



闽中南近海浅部地震地层和埋藏特殊地貌

刘阿成, 唐建忠, 张 杰, 吴 巍

Seismic stratigraphy and buried special geomorphological features in shallow strata off middle and south Fujian Province, China

LIU Acheng, TANG Jianzhong, ZHANG Jie, and WU Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16562/j.cnki.0256-1492.2022032201>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

渤海湾西岸晚更新世以来的沉积环境演化及碳埋藏评价

Environmental evolution and carbon burial assessment of the west coast of Bohai Bay since Late Pleistocene

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(6): 194

南黄海中部隆起晚新近纪—第四纪沉积序列的地层划分与沉积演化

Stratigraphic classification and sedimentary evolution of the late Neogene to Quaternary sequence on the Central Uplift of the South Yellow Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 25

东海南部陆架水体2011年夏季温盐结构及其对台湾暖流和黑潮入侵的指示

The summer thermohaline structure of 2011 of the southern East China Sea shelf and its implications for the intrusion of Taiwan Warm Current and Kuroshio Current

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 151

北康盆地基底卷入断层特征及其对南海南部构造演化的启示

Features of the basement-involved faults in the Beikang Basin and their implications for the tectonic evolution of the southern South China Sea

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(4): 116

全新世中国大河三角洲沉积演化模式转化及其对人类活动的响应

Changes of evolution models of China's large river deltas since Holocene and their responses to anthropogenic activities

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 77

珠江口内伶仃洋晚第四纪黏土矿物组成特征及对源区气候变化的指示

Late Quaternary clay minerals in the inner Lingdingyang of the Pearl River Estuary, southern China: Implications for paleoclimate changes at the provenance

海洋地质与第四纪地质. 2021, 41(5): 202



刘阿成, 唐建忠, 张杰, 等. 闽中南近海浅部地震地层和埋藏特殊地貌 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2022, 42(6): 119-130.

LIU Acheng, TANG Jianzhong, ZHANG Jie, et al. Seismic stratigraphy and buried special geomorphological features in shallow strata off middle and south Fujian Province, China[J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2022, 42(6): 119-130.

闽中南近海浅部地震地层和埋藏特殊地貌

刘阿成^{1,2}, 唐建忠¹, 张杰³, 吴巍³

1. 上海东海海洋工程勘察设计院有限公司, 上海 200137

2. 国家海洋局东海信息中心, 上海 200136

3. 国家海洋局东海海洋环境调查勘察中心, 上海 200137

摘要:在闽中南近海台湾海峡中西部的湄洲湾和泉州湾采用拖筏震源进行高分辨率单道浅地震调查, 测线网格在南部海域为 1 km×5 km, 北部为约 5 km×8 km。有两个区域性的强反射界面: 海底面和陆相强侵蚀面。局部可以辨识海侵面、最大海泛面和基岩面。除了在晚更新世古河道等负地形区外, 陆相强侵蚀面与海侵面重合, 该强侵蚀面将地震剖面分隔为上层序和下层序, 而海侵面又将上层序划分为全新世海相和晚更新世古河道充填相层。其中, 全新世海相层为主体, 全区有分布, 部分海域可以分成上亚层和下亚层。在晚更新世末次低海面时期, 研究区南部发育古晋江南河道和北河道, 最宽分别约 7~8 km 和 2 km, 北部为密集的溪沟地貌, 宽约 1 km; 推测随着海平面上升, 古晋江河道发生堆积退缩, 直至消失, 时间为约 12.0~9.6 kaBP, 而后掩埋于全新世海相层之下。在研究区最南部, 有 19 条长度 1 km 以上的潮流沙脊埋藏于全新世海相层内, 高约 1~7 m, 长约 1.5~10 km, 大体相互平行, 主要发育年代可能在约 10 kaBP。沙脊分为单脊型和多脊型, 前者又分为单脊孤立型和单脊多列型, 后者分为简单多脊型和超复多脊型, 沙脊高度与下伏亚层的厚度基本上呈正相关。泉州湾口外发育小型河道和水下三角洲, 主要浅埋于全新世海相层内, 形成于全新世。这些埋藏特殊地貌的发育, 除北部海域的溪沟外, 均与晋江水沙有关。

关键词:地震地层; 特殊地貌; 全新世; 晚更新世; 闽中南近海; 台湾海峡西部

中图分类号: P736

文献标识码: A

DOI: 10.16562/j.cnki.0256-1492.2022032201

Seismic stratigraphy and buried special geomorphological features in shallow strata off middle and south Fujian Province, China

LIU Acheng^{1,2}, TANG Jianzhong¹, ZHANG Jie³, WU Wei³

1. Shanghai East Sea Marine Engineering Survey and Design Institute Co. Ltd., Shanghai 200137, China

2. East Sea Information Centre of State Oceanic Administration, Shanghai 200136, China

3. East Sea Marine Environment Survey and Prospect Centre of State Oceanic Administration, Shanghai 200137, China

Abstract: High-resolution shallow-seismic profiles using boomer in inshore area off Meizhou Bay and Quanzhou Bay, the middle of the western Taiwan Strait were analyzed. The survey grids are 1 km×5 km in the southern area and about 5 km×8 km in the northern. The seismic profiles reveal two regional strong reflectors: T0 (sea bottom) and SB (subaerial erosion surface); and three locally recognizable: TS (transgressive surface), MFS (maximum flooding surface), and TR (rock surface). Apart from paleo-negative topography, such as river channels of MIS 2, SB coincides with TS. In addition, the seismic profiles can be divided at SB into upper sequence (USQ) and lower sequence (LSQ). The USQ is subdivided at TS into unit U1 (marine Holocene) and U2 (infillings of paleo-channel of MIS 2). During the last low sea level, the south and north channels of paleo-Jinjiang River were developed in the southern study area in 7~8 km and 2 km, the widest width, respectively. In the northern study area were developed quite dense gullies, about 1 km wide, which might be related to complicated paleo-ground and streams from Meizhou Bay region varying strongly in season. Considering sea level curves, as sea level rising, the south channels were gradually submerged landward about 12.0~9.6 kaBP. In addition, 19 buried linear tidal sand ridges in NE-SW direction within unit U1 in the southernmost part of the study area were recognized. The sand ridges are about 1~7 m high, 1.5~10 km long, and usually in intervals of several-hundred meters to about 1 km. They were mainly formed at about 10 kaBP. In terms of the profile shapes and internal structures, they could be divided into single-crest sand ridges and multiple-crests sand ridges. The former ones are in turn subdivided into isolated single-crest ridges and single-crest ridges of multiple-lines, while the latter ones, into simple multiple-crests ridges and overlapped multiple-crests ridges. A small river

资助项目: 我国近海海洋综合调查与评价专项 (908-01-QC20)

作者简介: 刘阿成 (1950—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事海洋地质地球物理和海洋工程勘测研究, E-mail: lac2004@163.com

收稿日期: 2022-03-22; 改回日期: 2022-06-28. 周立君编辑

channel and a subaqueous delta were mainly buried inside U1 just outside Quanzhou Bay mouth. They were formed during the Holocene. The development of all these buried special geomorphological features, but gullies in the northern area, were related with sand and water discharges of paleo-Jinjiang River.

Key words: seismic stratigraphy; special geomorphological features; Holocene; Late Pleistocene; off middle and southern Fujian Province; western Taiwan Strait

晚更新世以来,由于海平面升降变化,近岸海域大范围出露成陆,之后又被海水淹没,陆地和海洋环境交替,形成复杂的侵蚀-沉积地貌和沉积层序。网格化的高分辨率浅地震剖面有着连续而又比较密集的地层记录,能够提供丰富的浅部地层层序和沉积环境信息,是研究晚更新世末以来海平面和沉积环境变化的重要手段。同时,高分辨率浅地震剖面调查也能为海洋工程提供基础地质信息。

台湾海峡连接东海和南海,属于东海的一部分,具有独特的构造和环境特征,既受东海、南海和大洋流系的影响,又有众多中小型山溪性河流入海,是研究我国晚更新世海平面升降、沉积环境分布变化和海陆相互作用的理想海域。海峡西部为福建省,海岸线曲折,岬湾相间,河口近海的沉积物和沉积层序研究^[1-6]主要集中在闽江口外海域。闽江多年平均径流量 $574 \times 10^8 \text{ m}^3$,输沙量 $656 \times 10^4 \text{ t}$,流域面积约 $6.1 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[2],属于中型山溪性河流。泉州湾和湄洲湾位于海峡西部中段,两湾近海对于研究晚更新世末以来小型山溪性河流的泥沙去向和地貌发育特点,具有很好的代表性和对比性。

