

文章编号: 1000-0550(2014)02-0296-10

长江水下三角洲向南延伸泥质带浅地层结构 及沉积物特征初探^①

——以朱家尖岛以东海域为例

罗光富 邓 兵 杨世伦

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062)

摘 要 文章对取自长江水下三角洲向南延伸带上舟山泥质区边缘的 58 个表层沉积物样品的粒度进行了分析,并且对舟山近岸泥质区进行了浅地层剖面探测。结果显示,该区沉积物以黏土质粉砂为主;含水率较高(平均为 46%),干容重较低(平均为 1.44 g/cm³);孔隙比大,高压缩性,抗剪强度低,因此其抗冲蚀能力较弱。区内地层剖面上部为全新世浅海相沉积,岛礁区及南部剖面可见少量下伏基岩,剖面 I 东部可见浅层气出露,其顶面埋藏深度约为 12 m。全新世以来该区域沉积厚度为 4~23 m,千年时间尺度沉积速率约 0.57~3.29 m/ka,低于长江口门外水下三角洲泥质沉积中心,属弱淤积沉积环境。由于近年流域人类活动导致长江入海泥沙减少,南下沿岸流携带的泥沙可能减少,浙江沿岸面临泥质沉积速率下降或甚至侵蚀的威胁。

关键词 长江水下三角洲 粒度 浅地层剖面 沉积速率

第一作者简介 罗光富 男 1989 年出生 硕士研究生 海洋沉积地球化学 E-mail: 814914543@qq.com

通讯作者 邓 兵 E-mail: dengbing@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P512.2 文献标识码 A

长江水下三角洲向南延伸带上的舟山泥质区,既是长江冲淡水冬季南下的必经之路,也是杭州湾与东海的水体交换主要通道。关于研究区及其所属浙闽沿岸泥质区的浅地层结构和沉积物特征的研究可追溯到二十世纪中叶。Shepard^[1]和 Niino^[2]相继发表了东海表层沉积物分布图,刻画了近岸泥质区的范围,至今仍被广泛引用。管秉贤^[3]根据多年观测结果报道了冬季浙闽沿岸流的强度与结构;随着对东海流场系统认识的深入,秦蕴珊等^[4]提出了冬季浙闽沿岸流与近岸泥质区的成因联系。Milliman^[5]在进行季节对比观测后,提出长江沉积物输送机制为夏季堆积在河口地区,冬季在风浪作用下再悬浮并通过浙闽沿岸流向南输送,在长江口以南近岸形成广泛分布的泥质区。近年来,浅地层剖面技术和同位素测年技术在海洋地层划分^[6]及海洋沉积物定年^[7]工作中的运用,为全面认识地层结构与组成,及其与全球变化的关系奠定了基础。有关舟山群岛海域泥质区边缘的研究已在沉积物类型^[8-9]、分布与成因^[10]、物质来源^[11]及海平面上升与泥质区地层发育的关系^[12]等方面取得了一定认识。然而,在地层结构与组成,以

及物质通量方面的认识却相对缺乏。

东海近岸泥质区包括两个亚区(图 1B),分别为北部的长江口泥质区和南部的浙闽沿岸泥质区^[4],本文研究海区位于长江水下三角洲向南延伸带,处于这两个亚区之间,是两个亚区水体及沉积物交换的重要通道。另外,研究海区岛屿众多,水下冲蚀沟槽较发育,沉积物类型也较复杂多样,相邻钻孔间沉积速率差异很大^[13-15],这都与相邻的泥质沉积中心不同。近年流域人类活动导致长江入海泥沙减少,南下沿岸流携带的泥沙可能减少,浙江沿岸面临泥质沉积速率下降或甚至侵蚀的威胁。因此,需要深入了解研究区的沉积物特性与地层结构的稳定性。本文利用高分辨率浅地层剖面资料,结合采集的表层沉积物样品和前人的钻孔资料,研究舟山泥质区边缘的沉积物特征和底床稳定性以及全新世浅海相地层分布规律,探讨人类活动对近岸沉积环境的影响。

