陈俊兵,刘龙龙,吴振,等. 杭州湾舟山群岛海域晚第四纪声学地层[J]. 海洋地质前沿, 2021, 37(12): 49-57.

# 杭州湾舟山群岛海域晚第四纪声学地层

陈俊兵<sup>1</sup>,刘龙龙<sup>2</sup>,吴振<sup>3</sup>,唐松华<sup>4</sup>,刘荣波<sup>3\*</sup>,张现霞<sup>5</sup>,张胜江<sup>2</sup>

(1浙江省水文地质工程地质大队,浙江宁波315000;2中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心,山东烟台264004;3山东省第四地质矿产勘查院,山东潍坊261021;4中石化海洋石油工程有限公司,上海200120;5山大华特卧龙学校,山东临沂276000)

摘 要:利用在舟山群岛海域采集的高分辨率浅地层剖面和地质浅钻,对研究区晚第四纪地 层结构进行了划分。根据界面识别标志,共划分出5个地震反射界面(T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>5</sub>、T<sub>R</sub>), 将基岩面以上地层划分为5个地震单元(SU1、SU2、SU3、SU4和SU5)。根据浅地层剖 面和地质钻孔对比,结合钻孔沉积相、AMS<sup>14</sup>C和OSL测年数据及古地磁分析结果,5个地震 单元分别对应于 MIS1、MIS2、MIS3、MIS5和中更新世及更早时期沉积。基于此建立了舟 山群岛海域晚第四纪的地层格架,为分析研究区晚第四纪古环境沉积演化和沉积物"源-汇" 过程提供了科学依据。

关键词:杭州湾;晚第四纪;声学地层;地层框架;沉积环境 中图分类号:P714.7 文献标识码:A DOI:10.16028/j.1009-2722.2021.190

# 0 引言

河口湾是现代海岸带地区一种常见的沉积环境,自20世纪90年代以来,国内外学者对河口湾及其沉积相的研究取得了重大的进展<sup>[1-3]</sup>,河口湾沉积作为下切河谷充填体系中重要的组成部分,对它的研究有助于理解海陆沉积序列的层序地层学划分和成因,同时,河口湾的发育极易受到海平面、气候、物源供给和人类活动的影响,对其沉积过程及其产物的深入研究又可反演古海平面、古气候及其相关控制因素的历史变化<sup>[4-6]</sup>。

杭州湾是现代强潮型河口湾,过去几十年,对 钱塘江河口区和杭州湾海区的调查取得了长足的 进展。在沉积动力方面,许多学者开展了杭州湾及 邻近海区流场的实测、潮汐潮流场和风暴潮三维数 值模拟、泥沙运移和冲淤变化规律与机制的调查分 析<sup>[7-8]</sup>,基本查明了杭州湾及邻近海区的现代动力过

收稿日期: 2021-07-16

程和沉积特征。研究表明,杭州湾海区沉积物主要 来自长江,钱塘江和周边河流的贡献为次要。此外, 自 20 世纪 90 年代以来,我国学者对末次冰期以来 钱塘江下切河谷充填序列和分布模式的研究总体 上达到了国际同类研究的先进水平<sup>[9-15]</sup>,取得了一 批重要的成果。

尽管钱塘江河口湾的地质研究取得了重要进 展和成果,但仍存在一定的不足,表现在以往对钱 塘江的研究主要集中在钱塘江河口区及其附近陆 上平原区,对杭州湾更长时间尺度的发育演化及其 沉积地层时空分布特征的精细化研究不够。以往 的研究主要依赖于工程地质钻孔,没有利用高分辨 率的浅地层剖面进行地层分布的追踪和限定。本 文利用最近在杭州湾舟山群岛海域获取的2800 km 高分辨率浅地层剖面资料,结合地质钻孔数据,划 分研究区第四纪声学地层,揭示第四纪以来的沉积 环境演化,研究成果有助于精细解译杭州湾地区海陆 相互作用过程和全球变化的区域响应具有重要的 科学意义。

## 1 区域背景

研究区位于杭州湾以东长江口以南的浙江省 舟山群岛海域,北至西马鞍山岛、衢山岛,南至六横

资助项目:中国地质调查项目"浙江舟山市等6幅1:5万综合地质调查" (DD20211586);山东省地矿局海岸带地质环境保护重点实验室2021年 度开放基金项目

作者简介: 陈俊兵(1971-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事海洋地质调查方面的研究工作. E-mail; chen3791@126.com