在泉州湾和湄洲湾附近海域,前人在地层层序等方面做过一些研究^[7-11],陈承惠等^[7]在台湾海峡西部取得 16 个活塞柱状岩芯,进行了微古、孢粉、 ^{14}C 测年和古地磁等方面的分析研究,划分了晚第四纪地层层序。Liu 等^[8]采用典型地震剖面结合柱状样,研究约 7 ka(高海面)以来,长江泥沙扩散沉积物的地震地层结构和厚度分布等,向南包括了闽中南近海。许江等^[9]对泉州湾及其以南的闽南海岸带进行了浅地层剖面调查,划分了地震层序。杜文波等^[10]从油气勘探前景的角度,在湄洲湾外至闽江口外海域,进行了高分辨率二维地震勘探和钻井调查,建立了层序地层格架,识别特征地震相。其他人^[11-12]的地震剖面进入研究区的部分海域或外海附近。因此,对于闽中南近海,浅部地震地层、古地貌以及沉积环境演变的研究和认识还相当缺乏。本文根据较密集的高分辨率浅地震网格剖面,研究该海域晚更新世末以来的地震层序和埋藏的特殊地貌,揭示古河道的分布演变和成因,首次发现埋藏的全新世线性潮流沙脊群等,探讨其发育过程和成

因,为台湾海峡西部海域晚更新世末以来的沉积环境及其演变提供了新的认识和证据,揭示岬湾海岸小型山溪性河流的泥沙去向和地貌塑造过程等。

1 研究区概况

研究区北到福建省莆田市(属于闽中)南日岛附近,南至泉州市(闽南)深沪湾外,包括湄洲湾和泉州湾外近海,处于台湾海峡西部中段,长约 100 km,呈 NE-SW 走向,外侧水深约 25(北部)~35 m(南部),向岸到 5 m 等深线;海底地形为 NE-SW 走向,向海倾斜,平均坡度约 1‰。北部海域的近岸海底比较复杂,如湄洲湾内的潮流深槽紧贴湾口岬角延伸到湾外(图 1)。研究区的近岸和湾口海域总体上属于水下侵蚀-堆积岸坡,主体海域(水深约 40 m 以浅)为陆架斜坡区,向外依次为狭窄的现代倾斜堆积平原和潮流水道^[13-14];近岸区表层沉积物为黏土质粉砂,外海区为粉砂质砂,南部与台湾浅滩细砂区毗邻,与较早的研究^[15]基本一致。湄洲湾为半封闭狭长形海湾,深入陆地约 35 km,总体约为 SSE 走向,面积约 424 km^2 ,缺少常年性河流(溪流);泉州湾为开敞式海湾,面积约 128 km^2 ,晋江在湾顶附近注入,因此泉州湾也是晋江入海河口湾,湾内北侧还有洛阳江流入;两湾均为构造成因,周围主要为晚侏罗纪酸性火山岩和燕山晚期花岗岩形成的剥蚀低山丘陵^[16],处于浙闽隆起区的南部。

2 资料和方法

海上调查采用 GeoAcoustic Geopulse Boomer 高分辨率单道浅地震勘探系统,主要包括 Boomer 震源(拖筏)、水听器电缆(20 个水听器单元)、接收机、GeoPro4 工作站、高压电源等,地层分辨率 0.2~0.5 m,滤波器 3~500 kHz,记录量程 120 ms,发射能量 350 J, DGPS 导航定位,拖筏和水听器电缆拖于船后,间距约 5~10 m。在南部海域测线网格为 $1 \text{ km} \times 5 \text{ km}$,在北部海域为约 $5 \text{ km} \times 8 \text{ km}$,测线总长度 1355 km。资料处理采用仪器系统配套的 GeoPro4 工作站,在其显示器上回放,深度有距离和

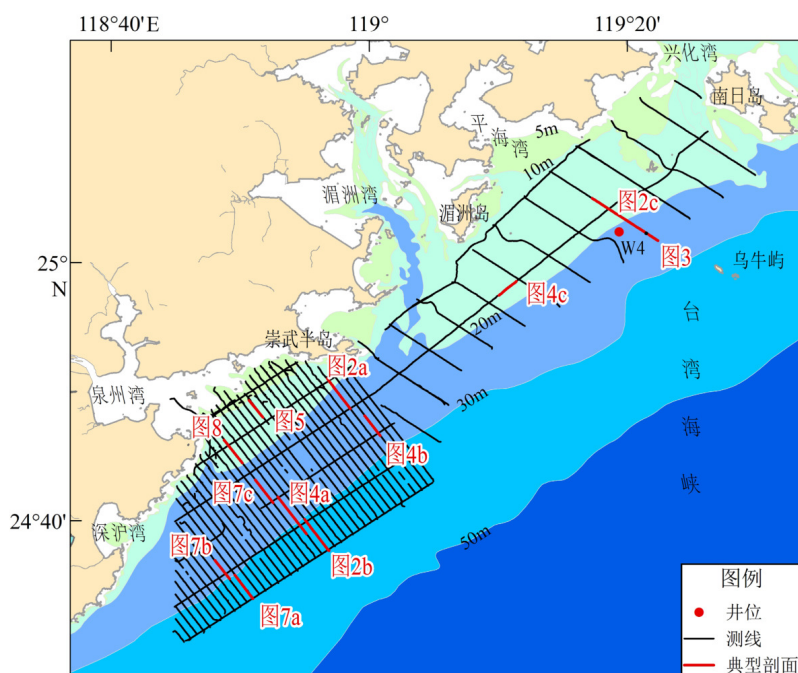


图 1 研究区和测线位置图

Fig.1 Location of the study area and deployment of survey lines

双程反射时间两种模式, 由于本文研究的地层和地貌深度较浅, 两种模式之间的误差很小, 为了便捷, 选择距离模式, 地震波平均速度为 1550 m/s。地震剖面记录的深度为实时值, 也就是现场实时海面至目标的深度。人工勾绘目标物的位置, 根据其时间展布在航迹图上, AutoCAD 清绘出图。根据地震剖面的反射波结构特征, 确定主要反射界面和沉积层序, 分析埋藏地貌的特征和层位, 结合前人成果研究地貌发育过程及其主要因素等。

3 结果

3.1 地震地层学特征

3.1.1 反射界面和层序

研究区有两个区域性的强反射界面: 海底面 (T0) 和陆相强侵蚀面 (SB), 以及局部性的较强反射界面: 海侵面 (TS)、最大海泛面 (MFS) 和基岩面 (TR) (图 2)。

T0 界面: 反射波振幅强, 连续性好, 全区分布, 为海底面。

SB 界面: 反射波振幅强—较强, 连续性好—较好, 全区可以追踪, 埋深一般略大于 10 m, 深度约 30~65 m; 削截下伏地层, 总体上向海倾斜, 在南部海域比较平缓, 在北部强烈起伏 (图 2), 为晚更新世 (MIS 2) 低海面陆地环境下的强侵蚀面。在闽江口

外^[4]、珠江口^[17]和南黄海^[18]也有类似的标志性界面。

TS 界面: 反射波振幅强—较强, 连续性好—较好, 平缓地向海倾斜, 成为古河道、洼槽等负地形充填相的顶界面, 为冰后期海侵面, 除了古河道等负地形区外, TS 与 SB 界面重合 (图 2b、c), 削截或顶超下伏地层。海侵面在台湾海峡西部和东海近海都可观察到^[8]。

MFS 界面: 反射波振幅较强, 连续性较好, 向海微倾, 上、下地层呈整合接触, 在北部海域特征明显 (图 2c), 推测为最大海泛面, 年代略早于 7 kaBP^[8], 约 8.5~6.3 kaBP^[12] 或者约 7.5 kaBP^[19]。

TR 界面: 反射波振幅强—较强, 多尖峰状, 为基岩反射界面 (图 2a), 在北部海域较发育, 与海域比较狭窄、陆地较近和海岛较多有关系。

杜文波等^[10]在浅部地震剖面中划分出 R_0 、 R_1 、 R_2 和 R_3 反射界面, 确认 R_3 是区内最显著的强剥蚀不整合面, R_2 上下反射波总体平行, R_1 上下反射波平行, 结合钻井 W4 的孢粉、古地磁分析和有孔虫组合等, 认为 R_3 是晚更新统内部的一个界面, 形成年代大致为 18~45 kaBP, R_2 对应全新统底界面, R_1 为早全新统与中全新统的分界面, 年代为 6~8 kaBP。从反射波特征看, R_3 与 SB 界面相同, R_2 在研究区的地震剖面上并不明显, R_1 与 MFS 相当。W4 井与本文相邻地震剖面的对比见图 3, 由于总体上 TS 界面在外海区较低, 近岸区较高, 所以不同海域的 TS 界面的年代是变化的, 与 W4 井的对比