1 研究区域概况

研究区域位于长江口以南的舟山群岛东部海区,西岸为朱家尖岛,向北为白沙岛,东临东海陆架开阔

^①上海市科委海洋科技专项“东海海底观测系统”(编号:10dz1210505)、国家自然科学基金创新群体项目(批准号:41021064)与国家自然科学基金重点项目(批准号:41130856)联合资助
收稿日期:2013-03-15;收修稿日期:2013-06-24

海域 地理坐标为 $29.8505^{\circ} \sim 29.9172^{\circ} \text{N}$, $122.3967^{\circ} \sim 122.5836^{\circ} \text{E}$, 主要受到闽浙沿岸流、长江冲淡水等南下的沿岸水流和外侧台湾暖流高盐水系的影响, 全年的温度、盐度变化较大^[16]。调查区域水深较浅(小于 30 m), 中南部及东南部有岛礁分布。由于该区处于副热带季风区, 风速风向具有明显的季节变化, 冬半年(9~3 月) 偏北风占优势, 以西北风为主; 夏半年(4~8 月) 以偏南风为主。各月平均风速 $5.9 \sim 8.0 \text{ m/s}$ ^[10], 最大风速出现在台风期, 可达 32 m/s ^[17]。季风影响致使南下沿岸流的流向和强弱产生季节性变化。夏半年因东南季风影响, 北上的台湾暖流增强南下沿岸流较弱, 表层水具有偏向东北方向的流势^[16]; 冬半年在冬季风驱动下沿岸流紧靠浙闽海岸南下, 水体浑浊。各月平均波高 $0.3 \sim 0.6 \text{ m}$, 平均周期 $2.8 \sim 4.5 \text{ s}$, 大浪集中在 8~10 月^[10, 17]。该海域的潮汐类型为正规半日潮, 存在日不等现象, 潮流方向为 SSE—NNW,

表层平均流速 1.08 m/s , 底层平均流速 0.78 m/s , 平均潮差 2.61 m , 最大潮差达 4.79 m ^[17-19]。按照 J.L. Davies^[20] 潮差对海岸地貌的分类, 该海区属于中等潮差区。朱家尖岛东北方向为白沙水道, 南北走向, 长约 7 km , 宽约 $1.1 \sim 1.8 \text{ km}$, 水深 25 m 左右, 通行航船、渔船。

2 样品来源及分析方法

2.1 样品采集及浅地层剖面测量

于 2011 年 10 月 19 日至 10 月 31 日期间, 用抓斗式采泥器在舟山泥质区边缘海域内获得 58 个表层沉积物样品, 并将样品保存于洁净自封袋中, 冷藏带回实验室(采样站位如图 1 所示)。另外, 采用浅地层剖面仪 Edgetech512 测量本海区浅地层剖面特征, 共完成测线五条(图 1C), 总长 71 km 。其中东西向断面三条, 由南向北分别为: I24-I1 断面 17 km , E19-