<sup>\*</sup> 通讯作者: 刘荣波(1986--), 男, 硕士, 工程师, 主要从事水工环地质调 查方面的研究工作. E-mail: 330725965@qq.com

岛(图 1)。研究区内的岛屿众多,有舟山群岛、朱家 尖、桃花岛、六横岛等岛屿。研究区受地质构造影 响强烈,其主要位于浙闽沿海燕山期火山活动带的 北段,温州-镇海 NNE 向大断裂在本海域延伸,昌华-定海 EW 向断裂位于舟山群岛以北,龙泉-宁波断裂 斜贯舟山本岛<sup>[16]</sup>。区内新近纪沿海及海岛地区全 面隆起,处于剥蚀、侵蚀构造环境。进入第四纪,气 候明显变冷,早更新世浙江沿海及海岛地区仍处于 上升阶段,遭受构造侵蚀,形成了低山丘陵地貌。 流入区内的河流主要有长江、钱塘江。其中,钱塘 江平均年径流量 404 亿 m<sup>3</sup>,是浙江省第1 大河流<sup>[17]</sup>。

# 2 资料与方法

浙江省水文地质工程地质大队于 2014 和 2015 年在舟山群岛海域采集了 1 700 km 的高分辨率浅







地层剖面测线。2021年,中国地质调查局烟台海岸 带地质调查中心在本海域开展了1100km的浅地 层剖面测量(图1)。数据采集使用的仪器为英国应 用声学公司生产的AAE型电火花浅地层剖面仪, 震源控制为CSP-D(50~2400J),水下声源Squid 2000,水听器为20单元组合检波水听器,频率响应 145~7000 Hz,探测地层垂向分辨率>0.5 m。

浅地层剖面测量采用拖曳式数字浅地层剖面 系统进行作业,水听器在船尾右舷用支架向外撑出, 电火花放电系统拖曳于船尾左侧,分别距离船尾 30 m,水听器与电火花震源间距 5 m。测量按照试 验确定的参数进行,采用的激发能量为 750 J,激发 间隔 800 ms,带通滤波 100~5 000 Hz,延迟为 0;海 底追踪根据反射信号的强弱适时调整。数据记录 数据格式为 SGY,打印量程 200 ms。测量过程中每 隔 500 m 与定位点同步打 Mark 线。每一主测线和 联络测线的交点打 Mark 线,并在打印剖面和班报 上注明所交测线和点号。

浅地层剖面解译遵循地震地层学和层序地层 学原理,根据研究区内已有地质钻孔揭示的主要地 层单元厚度,结合地震剖面的界面识别标志(上超、 下超、顶超和削截等)和地震反射特征,对研究区内 所有的剖面进行地层划分、对比,最终使所有测线 闭合<sup>[18-19]</sup>。为计算沉积地层厚度,对海底以下剖面 采用的平均速率为1550 m/s。 同时,本文收集了研究区已有的2口地质钻孔 DZ1 孔和 DZ2 孔<sup>[20-21]</sup>,通过与浅地层剖面的对比, 利用钻孔的 AMS<sup>14</sup>C、光释光(OSL)测年数据及古 地磁测试数据,划分了研究区沉积序列,确定了地 层沉积年代。

# 3 结果与讨论

#### 3.1 反射界面识别

本次获得的浅地层剖面可揭示海底面以下约 <80 m 的沉积地层以及基岩面的分布特征。因大 范围浅层气的存在, 地震发射特征表现为大面积的 声学空白, 即上部连续的强反射界面屏蔽了下部地 层的地震信号而形成了大片屏蔽区, 其存在切断了 地层连续性, 对浅地层剖面解译带来一定的难 度<sup>[22]</sup>。另外, 浅地层剖面上二次反射波的存在也给 解译带了一定困难。

将浅地层剖面与过孔剖面进行地层对比和年 代划分,根据地震反射波的振幅、频率、连续性及接 触关系等,选取区内具有一定地质意义的特征反射 波进行区域追踪、对比、闭合及解释,在本区追踪解 释了5个地震反射界面,分别命名为T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>、T<sub>5</sub>、 T<sub>R</sub>(图 2~4)。