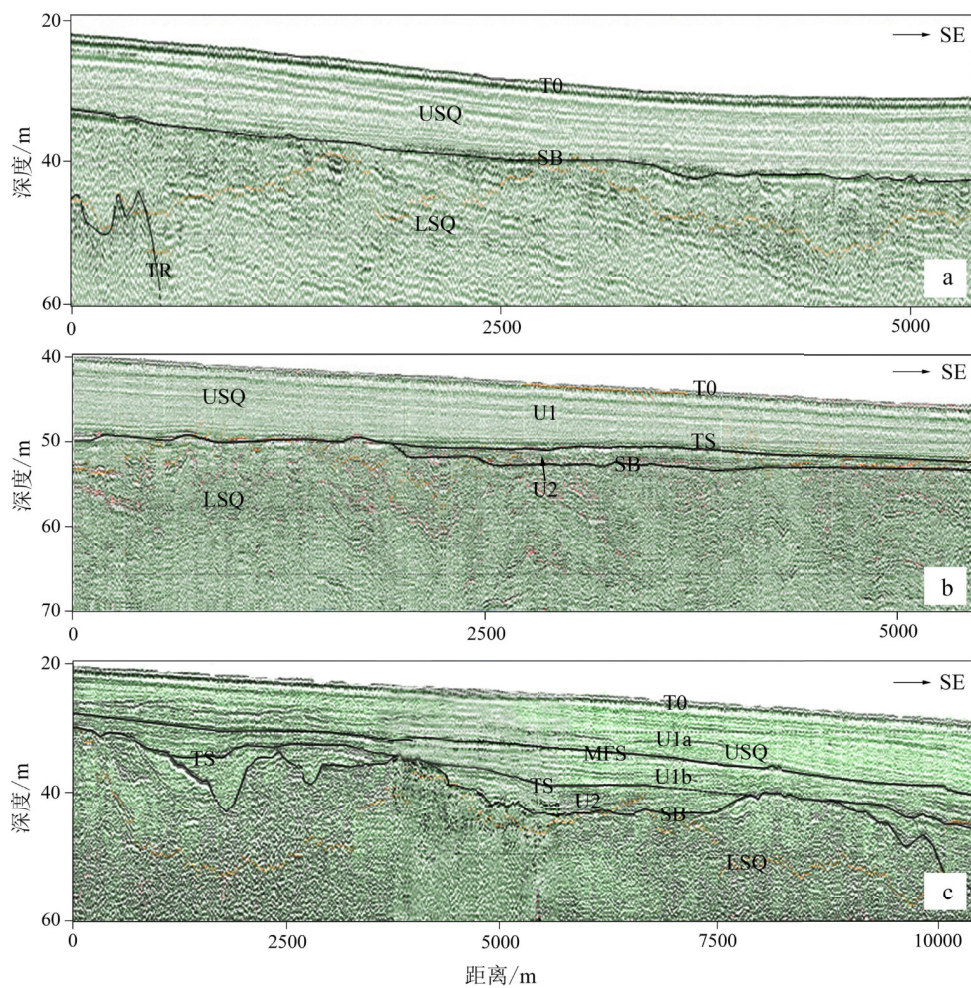


图2 典型地震反射界面和层序

a. 南部近岸区, b. 南部外海区, c. 北部外海区。剖面位置见图1, 下同。

Fig.2 Typical seismic reflection surfaces and sequences

a. Southern inshore sea; b. southern outer sea; c. northern outer sea. Locations are shown in Fig.1, the same hereinafter.

深度是不确定的, 故在图3中两者用虚线对比, 在后面的讨论中可以看出, TS/SB界面的年代基本上都是晚于11 kaBP, 也就是属于全新世, 所以虚线位于R2界面之上。

3.1.2 地震层序特征和沉积相

在地震地层学上, 不整合面以及与其可以对比的整合面构成沉积层序界面。SB界面将地震剖面分隔为上下两个沉积层序, 即上层序(USQ)和下层序(LSQ), 两者主要呈角度不整合接触(图2)。USQ层序被TS界面划分为U1层和U2层, U1层为主体, 全区有分布, U2层为古河道等负地形充填相(图2c、4), 局部有分布, 当U2层缺失时, U1层与USQ层序相同, 以下一般只标记为U1。

U1: 是海底面T0与TS界面之间的地层(图2b—c、4), 反射波频率高—中等, 振幅强—较强, 连续性好—较好, 显著特征是近水平(亚)平行反射结

构(图2); 厚度在南部海域相对稳定, 约7~14 m, 平均约11 m, 在北部海域一般厚约3~16 m, 平均约10 m, 变幅较大, 局部在海湾门口潮流冲刷槽内缺失; 在北部海域局部被MFS界面分成上下两个亚层U1a和U1b(图2c、4c), 反射波特征基本相同, 为整合接触; 一般分层不明显, 统称为U1层, 反映环境能量较低的浅海—滨海沉积相; 层内发育埋藏潮流沙脊群、水下三角洲、河道等特殊地貌单元, 这将在后面阐述和讨论。

U2: 为TS与SB界面之间的地层单元, 反射波连续性好—较好(图2b—c、4); 一般为侧向充填或上超充填结构, 为古河道等负地形充填相, 属于陆相沉积物。

LSQ: SB界面以下的地震层序, 总体上反射波杂乱或者断续、不规则波状, 振幅变化大(图2、4), 有向海倾斜的趋势(图2a、c), 局部可见(亚)水平平

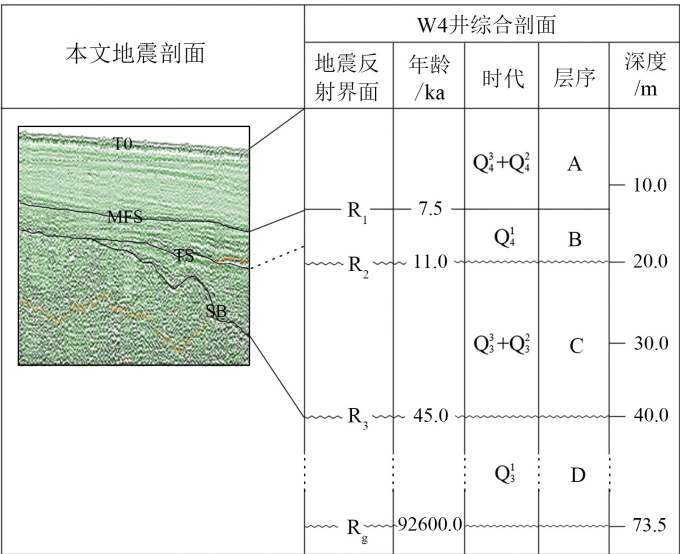


图 3 W4 井与相邻地震剖面对比图^[10]
Fig.3 Correlation between borehole W4 and nearby seismic profile^[10]

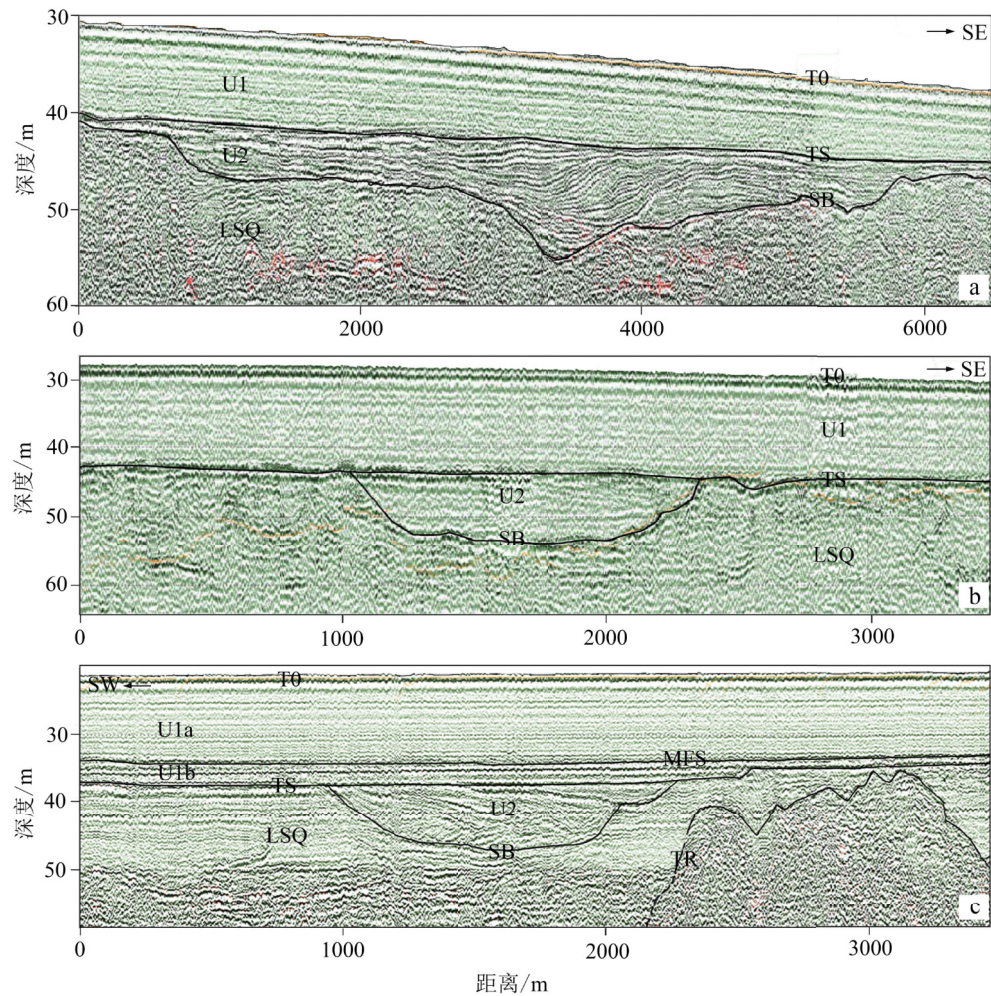


图 4 典型地震层序和 MIS 2 古河道
a. 南部外海区, b. 南部近岸区, c. 北部外海区。

Fig.4 Typical seismic sequences and paleo-river channels of MIS 2
a. Southern outer sea; b. southern inshore sea; c. northern outer sea.

