里, 王建华, 郑艳伟, 等, 2014. 厦门湾—九龙江口地区 MIS4 以来孢粉组合特征及古气候意义[J]. 中山大学学报(自然科学版), 53(6): 53-62.
- 王国平, 刘景双, 翟正丽, 2005. 沼泽沉积剖面特征元素比值及其环境意义: 盐碱化指标及气候干湿变化[J]. 地理科学, 25(3): 3335-3339.
- 汪品先, 闵秋宝, 卞云华, 等, 1981. 我国东部第四纪海侵地层的初步研究[J]. 地质学报(1): 1-13.
- 汪品先, 1992. 微体化石在海侵研究中的应用与错用[J]. 第四纪研究, 12(4): 321-331.
- 王绍鸿, 杨建明, 曾从盛, 等, 1994. 福建沿海晚更新世以来的海平面变化[J]. 台湾海峡, 13(2): 166-175.
- 王益友, 郭文莹, 张国栋, 1979. 几种地球化学标志在金湖凹陷阜宁群沉积环境中的应用[J]. 同济大学学报(2): 51-60.
- 王益友, 吴萍, 1983. 江浙海岸带沉积物的地球化学标志[J]. 同济大学学报(4): 79-87.
- 韦德光, 揭育金, 黄廷淦, 1997. 福建省区域地质构造特征[J]. 中国区域地质, 16(2): 162-170.
- 吴承强, 蔡锋, 吴建政, 等, 2011. 泉州湾海岸带地形地貌特征及控制因素[J]. 海洋地质与第四纪地质, 31(4): 75-81.
- 熊小辉, 肖加飞, 2011. 沉积环境的地球化学示踪[J]. 地球与环境, 39(3): 405-414.
- 杨建明, 1988. 福建沿岸晚更新世末次海侵及其海平面的变化[J]. 海洋科学(5): 5-9.
- 姚庆元, 1982. 闽东南沿海(泉州湾—东山岛)新构造运动与地震[J]. 华南地震, 2(1): 18-23.
- 尹金辉, 郑勇刚, 刘粤霞, 2005. 古地震¹⁴C 年龄的日历年代校正[J]. 地震地质, 27(4): 678-688.
- 曾从盛, 1997. 闽东北沿海晚第四纪海侵与海面变动[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 13(4): 94-101.
- 曾从盛, 2000. 闽东南沿海老红砂的地球化学特征[J]. 中国沙漠, 20(3): 248-251.
- 曾金炉, 郭苍, 韩慕康, 1991. 福建九龙江河口平原第四系划分与海平面变化[C]//中国东南沿海第四纪地质论文集: 115-121.
- 张景文, 李桂英, 赵希涛, 1982. 闽南粤东沿海晚第四纪地层与新构造运动的年代学研究[J]. 地震地质, 4(3): 27-37.
- 张璞, 陈建强, 田明中, 等, 2005. 福建省泉州市第四纪沉积物粒度特征及沉积环境分析[J]. 盐湖研究, 13(2): 25-33.
- 赵红梅, 刘春雷, 毛欣, 等, 2022a. 泉州湾海岸带全新世地层及沉积环境演化[J]. 地层学杂志, 46(4): 401-410.
- 赵红梅, 刘泰北, 毛欣, 等, 2022b. 厦漳泉海岸带第四纪海侵记录及沉积环境演化专题报告[R]. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所: 19-20.
- 赵希涛, 耿秀山, 张景文, 1979. 中国东部 20000 年来的海平面变化[J]. 海洋学报(中文版), 1(2): 269-281.
- 郑荣章, 陈桂华, 徐锡伟, 等, 2005. 福州盆地埋藏晚第四纪沉积地层划分[J]. 地震地质, 27(4): 556-565.
- 支崇远, 王开发, 蓝东兆, 等, 2003. 闽南第四纪晚期沉积硅藻组合与古环境研究[J]. 微体古生物学报, 20(3): 244-252.