剖面位置见图 1 图 2 研究区 NS 向典型剖面 Fig.2 A typical profile in north-south direction



剖面位置见图 1图 3 研究区 EW 向典型剖面





剖面位置见图 1 图 4 研究区过 DZ2 孔剖面 Fig.4 A typical profile through the core DZ2

# (1) T<sub>0</sub> 界面反射特征

为海底反射界面,即地层与海水的分界面,随 海底地形起伏而变化,以高能量、高振幅、高连续性 为特征。

(2) T<sub>1</sub> 界面反射特征

该界面是冰后期海平面上升过程中形成的初

次海泛面,为区域性海侵面,是一个高连续的界面, 中强振幅,全区内可进行连续追踪。该界面在浅地 层剖面上反映十分明显,它将反射结构和特征截然 不同的2套地层分开,与下伏地层呈不整合接触。 该界面上保留明显的侵蚀痕迹和很强的反射特征, 表明该界面形成时,有较长时期的沉积间断。该界 面分布广泛,全区可对比,为区域反射标志层。在 舟山海域一般埋深在 5~25 m,局部区域可达 40~50 m(图 5)。

(3) T<sub>2</sub> 界面反射特征

该界面是一个高振幅的侵蚀面,呈 V 或 U 形 的河谷状界面下切到下伏地层之中(图 2)。与其他 地震界面相比,该界面显得更加高低不平,在侧向 上也更加不连续。在浅地层剖面上,部分下切谷反 映明显,界面上下地层特征与反射结构大不相同。

该界面在工作区域局部可见,下切谷的深度和 宽度变化很大,大的主干下切谷大多深 10~40 m (最大深度 60 m)、宽 4~9 km,小一中等规模的主 干下切谷一般深 8~24 m、宽 1~4 km。下切谷的 宽/深比一般>50,表明这些下切谷以床载搬运的方 式输运沉积物,且搬运能力有限。

(4)T<sub>3</sub>界面反射特征 该界面是一个相对平滑的切割下伏地层的侵 蚀层,该反射界面振幅中等,连续性较好,常因 T2 界面的下切而不连续,起伏较小。该界面分布相对 较广泛,在舟山海域一般埋深为 35~50 m。

(5) T<sub>5</sub> 界面反射特征

该界面反射清晰,大部分区段具有高振幅、强 反射特征,界面连续性良好,略有起伏,为区域不整 合界面。在舟山海域,该界面埋深变化比较大,为 10~80 m,一般埋深为 40~75 m(图 5)。

(6) T<sub>R</sub>界面反射特征

该界面为基岩界面,由于基岩与松散沉积物之间的声阻抗系数较大,基岩面在浅地层剖面上表现为一套强相位的地震发射界面,具有界面深度起伏大,连续性差等特征,在浅地层剖面上,很容易追踪解释该强声学反射界面。在基底隆起区域清晰可辨,在基底凹陷区域因其深度较大不能追踪,界面以下基本无有效反射层信号。在舟山海域,基岩埋深变化幅度较大,为0~160 m,总体上从滨岸向浅



(a)T<sub>1</sub>; (b)T<sub>2</sub>; (c)T<sub>3</sub>; (d)T<sub>5</sub>
 图 5 研究区内各地震反射界面埋深
 Fig.5 The buried depth of each seismic reflection in the study area

海区变深,在各个海岛的周围埋深变浅(图 6)。

#### 3.2 地震单元划分及其钻孔对比

在地震反射剖面的上部(双程反射时间约 <110 ms),地震反射界面将地层划分为5个地震单 元,从上至下依次命名为SU1、SU2、SU3、SU4 和SU5。

3.2.1 地震单元 SU1

该单元位于反射界面 T<sub>0</sub>和 T<sub>1</sub>之间,是海底面 以下最新的沉积地层。SU1 呈中等振幅、高频率、 连续性好的水平状的反射结构,局部可见反射层下 超至 T<sub>1</sub> 界面的楔形沉积,与其下层序截然不同。

SU1 沉积厚度一般为 5~25 m,最大厚度可达 50 m(图 6)。在六横北部、舟山本岛东北部、鱼山 西侧和洋山岛南部等区域厚度最大,总体表现为由 陆向海逐渐变厚,岛间、潮流通道有减薄趋势。舟 山本岛以北区域浅层气发育,大部分浅地层剖面被 浅层气气泡效应带所掩盖。