行结构(图 4c)。岩性主要为含砾砂,属于冲积/洪积平原相^[10]。

3.2 埋藏特殊地貌

3.2.1 埋藏河道

主要有晚更新世末次低海面时期(MIS 2)的古河道,分布比较广泛,保存较好,河道形态较完整、清晰,容易识别(图 2c、4)。这与其形成时代距今较近,河道及其充填层埋藏于 U1 层之下且埋深较浅,未受到浅层气和扰动等因素的明显影响有关。埋藏的全新世(MIS 1)古河道(图 5)仅发现于泉州湾口门外侧附近。年代更老地层(LSQ)内的古河道较难辨识(图 2b),本文未予进一步关注。

3.2.1.1 晚更新世古河道特征

(1)古河道断面特征。河道切入下伏地层,掩埋于 U1 层之下,一般宽约 1~2 km,深约 5~10 m,横断面较多地为“U”型和“V”型(图 2c、4),也有宽槽形的,最宽可达 7~8 km,深约 7~10 m,与河流弯道和分汊处有关,外海区河道底面在现海平面下约 65 m,近岸河道约 40~35 m。总体上,研究区南部的河道较宽,比较平缓,河道充填沉积物(U2 层)的反射波连续性和平行性较好(图 4a、b),反映流速较缓,沉积环境比较稳定;而北部的河道较窄,常较陡或呈锯齿状起伏,U2 充填层的反射波变化较大,平行性和连续性相对较差(图 2c、4c)。这与南部海域毗邻的泉州湾内有晋江等常年性河流注入有关,而且古地形开阔平坦,属于山脚平原,沉积物较厚,有利于在低海面时期形成宽缓、弯曲的河流。北部海域毗邻的湄洲湾是季节性很强的山溪,而且距离陆地较近,多岛礁,古地面硬实破碎,或为基岩低丘(图 4c),沟壑发育(图 2c),为山麓边坡地貌。不难想象,研究区北部的“古河道”,枯季干涸,洪季暴涨,在特征和成因上与南部古河道有较大的差别,可以称之为溪沟。为叙述简便,以下在未作特殊说明的时候,河道一词也包含了这些溪沟。

(2)古河道平面分布特征。在研究区南部,总体上河道比较弯曲,较宽,可以分为近 S-N 向的南河道和 NWW-SEE 向的北河道(图 6a)。南河道从泉州湾口南部向海,蜿蜒曲折至研究区南边界,主河道长约 37 km,而直线长约 23 km,弯曲系数约为 1.6;宽约 1~5 km,最宽约 7~8 km,在外海区多汊道,反映河口区辫状河流的特点;在最西部海区,即深沪湾近岸海区,有宽约 1~1.5 km 的分支河道,偏离上述主河道流向西南,基本上平行海岸线。北河道从泉州湾口中部分向 SEE 延伸,相当顺直,与泉州湾的走向基本一致,长度约 27 km,宽约 0.7~2 km,远端记录不清晰,规模相比南河道要小很多。

在研究区北部,古溪沟众多、密集,大体可以归并为约 4 条(群),除了古地面比较破碎的因素,主要可能与相邻海湾在低海面时期较大的汇水面积和季节性很强的溪流有关,如溪沟上游靠近湄洲湾(与湾口海底潮流冲刷槽有所重合)和平海湾等,最北面的溪沟可能与兴化湾的溪流有关;间距约 3~12 km,一般约 4~6 km,较顺直至略弯曲,宽约 1 km,基本上都呈 SW-S 走向通往台湾海峡。由于测线间距为 5 km,溪沟走向有不确定性,所以不排除有其他连结(走向)的可能性。

3.2.1.2 全新世古河道特征

在泉州湾口外侧海区,U1 层内发育埋藏古河道,长约 7 km,一般宽约 1 km,最宽约 2.5 km,呈向东横卧的“入”字形,总体走向为东偏南,由北汊和南汊组成,分别由湾口北部(大坠岛北侧)和南部(小坠岛南侧)延伸而来(图 6b),与前述的北河道走向相近,平面上有部分重叠(图 5—6)。河道横断面呈“U”型,深约 5~10 m,切入 U1 层的中下部(图 5),最深可切入 LSQ 层序约 3 m。南汊的中段(较宽)典型剖面表明,其发育可以分为先(南)后(北)两期,两者的底面和顶面均基本处于相同的深度,北汊部分叠覆在南汊之上,可以解释为前者是在后者被部分冲刷的基础上形成的。

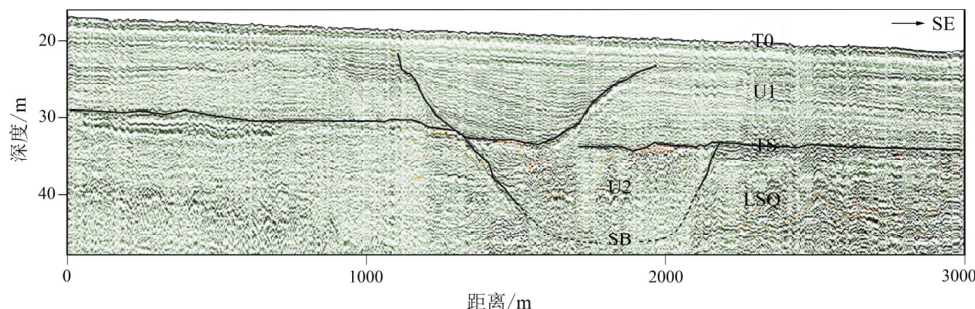


图 5 MIS 1 古河道切入 U1 层后被其顶部地层覆盖

Fig.5 Paleo-river channel of MIS 1 incised U1 and later buried by the top layers

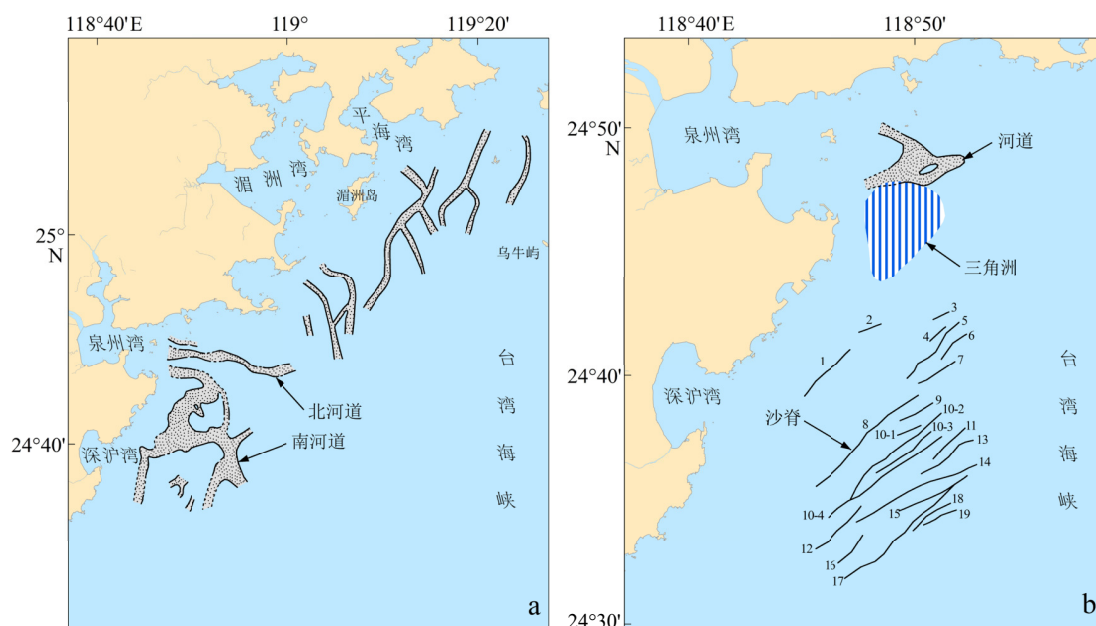


图 6 埋藏特殊地貌分布图

a. MIS 2 古河道, b. MIS 1 潮流沙脊、河道和三角洲。

Fig.6 Distribution of buried special geomorphologic features

a. Paleo-river channels of MIS 2; b. tidal sand ridges, river channels and delta of MIS 1.