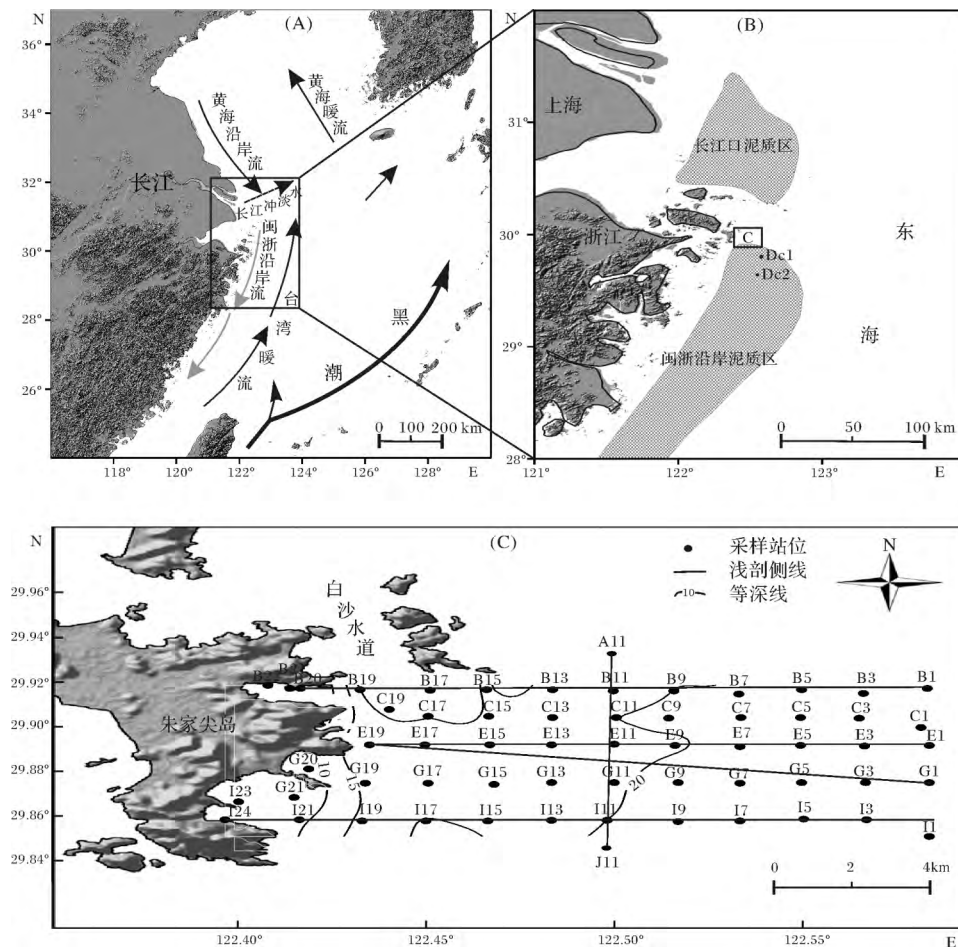


图 1 东海流场分布及采样站位(图 A 修改自 Deng *et al.*, 2006, 黑色实线表示全年存在流场, 灰色实线表示冬季存在流场, 黑色虚线表示夏季存在流场)

Fig.1 Major currents in East China Sea and the sampling stations of the surface sediments (Fig.A modified after Deng *et al.*, 2006, Solid black lines indicate year round currents; solid gray lines indicate winter currents; dashed black lines indicate summer currents)

E1 断面 14 km, B22-B1 断面 17 km; 南东东向断面一条, E19-G1 断面 15 km; 南北向断面一条, A11-J11 断面 8 km。通过地层解释, 以及邻近区域地层对比, 研究本区域底床稳定性以及全新世浅海相地层分布规律。

2.2 表层沉积物分类

对获得的表层沉积物样品采用 Shepard *et al.*^[21] 的沉积物三角分类方法进行分类。在表层沉积物三角图中(图 4) 各个顶点代表某一组分的含量达到 100% (其他两个组分的含量为 0), 命名时将含量低者放在前面, 若某一组分在同另外两个组分的和中的比例(如砾石在砾-泥和砾-砂中的含量) 都小于 25% 时, 则它不参加命名^[21, 22]。

2.3 粒度测定

对采集的 58 个表层沉积物样品先分别用双氧水去除有机质, 再加入分散剂, 然后利用超声波振荡对样品进行分散处理, 最后应用美国库尔特(Coulter) 公司生产的库尔特 LS100Q 型激光粒度仪进行粒度分析。该方法的基本原理是一定粒径的颗粒以一定的角度散射光线, 角度随颗粒直径的降低而增加。单色光平行光束通过样品槽中的悬浮液, 散射光聚焦到检测器, 检测器测量散射光的密度分布, 然后利用弗兰侯夫衍射和梅氏理论进行结果计算及分析, 其粒径测量范围在 0.4~1 000 μm , 可提供高分辨率分析结果^[23]。最后, 使用 McManus^[24] 的矩法参数公式计算沉积物的粒度参数, 即平均粒径、分选系数、偏态、峰态。