DZ2 孔岩芯揭示该单元上部为一套灰黄色淤泥 质粉质黏土,流塑,中部为灰色淤泥质粉质黏土,局 部夹有粉砂薄层(2~5 mm)、团块和透镜体(0.5~ 2 cm),含少量贝壳碎屑,流塑;下部灰色淤泥质粉 质黏土,厚层状,夹粉砂透镜体或厚层(约1 cm),常 见有机质斑块或条带。钻孔岩芯沉积物 3.5 m 和 10.3 m 的 AMS<sup>14</sup>C 测年年龄分别为 2050 ± 30 a 和 9750 ± 30 a,底部 13.2 m 的测年年龄为 10 790 ± 40 a。DZ1 孔中该单元内有 4 个 AMS<sup>14</sup>C 测年数据, 从 4 760 ±30 a 至 6940 ± 40 a,因此,SU1 单元被 解释为冰后期以来形成的滨浅海相沉积,对应于氧 同位素一期(MIS 1)沉积。

3.2.2 地震单元 SU 2

该单元位于T<sub>1</sub>与T<sub>2</sub>界面之间。与下伏单元呈



(a)SU1;(b)SU2;(c)SU3;(d)基岩埋深

图 6 研究区内各地震单元厚度和基岩埋深

Fig.6 Maps of thickness of seismic units and buried depths of bedrock surface in the study area

不整合接触关系。其底界面是一个高振幅的侵蚀 面,呈V或U形的河谷状界面下切到下伏地层之 中。单元内部为杂乱状、斜交进积、亚平行等多种 发射结构。外部形态常呈河道充填或沟谷充填模 式。具有较高的频率,振幅强弱交替。该单元的反 射以斜交方式向上终止于T<sub>1</sub>不整合面上,向下以 较高的角度削截下伏层序,与下伏单元SU3呈不 整合接触。该层序在舟山海域零星分布,厚度变化 大(2~32m),连续性差,在横向上出现中断(图 5)。

根据 DZ2 钻孔资料, 单元上部主要是粉质黏土, 中部主要是粉质黏土夹粉砂, 下部主要为粉砂、细 沙和粗砂, 从上往下慢慢变粗的趋势。层序 II 顶部 常见黄褐色 Fe、Mn 质斑块, 偶见黑褐色有机质斑 块, 表明曾经出露地表遭受氧化。根据钻孔沉积相 以及研究区的沉积序列<sup>[23-25]</sup>, 推断该单元为 MIS 2 时形成的河流湖沼相沉积。

3.2.3 地震单元 SU 3

该单元位于 T<sub>2</sub> 与 T<sub>3</sub> 之间。该单元底界面相对 较为平坦,略有起伏,有时表现为波状反射表面,经 常被 T<sub>2</sub> 界面切割。层序内部为水平、倾斜-低角度 和杂乱反射等结构,以近水平状沉积层为主。其杂 乱反射一般显示与下伏地震单元呈渐变式的接触 关系,这与河道底部侵蚀面所表现出的向下深切、 突变式的侵蚀面不同。由于上覆下切谷的侵蚀,这 一层序在厚度上不规则,局部<5 m;当上覆的下切 谷不存在或较弱时,该单元的厚度大多为 10~30 m (图 6)。

根据 DZ2 孔,该单元底部是 2.8 m 厚的灰色细 砂层,砂质均匀,分选良好;在这之上是厚层状灰色 黏土质粉砂;上部为灰色粉砂质黏土,厚层状,局部 夹粉砂薄层或团块,局部见黑褐色植物碳化碎屑, 偶见灰白色钙质结核。该单元粒度整体呈下粗上细 的正向沉积韵律。DZ1 孔中该单元内的光释光测 年年龄为 30.3±2.4 ka<sup>[21]</sup>,因此推测该单元为 MIS 3 时形成的滨浅海相沉积。

3.2.4 地震单元 SU 4

该单元位于  $T_3 与 T_5 之间, 其内部呈近似水平$ 状平行结构, 连续性良好, 频率相对较低, 反射强度中等, 厚度为 20~40 m。该单元底界面连续性良好,略有起伏, 深度为 10~80 m, 向离岸方向加深。