3.2.2 埋藏沙脊群

埋藏沙脊成群分布于研究区最南部的 U1 层内, 有长度超过 1 km 的沙脊 19 条(图 6b), 按照集中度可以分为 3 个小区, 即西北小区 2 条(SR01 和 02), 东北小区 5 条(SR03-SR07), 南小区 12 条(SR08-SR19); 走向约为 NE-SW, 是比较典型的线性平行沙脊群, 这种堆积地貌体一般以砂为主, 可以称为潮流沙脊群。沙脊区总面积约 190 km², NNE-SSW 走向, 长约 22 km, 最宽约 15 km, 向南超出研究区。沙脊高度约 1~7 m, 一般约 3~5 m, 长约 1.5~10 km, 平均约 4 km, 底部宽(最宽)一般约 200~1000 m, 极端最宽约 2100 m, 平均约 600 m; 脊顶埋深约 3~10 m, 平均约 6 m, 一般外海的埋深较小, 近岸的较大; 沙脊之间相距约数百米至 1 km, 最大间距约 5.5 km, 最近约百米。沙脊的底面比较平直, 可以分为两种, 一种(主要的)是 U1b 亚层顶面(图 7a、b), 另一种是海侵面 TS(图 7c), 前者主要分布于外海的南小区, 后者在近岸的小区。根据潮流沙脊的顶部形态, 主要可以分为单脊型和多脊型。单脊型沙脊只有单个脊顶(图 7a、c), 可以再分为孤立单脊型和多列单脊型; 前者单独出现, 距离其他沙脊较远, 分布于西北小区, 东南距离最近的沙脊约 5.5 km(图 6b); 后者沙脊相互平行, 一般间距数百米(图 7a、c); 单脊型沙脊顶部为窄弧形, 底部最宽一般约 500~700 m, 但是位于西北区的孤立型潮流脊

SR01 则是例外, 最宽约 1200 m。多脊型沙脊较宽, 顶宽 1000 m 以上, 底宽可达 2100 m, 可以分为简单多脊型和超复多脊型。简单多脊型沙脊在剖面上有两个以上的脊顶, 但是内部融为一体, 推测是在潮流和波浪的作用下, 顶部物质发生短距离搬运堆积, 形成波状起伏, 当波状幅度过大时, 可能分离出新的单脊型潮流沙脊。超复多脊型沙脊有多个脊顶, 而且反映超复过程的内部界面比较明显。图 7b 的地震剖面显示超复多脊型沙脊至少有 3 个脊顶, 内部相应地可以分为 3—4 期(阶段), 由 NW(陆)向 SE(海)超复, 也就是向海侧的阶段较早, 向陆侧的较晚, 沙脊向陆增宽。SR10 潮流沙脊长约 11 km, 西南部约 2 km 为(窄顶)单脊型, 中南部为超复多脊型, 中北部为简单多脊型, 局部有分叉, 东北部 1 km 多则过渡为宽而平顶的单脊型沙脊。沙脊两翼基本对称的居多, 局部明显不对称, 如 SR10 沙脊的西南部, NW 翼比较宽缓, SE 翼窄陡, 视坡度分别为约 5%、20%, 可见向 SE 倾斜的前积层理, 倾向与陡翼一致; SR10-2 和 SR10-4 为支脊, 也显示出向 SE 倾斜的前积层理(图 7b), 指示由陆向海迁移堆积, 与上述沙脊阶段性的发育方向相反。

3.2.3 埋藏三角洲

在泉州湾口外南侧, 有一小型埋藏水下三角洲(图 6b), 从湾口南部向 SE 扩展, 长约 7.5 km, 最宽约 6 km, 面积约 30 km²; 最大厚度约 5 m, 其中前积

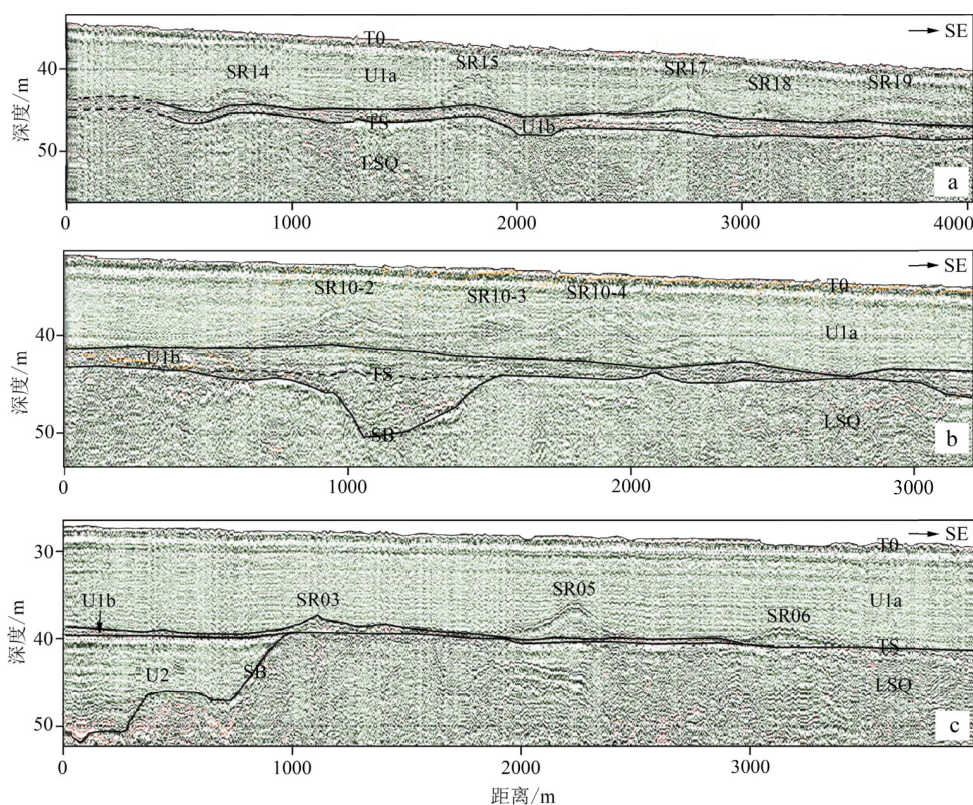


图 7 埋藏潮流沙脊的典型地震剖面

a. 多列单脊型沙脊, 形成于 U1b 之上, b. 超复多脊型沙脊, 形成于 U1b 之上, c. 多列单脊型沙脊, 基本上形成于 TS 之上。

Fig.7 Typical seismic profiles showing buried tidal sand ridges

a. Single-crest ridges of multiple-lines atop U1b; b. an overlapped multi-crest sand ridge atop U1b; c. single-crest ridges of multiple-lines, largely atop TS surface.

层(三角洲前缘相)厚度约 3 m, 层理倾角约 10%, 具有明显倾斜前积反射结构的宽度约 1.3~1.7 km, 顶积层(三角洲平原相)和底积层(前三三角洲相)厚度各约 1~2 m, 不是很明显, 边界较难准确认定; 埋藏于 U1 层的上部, 埋深约 2~4 m(图 8)。从平面形态判断, 三角洲源于经泉州湾南口入海的晋江泥沙。其埋深和地理位置与前述的全新世古河道比较一致, 可能两者的发育时代和成因有相似之处。

4 讨论

4.1 SB 反射界面地质年代

SB 界面以上的地震地层是本文研究的重点, 因此该界面的年代有特殊的意义。许江等^[9]推测浅部的强侵蚀界面 T_2 为全新统底面, 杜文波等^[10]则认为其是晚更新统内部的一个界面(R_3), 位于其上比较平直的 R_2 为全新统底面, 所以对全新统底面存在分歧, 然而全新统底面在本文地震剖面中没有明显的对应界面。W4 钻井在 73.5 m 处钻遇流纹岩,

同位素测年为 92.6 ± 0.42 Ma, 其他层位没有测年, 根据孢粉、有孔虫和古地磁等资料分析, 确定各界面的时代及在钻井中的深度(图 3), 但未将钻井与穿越的地震剖面作层序对比分析。