3 结果

3.1 浅地层剖面特征

研究区总体底床较为平缓, 南北剖面及东西向各剖面皆未现波浪作用产生的波形。东西向剖面近岸坡降较缓, 水深在 5~30 m 之间, 至东部坡降略大(图 2, 3), 水深为 20~30 m, 而南北向水深变化不大(图 3e)。北部 B 断面在近岸朱家尖岛与白沙岛之间为岛间海槽向南延伸, 海槽宽约 4 km, 水深可达 40 m (图 3a)。在中南部岛礁影响区出现冲蚀凹陷地形(图 3d)。

区内地层剖面上部皆为水平浅海相沉积。水平构造发育, 层理平行于底床, 水平延伸, 为典型的浅海相地层特征。该层厚度大多在 8~12 m 之间, 近岸逐渐减薄, 除最北部 B 断面外, 该层在研究区东部厚度增加到 18~20 m (图 3b, c)。自北向南, 平行于岸线

方向浅海相地层厚度较为稳定(图 3e)。在岛礁区附近, 浅海相地层较薄, 且内部层理构造不发育, 为块状的粉砂或砂质沉积(图 3c)。

浅海相地层与下伏层间为不整合界面, 在浅地层图像中较为清晰, 表明上下地层岩性有较大差异, 界面在中部及南部断面中可见槽状侵蚀结构, 可推断该界面代表末次冰期低海面及海侵淹没前的陆相沉积界限, 这与研究区相关文献¹⁴ C 测年结果相符^[7, 12]。剖面 I 东部可见浅层气出露(图 3c), 其顶面埋藏深度约为 12 m, 岛礁区及南部剖面可见少量下伏基岩(图 3c, d)。

下伏沉积物为沙质沉积层, 研究区东部斜坡处, 可见沙层内倾斜层理及槽状交错层理(图 3b, c), 是河流相沉积或滨海相沙丘沉积。研究区钻孔资料也发现相应的河流相或滨海相沙质沉积层^[12]。其余大部分地区下伏层内没有发现特征沉积构造, 推断为较均一的滨海沙质沉积层, 研究区全新世地层平均厚度在 10 m 左右。

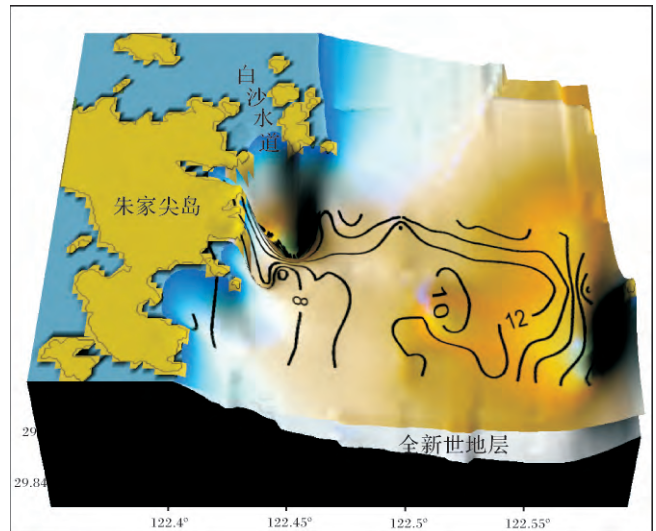


图 2 全新世地层厚度分布图(单位 m)

Fig.2 Isopach map of the Holocene sediment

3.2 表层沉积物组成特征

对获得的表层沉积物样品采用 Shepard 等^[21] 的沉积物三角分类方法进行分类。研究区样品中不含砾石。因此, 沉积物可分为砂、粉砂、黏土、黏土质粉砂、粉砂质砂、砂质粉砂等类型。由测量结果可知, 研究区大部分表层沉积物的主要组成为黏土质粉砂(图 4), 具有较低的干容重(平均 1.44 g/cm^3) (图 5A), 以及较高的含水率(平均 46%) (图 5B), 继承了长江沉积物粒度组成特征^[25, 26]。岛礁附近沉积物相