根据 DZ2 孔,该单元下部是灰色粉砂质黏土, 厚层状,偶夹黑褐色有机质碎屑;上部是灰黄色灰 绿色粉砂质黏土,见较多褐黄色 Fe、Mn 质斑块,向 下粉质含量略有升高,偶见砾石夹于其中,粒径 2~ 10 mm。该单元层为缺少年龄控制,但在 DZ1 孔中 该单元下部地层中沉积物光释光测年年龄为 134.8 ± 11.8 ka, SU 4 被解释为氧同位素 5 期(MIS 5)时形 成的滨海相沉积<sup>[26-27]</sup>。

3.2.5 地震单元 SU 5

该单元位于 T<sub>5</sub> 界面以下, 基岩面 T<sub>R</sub>之上, 主要呈现为平行亚平行反射以及杂乱-波状反射, 地层厚度变化较大, 受基岩面的影响, 局部该层缺失, 基岩面埋深较大区域, 该层厚度明显变大。根据 DZ1 孔中光释光测年数据和古地磁分析结果, 该单元被解释为形成于中更新世以及更早时期<sup>[21]</sup>。

#### 3.3 沉积环境演化

浙江省岛屿地区自新生代开始,地质构造发育主要受新构造运动控制。古近纪沿海及海岛地区全面 隆起,处于剥蚀、侵蚀构造环境。第四纪时期,气候 冷暖变化频繁,在周期性气候冷暖波动和海平面升 降作用影响下,研究区经历了复杂的沉积环境演化。 3.3.1 中更新世阶段

相对早更新世,中更新世新构造活动减弱,低 山丘陵仍处于风化剥蚀、河流侵蚀阶段,河流沿袭 了早更新世的河道,并向源头上溯,此期间古河道 进入发育鼎盛期。以往资料表明,中更新世期间降 水较少,侵蚀基准面非常低,舟山群岛区域表现为 暂时性流水的沟谷,仅在较大的沟谷下游,堆积了 一套厚度不大的松散物,以坡洪积、冲洪积和残积 为代表,绝大部分山区则以基岩裸露,规模性的海 侵活动尚未开始<sup>[28]</sup>,舟山群岛区域以河流湖泊相沉 积为主。

3.3.2 晚更新世阶段

进入晚更新世,构造运动引起的地壳升降速度 远小于海平面升降速度,对舟山群岛海域沉积起主 要控制作用的是古地形、海平面升降及沉积物供应 量的变化等。晚更新世早期,气候转暖,海平面上 升速度快、幅度大,最大高度超过现今海平面5~6m, 舟山群岛海域被海水淹没,原来低海面形成的河床 相沉积逐渐发育成滨海相沉积,即 MIS 5 沉积,在 岛屿附近仍以坡积或洪积沉积物为主。

海侵鼎盛期后,进入 MIS 4,气温下降,降水量 减少,海平面逐渐下降,直至低于现今海平面约 80 m, 舟山群岛海域全部裸露,因 MIS 4 持续时间较短, 局部形成河流湖泊相沉积,后期又遭受侵蚀,致使 研究区内 MIS 4 沉积缺失。

随后海平面开始回升,进入 MIS 3, 舟山群岛海

域经历了一次较大的海侵,海水再次淹没研究区, 发育滨浅海相沉积,形成 SU 3 地震单元,受后期强 烈侵蚀作用, SU 3 单元分布不连续。

海侵后期,随着全球气候开始变冷,海平面逐渐下降,最低降至约-120m,舟山群岛地区暴露成陆,沉积环境发生改变,河流发育,侵蚀下伏地层, 形成河流湖泊相沉积,分布不连续。在 MIS 2 期间, 东部海域普遍发育第一硬黏土标志层,但在舟山群 岛海域缺失。

#### 3.3.3 全新世阶段

晚更新世末冰期结束,气候迅速转暖,海平面 开始急剧上升,舟山群岛海域开始了大规模的海侵。 全新世早期,气候转为温暖潮湿,舟山地区与大陆 分隔形成群岛。近岛沟谷地区由于海水顶托,溯源 堆积形成河谷充填沉积,部分切割较深的沟谷形成 溺谷沉积。全新世中期,海平面达到最高,海水作 用强烈,在舟山基岩海岸地区形成陡崖和海蚀地貌, 海域和平原区位于低潮线之下,接受海水带来的丰 富泥沙沉积<sup>[29-30]</sup>。全新世晚期气候类似于当今,海 平面波动趋于平稳,一些湖泊和沼泽演化为陆地, 山间沟谷形成间歇性河流沉积,但绝大部分舟山区 域仍为滨浅海环境。