图 2c 的测线与 W4 井相邻(图 1), 其外海端的 SB 界面在现海面下约 55 m。W4 井将全新统底面的年代定为 11 kaBP(图 3)。根据海平面变化曲线, 55 m 深度相当于约 11.3 kaBP^[12] 或 11.15 kaBP^[8] 时的海平面高度, 因此约 11 kaBP 时海侵已淹没图 2c 剖面东端的 SB 界面(古地面), 该端点的东侧已是海洋环境, SB 界面上接受了晚更新世(MIS 2)海相沉积物, 而在西侧仍为陆地环境。随着海平面继续上升, 西侧开始堆积全新世(MIS 1)海相沉积物, 并且向岸推进, 因此 SB 界面是穿时的。其在东部海域为晚更新统内部的界面, 上下都为海相沉积物, 整合接触, 而在西部海域为全新统底面, 界面上下地层为不整合接触, 这种现象在黄海有报道^[20]。因此, U1 层下部在横向上也是穿时的。如果以 12 kaBP 作为全新统与晚更新统的分界^[5,18,21-22], SB 界面都属于全新统底面, 若以 10 kaBP 作为两者的分界, 则

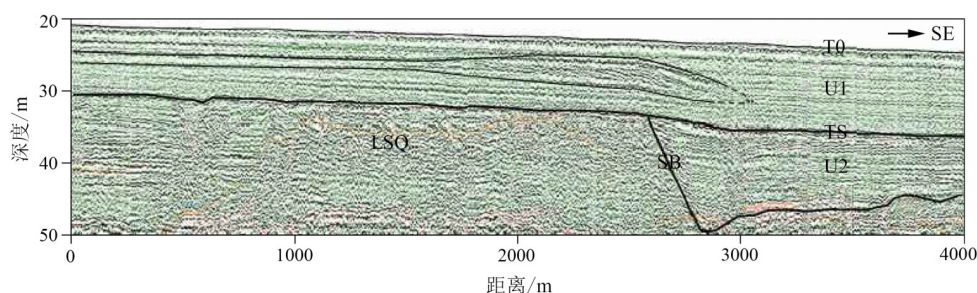


图 8 埋藏于 U1 层上部的三角洲

Fig.8 A delta buried in the upper U1 unit

SB 几乎都是晚更新统内部界面。为了与 W4 井一致, 本文以 11 kaBP 作为全新统底面年代。

4.2 埋藏河道发育和消亡

4.2.1 晚更新世古河道

晚更新世(MIS 2)海平面下降, 约 20 kaBP 时达到最低, 至现海平面下约 110~130 m, 研究区河流向东延伸, 切割台湾海峡陆架形成古河道, 而后海平面回升进入海侵期, 出现两次与融冰有关的海平面跃升事件(melt-water pulses, MWP), 即 MWP-1A 和 MWP-1B^[12](以下海平面曲线均引自该文)。在这两次事件之间, 在约 13.2~12 kaBP 期间海平面在约 67~68 m 的深度有过停顿。古晋江南河道外海区的深度为约 65 m, 开始处于河口环境, 发育河道充填相 U2 层; MWP-1B 事件结束后, 在约 10.8~9.6 kaBP 海平面处于约 37 m 的深度, 古晋江和海岸线退缩到近岸海域, 研究区沦为浅海区, 古河道基本消失于海水之下, 推测 U2 层的发育和 SB 古河道的消失时间, 由海向陆, 约为 12.0~9.6 kaBP。

小坠岛南侧为泉州湾口南部, 宽约 3.7 km, 大、小坠岛之间为中部, 宽约 1.2 km, 大坠岛北侧为湾口北部, 宽约 2.3 km。推测湾口南部古地形比较宽深, 是径流的优先入海通道, 而且湾口中部因大、小坠岛等原因, 附近地势较高, 受其阻挡, 古晋江先从湾口南部经研究区流入台湾海峡, 形成南河道; 随着海平面不断上升, 南河道退缩, 坡降趋缓, 湾口发生淤积堆高, 当地势较高时, 河流摒弃湾口南部, 改道为顺晋江和泉州湾走向(东偏南), 经湾口中部, 主要顺着大、小坠岛之间的峡谷入海, 形成北河道, 因此晚于南河道, 从河道顶面深度(图 4b)和海平面变化曲线估计, 时间约为 11.4 kaBP。

4.2.2 全新世古河道

在泉州湾外侧附近, 分布有埋藏于 U1 层内的古河道, 上覆厚度约 2~4 m 的 U1 层顶部沉积物, 河道内沉积物反射波以侧向前积充填为主, 向海倾

斜, 视倾角约 10%(图 5), 局部为(亚)水平平行上超充填, 反映单向水流的充填特征。泉州湾的潮差可达 6.7 m^[16], 推测在特大潮低潮期, 海底(潮滩)大面积裸露, 当遇到特大山洪暴发时, 洪水从湾口南部和北部奔腾入海, 海底受到冲刷, 形成河道, 而后被河流来沙充填, 继而因海平面上升被覆盖。河道分为南、北两汉的特点与现今湾口有南、北水道, 中部为向东伸展凸出的潮滩地貌是基本吻合的(图 1)。在北侧相邻的兴化湾内, 有柱状样长约 2.6 m, 近底部的¹⁴C 年龄约为 3.2 kaBP^[7], 如果以上覆沉积物厚度类比的话, 河道约发育于晚—中全新世之交, 基本处于高海面环境。若从河道顶面与海平面高度估算, 河道发育于中—早全新世, 即在高海面之前。在现代河口环境下, 河道水深 20~30 m 的现象并不罕见, 如长江河口。

4.3 埋藏沙脊的发育和消亡

海底潮流沙脊是在陆架近海区常见的线性沉积地貌, 由一系列基本平行的沙体组成, 其发育主要与足够强的潮流和丰富的松散沉积物有关^[23-24]。在欧洲北海南部发育众多线性潮流沙脊, 长数千米至 50 km, 宽可达 5 km, 高约 20~40 m, 最高约 65 m, 较早就开始了关于这些沙脊的形态、结构构造、发育机理和流体力学模拟验证等方面的研究^[24-28]。东海广泛发育海底沙脊, 地震剖面揭示^[29-30] 外陆架典型海域的沙脊长 10~50 km, 高 5~20 m, 间距 7~14 km。根据近年多波束全覆盖水深测量结果的统计分析^[31], 东海外陆架(水深 69~175 m)沙脊长 70~160 km, 高 5~20 m, 宽 4~6 km, 间距 7~15 km; 沉积物主要来源于晚更新世末次冰期的古长江河流输沙, 冰后期, 松散的沉积物在潮流作用下搬运堆积, 形成沙脊^[32]。南黄海江苏近岸发育海底辐射沙脊群^[33], 形成于全新世, 仍处于现代潮流的影响之下, 属于现代沙脊, 典型剖面显示沙脊高约 20 m^[18]。

与上述典型潮流沙脊相比较, 研究区的沙脊显

得矮小,高度只及前述的约 1/4~1/10,究其原因主要与松散沉积物不足等因素有关,属于“饥饿”型沙脊。沙脊下面及其附近有一薄的亚层(U1b),反射波主要特征为(亚)水平平行、连续性好,频率较高,振幅强—较强,厚度约 0~3 m,推断为河口—滨岸相,主要来源于古晋江南河道输沙,所以属于窄河口型潮流沙脊^[24]。在沙脊南小区,也即沙脊的主要分布区,U1b 亚层的厚度约 1~3 m,属较厚区,沙脊较多且集中(包括多脊型沙脊 SR10),相对较高,可达约 4~7 m(图 6,表 1)。而在沙脊东北小区和西北小区,U1b 亚层很薄或者基本缺失,沙脊发育在很薄的 U1b 亚层上或直接形成于 TS 界面之上,导致沙脊高度低,不超过 4 m(表 1),较多的仅约 1~2 m(图 7c)。从表 1 可以看出,沙脊高度与下伏 U1b 厚度一般呈正相关关系,位于西北小区的 SR01 沙脊看似例外,底部有约 1.6 m 的 U1b 亚层,但仅局限于沙脊之下,周边海底下部基本缺失 U1b,导致沙脊高度较低,也是符合这一规律的。

类似矮小的沙脊在西班牙地中海也有报道^[34],在距岸约 12(内)~20 km(外)的中外陆架,长约 14 km、宽约 7 km 的海底上分布有 11 条大体平行的沙脊,高 1.5~7 m,长 1100~3100 m,间距 600~1100 m,水深约 55~75 m;地震剖面显示浅部有一强起伏界面,上覆薄层松散沉积物,厚度在沙脊内最大,达到约 7 m,局部在沙脊之间的槽沟区缺失,界面出露而与海底面重合;沙脊形成于海侵期的浅水环境,年代为 10 kaBP,与海滨相连,随着海平面升高,海岸线后退而远离海岸,附近陆域只有小型河流输入细颗粒沙泥,因此属于缺乏沙源的饥饿型沙脊。该海域较薄的松散沉积物分布特征与研究区 U1b 亚层有相似之处,是两者潮流沙脊群均为矮