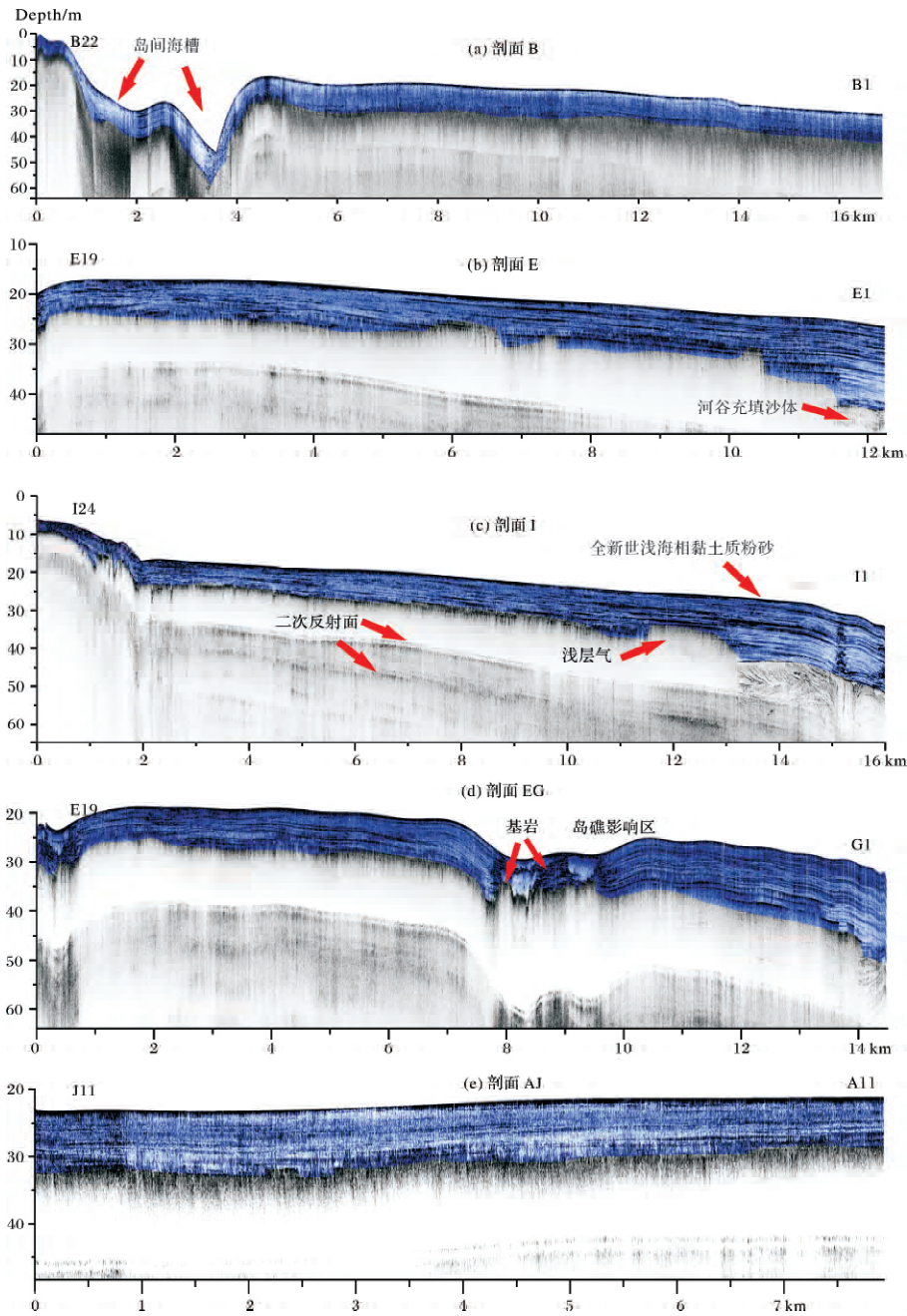


图 3 浅地层剖面 B、E、I、EG、AJ(蓝色为浅海相地层)

Fig.3 CHIRP seismic profiles B , E , I , EG , AJ. (the blue stratum is neritic facies stratum)

对较粗,为含黏土质粉砂沉积,沉积物干容重也相应较高(大约 1.8 g/cm^3) (图 5A),含水率则相应减小(35%左右) (图 5B)。沉积物的干容重围绕岛礁呈东西向长条形分布,与区域内涨落潮流方向基本一致。