### 4 结论

(1)利用浅地层剖面数据,结合钻孔沉积相和 测年数据,在舟山群岛区域追踪解释了5个地层反 射界面,这些界面将测区海底与基岩之间的地层划 分为5个地震单元,分别对应于MIS1、MIS2、 MIS3、MIS5和中更新世及早期沉积。

(2) 舟山地区中更新世以河流相沉积为主, 晚更新世以来大致经历了3次明显的海侵:晚更 新世晚期2次海侵和全新世1次海侵,地层海相性 明显。

(3)研究区内全新统地层厚度主要在 5~25 m 之间,大致呈由陆向海、自河口向陆架逐渐变薄的 趋势。MIS 2 地层与下伏地层呈不整合接触,层厚 变化范围为 4~32 m,连续性差,在横向上出现中断。 由于上覆下切谷的侵蚀, MIS 3 沉积在厚度上不规 则,局部<5 m;当上覆的下切谷不存在或较弱时, 该单元的厚度大多为 10~35 m。MIS 5 沉积主要 厚度为 20~40 m,其内部呈似水平状平行结构,连 续性良好。

#### 参考文献:

- 彭杰,杨小强,强小科,等.钱塘江河口周边钻孔磁性地层学研究及意义[J].地球物理学报,2016,59(8):2949-2964.
- [2] 崔征科,杨文达.东海陆架晚第四纪层序地层及其沉积环境[J]. 海洋地质与第四纪地质,2014,34(4):1-10.
- [3] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2008: 305-358.
- [4] LIN C M, LI G Y, WANG B C, et al. Internal structure of the incised valley fill in the Hangzhou Bay, Eastern China and its geological implications [J]. Acta Geologica Sinica, 2004, 78(3): 715-719.
- [5] LIN C M, ZHUO H C, GAO S. Sedimentary facies and evolution in the Qiantang River incised valley, eastern China [J]. Marine Geology, 2005, 219(4): 235-259.
- [6] 刘演,李茂田,孙千里,等.中全新世以来杭州湾古气候、环境 变迁及对良渚文化的可能影响[J].湖泊科学,2014,26(2):322-330.
- [7] 王华强,高抒.杭州湾北岸高潮滩沉积与沿岸物质输运趋势[J]. 海洋地质与第四纪地质,2007,27(6):25-30.
- [8] 刘莹,张卫国,杨世伦,等.杭州湾北岸芦潮港潮滩沉积物磁性 特征的年际变化及其粒度控制[J].沉积学报,2012,30(3):547-555.
- [9] 李艳丽.晚第四纪以来钱塘江下切河谷充填物特征及古环境演 化[D].南京:南京大学,2010.
- [10] 张桂甲,李从先.钱塘江下切河谷充填及其层序地层学特征[J].海洋地质与第四纪地质,1995,15(4):56-67.
- [11] 张桂甲,李从先.晚第四纪钱塘江下切河谷体系层序地层特征[J].同济大学学报,1998,26(3):320-324.
- [12] 陈忠大,覃兆松,梁河,等. 杭嘉湖平原第四纪地层高精度对 比方法研究[J]. 中国地质, 2002, 8: 275-280.
- [13] 丛新,赵龙伟.中国海岸带地区第四纪沉积环境变迁研究现 状综述[J].上海国土资源,2017,38(4):80-85.
- [14] 顾明光. 钱塘江北岸晚第四纪沉积与古环境演变[J]. 中国地 质, 2009, 36(2): 378-386.
- [15] 林春明,黄志城,朱嗣昭,等.杭州湾沿岸平原晚第四纪沉积 特征和沉积过程[J].地质学报,1999,73(2):120-130.
- [16] 李志宏,张坷.浙江地区新生代地貌基本演化特征[D].广州: 中山大学,2004.
- [17] 刘苍字, 董永发. 杭州湾的沉积构造与沉积环境分析[J]. 海洋 地质与第四纪地质, 1990, 10(4): 53-65.
- [18] 颜中辉, 王小杰, 刘媛媛, 等. 东海多次波压制的关键技术[J]. 海洋地质前沿, 2020, 36(7): 64-72.
- [19] 杨云帆,韩宗珠,孔祥淮,等.山东半岛南部近岸海域新近系以来地震层序及沉积特征[J].海洋地质前沿,2020,35(5):34-42.
- [20] 陈俊兵, 董超, 周宇渤, 等. 长江三角洲海岸带综合地质调查 与监测[R]. 宁波: 浙江省水文地质工程地质大队, 2016.
- [21] YI L, YE X Y, CHEN J B, et al. Magnetostratigraphy and luminescence dating on a sedimentary sequence from northern East China Sea: constraints on evolutionary history of eastern marginal seas of China since the Early Pleistocene[J]. Quaternary International, 2014, 349; 316-326.
- [22] LIN C M, LI G Y, ZHUO H C, et al. Features and sealing mech-