小型的主要原因。

沙脊区的 TS 界面在现海面下约 35~53 m,外海深,近岸浅。在约 11.3 kaBP(约处于 MWP-1B 事件的后半期)海平面上升到约 55 m 的深度,影响到沙脊南小区,晋江河口位于附近。MWP-1B 事件后,在约 10.7~9.5 kaBP,海平面停顿于约 37 m 的深度,沙脊区几乎全部被海水淹没,而后海平面又进入快速上升阶段,在约 9.2 kaBP 时到达约 30 m,9.0 kaBP 又至 10 m 的深度,晋江退缩到泉州湾口,远离沙脊区,河流输沙终止,因此推测 10.7~9.5 kaBP 是晋江输沙形成 U1b 亚层的主要时期。晋江年入海泥沙量平均为约 $283 \times 10^4 \text{ t}$ ^[35],海平面停顿造成泥沙在沙脊区的沉积时期约为 1.2 ka,总输沙量约 $33.96 \times 10^8 \text{ t}$,按一半扩散、一半沉积在沙脊区估算,计约 $16.98 \times 10^8 \text{ t}$,合约 $6.29 \times 10^8 \text{ m}^3$,相当于整个沙脊区沉积约 3.3 m 的厚度。在潮流和波浪的作用下,U1b 物质运移堆积形成沙脊群,细颗粒部分则漂移扩散出去,估算的泥沙厚度与 U1b 的剖面特征比较接近(图 7a),所以 U1b 亚层的泥沙总量不大,导致沙脊个体矮小。沙脊的发育应该略晚于 U1b 的形成,由外海向近岸,主要的发育期可能在 10 kaBP 前后。全新世埋藏潮流沙脊在南黄海辐射沙脊区也有发现^[18],沙脊高度约 11 m,脊顶深度约 36 m,属于窄河口型沙脊,参考我国较早的东部海平面变化曲线^[36],推断发育时间约为 10.2 kaBP,在年代上与本文的沙脊接近。该年代与前述西班牙地中海沙脊的发育时间也是基本一致的。

海底潮流沙脊与强潮流流向略斜交^[24-28,37],也有基本平行的^[25,27]。Huthnance^[28]应用流体力学计算验证潮流沙脊的发育演变理论^[26],设定沙脊和潮流略斜交(一般约 $7^\circ \sim 15^\circ$),取得了满意的结果。王鹏^[37]等通过潮流数值模拟的方法,统计分析了潮流与渤海沙脊的动力关系,当 M_2 分潮椭圆长轴在 $0.50 \sim 0.75 \text{ m/s}$,椭率绝对值小于 0.4 时,能够发育潮流沙脊,长轴与沙脊的走向基本一致,夹角一般在 20° 以内。台湾海峡的潮流流速为约 $0.5 \sim 1.0 \text{ m/s}$,在泉州湾以南海域,涨潮流为 NE 向,落潮流为 SW 向,为往复流^[38],数值模拟^[39]显示,在泉州湾近海, M_2 分潮长轴为约 0.7 m/s ,NE-SW 向,与埋藏沙脊的走向相近。沙脊发育时期海平面已较高,推测台湾海峡的动力环境与现在相似。流速约 $0.5 \sim 1.9 \text{ m/s}$ 的往复流是潮流沙脊发育的动力条件^[23],当时研究区具有潮流沙脊发育的动力条件,只是相对偏弱,在松散沉积物较贫乏的情况下,又难以淘蚀老地层补充泥沙,因此沙脊个体矮小。

表 1 沙脊典型(最大)高度和下伏 U1b 厚度

Table 1 Typical (maximum) height of sand ridges and thickness of their underlain U1b

沙脊编号	TS深度/m	海底深度/m	沙脊高度/m	U1b厚度/m	沙脊分区
SR17	47.2	37.7	5.7	3.2	南小区
SR15	45.5	37.2	4.7	1.2	南小区
SR10-4	44.4	33.7	7.2	1.2	南小区
SR07	42.0	32.7	4.4	1.6	南小区
SR05	40.7	27.7	2.0	~0*	东北小区
SR04	40.0	27.7	3.6	0.4	东北小区
SR01	36.0	25.9	3.6	1.6	西北小区

注: *: ~0是指U1b的厚度在剖面中难以分辨出,估计约为0 m。

5 结论

(1)在晚更新世末次低海面时期(MIS 2),研究区南部发育了古晋江南河道和北河道,最宽各约7~8 km和2 km,北部则为密集的溪沟地貌,宽约1 km,可能主要与古地面的复杂性和湄洲湾地区季节性很强的溪流有关。随着海平面的升高,古晋江河道发生堆积退缩,直至消失,由海向陆,时间为约12.0~9.6 kaBP。

(2)在研究区最南部的U1层内,埋藏有19条平行潮流沙脊群,高约1~7 m,按照剖面形态和内部结构特征,分为单脊型和多脊型潮流沙脊,前者又分为单脊孤立型和单脊多列型,后者分为简单多脊型和超复多脊型;沙脊高度与下伏U1b亚层的厚度基本上呈正相关;沙脊可能主要形成于10 kaBP前后。在泉州湾口外发育河道和水下三角洲,主要浅埋于U1层内,形成于全新世。

(3)上述埋藏特殊地貌,除北部海域的溪沟外,其发育都与晋江水沙有关系。

本文研究的重点海域,即南部海域,缺少钻孔,而且MIS 2以来的海平面变化曲线,不同研究者之间差异较大,所以还需要进一步的工作。

致谢: 上海东海海洋工程勘察设计院勘察室于2005年6—7月完成海上调查,左丽薇、宁楠和周勤佳协助本文图件的清绘编制,在此表示衷心的感谢。

参考文献 (References)

- [1] 许江, 朱嘉, 张昇彪, 等. 平潭海域地震层序及地层层序特征[J]. *地球物理学进展*, 2010, 25(2): 396-402. [XU Jiang, ZHU Jia, ZHANG Yibiao, et al. Characteristics of seismic sequence and stratigraphic sequence in the Pingtan sea area [J]. *Progress in Geophysics*, 2010, 25(2): 396-402.]
- [2] 蔡锋, 曹超, 周兴华, 等. 中国近海海洋: 海底地形地貌[M]. 北京: 海洋出版社, 2013: 22-23, 177-180. [CAI Feng, CAO Chao, ZHOU Xinghua, et al. China Offshore Oceanography-Topography and Geomorphology[M]. Beijing: China Ocean Press, 2013: 22-23, 177-180.]
- [3] 卢惠泉, 吴承强, 许艳. 闽江口外潮流沙脊群特征与成因[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2014, 34(2): 27-36. [LU Huiquan, WU Chengqiang, XU Yan. Characteristics and origin of the tidal sand ridges off the Minjiang River estuary, southeastern China [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2014, 34(2): 27-36.]
- [4] 刘阿成, 唐建忠, 吴巍, 等. 闽江口外海域晚第四纪地震层序和古河道演变[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(1): 61-73. [LIU A'cheng, TANG Jianzhong, WU Wei, et al. Seismic sequences and evolution of paleo-river channels of late Quaternary off Minjiang River estuary, southeast China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2019, 50(1): 61-73.]
- [5] 刘阿成, 张杰, 唐建忠. 闽江口外海域全新统地震地层学特征和沉积作用[J]. *海洋学报*, 2020, 42(11): 49-61. [LIU A'cheng, ZHANG Jie, TANG Jianzhong. Characteristics of seismic stratigraphy and sedimentation of the Holocene off the Minjiang River estuary, southeast China [J]. *Haiyang Xuebao*, 2020, 42(11): 49-61.]
- [6] 刘阿成, 张杰, 唐建忠. 闽江口外海域MIS5和MIS3的地震地层学特征和古环境[J]. *应用海洋学学报*, 2022, 41(1): 109-119. [LIU A'cheng, ZHANG Jie, TANG Jianzhong. Characteristics of seismic stratigraphy and paleoenvironment during MIS 5 and MIS 3 off the Minjiang Estuary, Southeast China [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2022, 41(1): 109-119.]
- [7] 陈承惠, 蓝东兆, 于永芬, 等. 台湾海峡西部海域晚第四纪地层[J]. *第四纪研究*, 1990(4): 301-307. [CHEN Chenghui, LAN Dongzhao, YU Yongfen, et al. Late quaternary stratigraphy in the western Taiwan Strait [J]. *Quaternary Sciences*, 1990(4): 301-307.]
- [8] Liu J P, Xu K H, Li A C, et al. Flux and fate of Yangtze River sediment delivered to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85(3-4): 208-224.
- [9] 许江, 赵绍华, 李海东, 等. 闽南海岸带浅层地震层序特征[J]. *地球物理学进展*, 2011, 26(2): 498-504. [XU Jiang, ZHAO Shaohua, LI Haidong, et al. Characteristics of Min-nan offshore shallow seismic sequence [J]. *Progress in Geophysics*, 2011, 26(2): 498-504.]
- [10] 杜文波, 黄文凯, 朱红涛, 等. 台湾海峡西部海域沉积体系、地层架构与油气勘探前景[J]. *中国地质*, 2020, 47(5): 1542-1553. [DU Wenbo, HUANG Wenkai, ZHU Hongtao, et al. Sedimentary system, stratigraphic architecture and petroleum exploration prospect in the western Taiwan Strait [J]. *Geology in China*, 2020, 47(5): 1542-1553.]
- [11] 彭学超, 姚伯初. 台湾海峡西部地震地层分析[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1993, 13(2): 49-63. [PENG Xuechao, YAO Bochu. Seismic stratigraphic analysis of the western Taiwan Strait [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1993, 13(2): 49-63.]
- [12] 周勤佳, 吴自银, 马胜中, 等. 台湾海峡晚更新世以来的高分辨率地震地层学研究[J]. *海洋学报*, 2016, 38(9): 76-88. [ZHOU Mengjia, WU Ziyin, MA Shengzhong, et al. High resolution seismic stratigraphy research in the Taiwan Strait since late Pleistocene [J]. *Haiyang Xuebao*, 2016, 38(9): 76-88.]
- [13] 吴自银, 温珍河. 中国东部海域海底地貌图[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [WU Zhiyin, WEN Zhenhe. Submarine geomorphologic map of Eastern China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2019.]
- [14] 吴自银, 温珍河. 中国东部海域海底沉积物类型图[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [WU Zhiyin, WEN Zhenhe. Submarine sediment type map of Eastern China Seas[M]. Beijing: Science Press, 2019.]
- [15] 曾成开, 朱永其, 王秀昌. 台湾海峡的底质类型与沉积分区[J]. *台湾海峡*, 1982, 1(1): 54-61. [ZENG Chengkai, ZHU Yongqi, WANG Xiuchang. Bottom material types and sedimentation districts in Taiwan Strait [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1982, 1(1): 54-61.]
- [16] 《中国海湾志》编纂委员会. 中国海湾志: 第八分册: 福建省南部海湾[M]. 北京: 海洋出版社, 1993: 1-74. [Compiling Commission of