表层沉积物的主要三种组份分别为黏土、粉砂和砂。其中,黏土的平均百分含量为 26%,粉砂的平均百分含量为 65%,砂的平均百分含量为 9%,与杭州

湾口北部海区的沉积物组成相似^[27]。黏土组分在研究区域的分布如图 5D 所示,其主要分布在 10%~40%之间,变化范围不大,集中在 20%~30%之间,由海岸向外海方向(由西向东方向)黏土含量有递增趋势。粉砂组分在研究区域的分布如图 5E 所示,粉砂是研究区域中百分含量最大的组分,其主要分布在 32%~80%之间,变化范围较大,大部分处在 60%~70%之间,沿岸部分海域的粉砂含量大于东部外海海

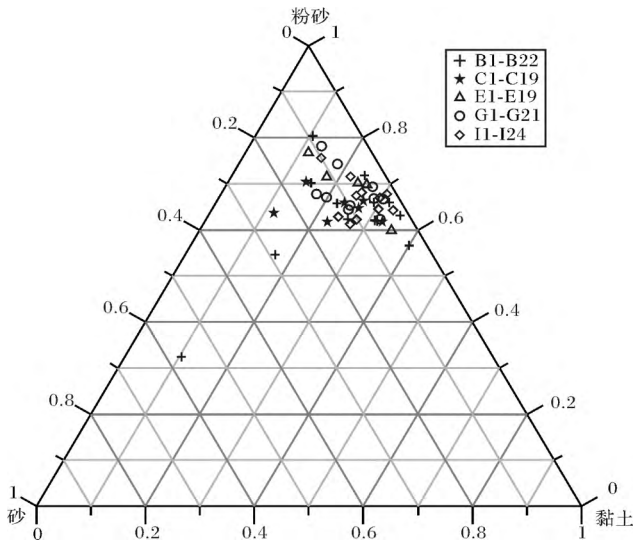


图 4 表层沉积物三角图
Fig.4 Ternary diagram of surface sediments

域,呈递减趋势,这与黏土的分布正好相反,粉砂与黏土的百分含量在研究区域的东南角都出现同心圆状分布,不同之处是黏土含量沿外周向圆心递减,而粉砂含量则递增。砂组分在研究区域的分布如图 5F 所示,其分布范围为 2%~57%,变化范围较大,但是大

部分处在 5%~10% 之间,砂组分是研究区域中相对较少的组分,由于含量少,其在研究区域的分布显得比较均匀。

3.3 表层沉积物粒度参数特征

沉积物粒度受物质来源、搬运介质、搬运方式以及搬运距离等因素控制,是判断沉积时自然地理环境以及沉积动力条件的良好标志。一般来讲,沉积物的粒度大小可以用来反映沉积动力条件的强弱,粒度越粗,反映其沉积动力条件越强;反之,其沉积动力条件越弱^[28-29]。

表层沉积物平均粒径大部分集中在 6~7 φ 之间(图 6A),平均值为 6.6 φ,为细粉砂级别,占样品总量的 82.8%。朱家尖岛沿岸附近的沉积物粒径比外部海域的大,由沿岸向外海沉积物平均粒径呈变细趋势,在 122.50° E 处有较明显的分界。但是研究区域西南角的海湾内(南沙海滩附近)平均粒径比其他沿岸表层沉积物平均粒径要小。岛礁附近的沉积物平均粒径较大(小于 6 φ)。

研究海域表层沉积物的分选系数(图 6B)范围为 1.49~2.32,大部分样品集中在 1.80~2.10 之间,平均值为 1.96,总体上样品分选差。分选系数是用来衡量