anism of shallow biogenic gas in incised valley fills (the Qiantang River, eastern China): a case study[J]. Marine and Petroleum Geology, 2010, 27(4): 909-922.

- [23] 林春明. 杭州湾地区15 000 a 以来层序地层学初步研究[J].
  地质论评, 1997, 43(3): 273-280.
- [24] 骆丁. 浙江宁波地区第四系特征及岩相古地理研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2011.
- [25] 潘峰,林春明,李艳丽,等. 钱塘江南岸 SE2 孔晚第四纪以来 沉积物粒度特征及环境演化[J]. 古地理学报, 2011, 13(2): 236-244.
- [26] 王建华,周洋,郑卓,等.杭州湾晚第四纪沉积与古环境演变[J]. 古地理学报,2006,8(4):551-558.
- [27] 王宗涛. 浙江北仑港地区的第四纪海相地层及其古地理意 义[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1986, 6(1): 43-52.
- [28] 林钟扬. 杭州湾更新世以来沉积环境演变及其三维地震结构 建模[D]. 武汉: 中国地质大学, 2019.
- [29] 严钦尚,黄山. 杭嘉湖平原全新世沉积环境的演变[J]. 地理学报, 1987, 42(1): 1-15.
- [30] 章云霞,叶玮,马春梅,等.浙江北湖桥孔色度记录的早-中全 新世环境变化[J].第四纪研究,2016,36(5):1331-1342.

# SHALLOW ACOUSTIC STRATIGRAPHY OF THE LATE QUATERNARY IN THE ZHOUSHAN ISLANDS OF HANGZHOU BAY

CHEN Junbing<sup>1</sup>, LIU Longlong<sup>2</sup>, WU Zhen<sup>3</sup>, TANG Songhua<sup>4</sup>, LIU Rongbo<sup>3\*</sup>, ZHANG Xianxia<sup>5</sup>, ZHANG Shengjiang<sup>2</sup>

(1 Zhejiang Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Ningbo 315000, Zhejiang, China; 2 Yantai Coastal Zones Geological Survey, China Geological Survey, Yantai 264004, Shandong, China; 3 No.4 Exploration Institute of Geology and Mineral Resources, Weifang 261021, Shandong, China; 4 Sinopec Offshore Oil Engineering Co. Ltd., Shanghai 200120, China; 5 Shanda Huate Wolong School, Linyi 276000, Shandong, China)

**Abstract:** Based on the high-resolution seismic profiles and borehole data acquired from the Zhoushan Islands, five seismic reflectors, named  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_3$ ,  $T_5$ ,  $T_R$ , are identified and five stratigraphic units, namely SU 1, SU 2, SU 3, SU 4 and SU 5 established for the late Quaternary sequences. Through the correlation between the shallow seismic profiles and the boreholes, combined with the analysis of sedimentary facies, AMS<sup>14</sup>C and OSL dating and paleomagnetic analysis of the cores, we infer that the five seismic units were formed in MIS 1, MIS 2, MIS 3, MIS 5, Middle Pleistocene and earlier sedimentary periods, respectively, and as the results, the stratigraphic framework of the Late Quaternary established in this paper has founded the scientific basis for revealing the sedimentary evolution of Late Quaternary paleoenvironments and the process of "sources to sink" of the sediments.

Key words: Hangzhou Bay; Late Quaternary; shallow acoustic stratigraphy; stratigraphic framework; sedimentary environment