- Chinese Bays Annals. Chinese Bays Annals: Volume Eight: Bays of southern Fujian Province [M]. Beijing: China Ocean Press, 1993: 1-74.]
- [17] Tang C, Zhou D, Endler R, et al. Sedimentary development of the Pearl River Estuary based on seismic stratigraphy [J]. *Journal of Marine Systems*, 2010, 82 (S1): S3-S16.
- [18] 刘阿成, 陆琦, 吴巍. 南黄海太阳沙西侧海域晚第四系地震层序和沉积环境演变[J]. *海洋学研究*, 2017, 35 (2): 11-22. [LIU A'cheng, LU Qi, WU Wei. Seismic sequences and sedimentary environment evolution of Late Quaternary west of Taiyangsha Ridge in the South Yellow Sea [J]. *Journal of Marine Sciences*, 2017, 35 (2): 11-22.]
- [19] 曾从盛. 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, 1997, 13 (4): 94-101. [ZENG Congsheng. Transgressions and sea level changes along the northeast coast of Fujian during the Late Quaternary [J]. *Journal of Fujian Teachers University: Natural Science*, 1997, 13 (4): 94-101.]
- [20] 徐家声. 黄海晚更新统表层与全新统底层的沉积相及其界面特征[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 1989, 9 (1): 53-62. [XU Jiasheng. Characteristics of stratigraphic boundary between Late Pleistocene and early Holocene serieses and their sedimentary facies in the Yellow Sea [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 1989, 9 (1): 53-62.]
- [21] 王雨灼. 福建省第四纪地层的划分[J]. 福建地质, 1990, 9 (4): 289-306. [WANG Yuzhuo. The classification of quaternary strata in Fujian Province [J]. *Geology of Fujian*, 1990, 9 (4): 289-306.]
- [22] 王律江, 鲁一江, 钱建兴, 等. 南海北部晚第四纪同位素地层学及历史[C]//南海晚第四纪古海洋学研究. 青岛: 青岛海洋大学出版社, 1992: 11-22. [WANG Lvjiang, LU Yijiang, QIAN Jianxing et al. Late Quaternary oxygen isotope stratigraphy and sedimentation history of the northern South China Sea [C]//Contributions to late Quaternary paleoceanography of the South China Sea. Qingdao: Qingdao Ocean University Press, 1992: 11-22.]
- [23] 夏东兴, 刘振夏. 潮流脊的形成机制和发育条件[J]. 海洋学报, 1984, 6 (3): 361-367. [XIA Dongxing, LIU Zhenxia. Formation mechanism and development conditions of tidal sand ridges [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1984, 6 (3): 361-367.]
- [24] Dyer K R, Huntley D A. The origin, classification and modelling of sand banks and ridges [J]. *Continental Shelf Research*, 1999, 19 (10): 1285-1330.
- [25] Houbolt J J H C. Recent sediments in the Southern Bight of the North Sea [J]. *Geologie en Mijnbouw*, 1968, 47 (4): 245-273.
- [26] Caston V N D. Linaer sand banks in the southern North Sea [J]. *Sedimentology*, 1972, 18 (1-2): 63-78.
- [27] Kenyon N H, Belderson R H, Stride A H, et al. Offshore tidal sand-banks as indicators of net sand transport and as potential deposits[M]//Nio S D, Shüttenhelm R T E, Van Weering T C E. Holocene Marine Sedimentation in the North Sea Basin. Oxford: Blackwell Scientific Pub., 1981: 257-268.
- [28] Huthnance J M. On one mechanism forming linear sand banks [J]. *Estarine, Coastal and Shelf Science*, 1982, 14 (1): 79-99.
- [29] 印萍. 东海陆架冰后期潮流沙脊地貌与内部结构特征[J]. *海洋科学进展*, 2003, 21 (2): 181-187. [YIN Ping. Geomorphology and internal structure of postglacial tidal sand ridges on the East China Sea shelf [J]. *Advances in Marine Science*, 2003, 21 (2): 181-187.]
- [30] 刘振夏, 余华, 熊应乾, 等. 东海和凯尔特海潮流沙脊的对比研究[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23 (1): 35-42. [LIU Zhenxia, YU Hua, XIONG Yingqian, et al. A comparative study on tidal sand ridges in the East China Sea and Celtic Sea [J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23 (1): 35-42.]
- [31] 吴白银, 金翔龙, 李家彪, 等. 东海外陆架线状沙脊群[J]. 科学通报, 2006, 51 (1): 93-103. [WU Ziyin, JIN Xianglong, LI Jiabiao, et al. Linear sand ridges on the outer shelf of the East China Sea [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51 (1): 93-103.]
- [32] 吴白银, 金翔龙, 曹振铁, 等. 东海陆架沙脊分布及其形成演化[J]. 中国科学:地球科学, 2010, 53 (1): 101-112. [WU Ziyin, JIN Xianglong, CAO Zhenyi, et al. Distribution, formation and evolution of sand ridges on the East China Sea shelf [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2010, 53 (1): 101-112.]
- [33] 王颖. 黄海陆架辐射沙脊群[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002: 8-9. [WANG Ying. Radiative Sandy Ridge Field on Continental Shelf of the Yellow Sea [M]. Beijing: China Environment Press, 2002: 8-9.]
- [34] Simarro G, Guillén J, Puig P, et al. Sediment dynamics over sand ridges on a tideless mid-outer continental shelf [J]. *Marine Geology*, 2015, 361: 25-40.
- [35] 蔡爱智, 石谦. 台湾海峡成因初探[M]. 厦门: 厦门大学出版社, 2009: 20-22. [CAI Aizhi, SHI Qian. Preliminary Inquiring into Formation Causes of Taiwan Strait [M]. Xiamen: Xiamen University Press, 2009: 20-22.]
- [36] 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.]
- [37] 王鹏, 贾凯, 吴建政, 等. 渤海沙脊和沙席分布及与M₂潮流的关系[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2015, 35 (2): 23-32. [WANG Peng, JIA Kai, WU Jianzheng, et al. Distribution pattern of sand ridges and sand sheets in Bohai Sea and the relationship with M₂ tidal current [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35 (2): 23-32.]
- [38] 陈新忠. 台湾海峡及其两岸沿海的潮流[J]. 海洋通报, 1983, 2 (2): 16-24. [CHEN Xinzong. On the distribution of the tidal currents in the Taiwan Strait [J]. *Marine Science Bulletin*, 1983, 2 (2): 16-24.]
- [39] 吴頔, 王勇智, 孙永根. 台湾海峡M₂分潮潮流特征分布及机制研究[J]. *应用海洋学报*, 2020, 39 (4): 460-468. [WU Di, WANG Yongzhi, SUN Yonggen. Distribution and mechanism of M₂ tide and tidal current in Taiwan Strait [J]. *Journal of Applied Oceanography*, 2020, 39 (4): 460-468.]