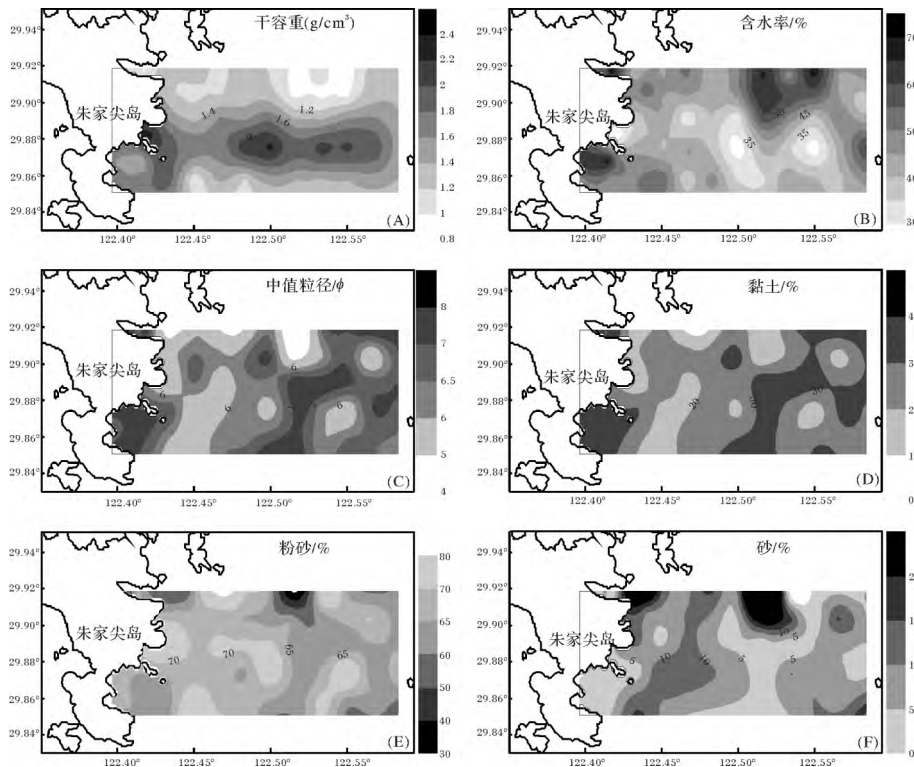


图 5 表层沉积物干容重、含水率、中值粒径以及黏土、粉砂、砂百分含量分布
Fig.5 The distribution of dry unit weight, moisture content, medium diameter and the percentage content of clay, silt, sand in the surface sediments

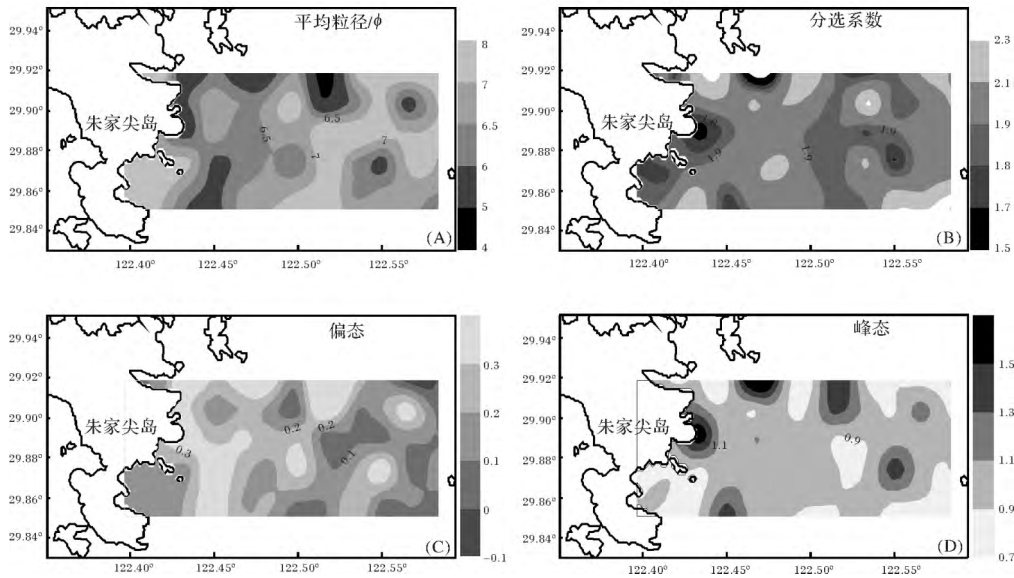


图6 表层沉积物粒度参数分布图

Fig.6 The distribution patterns of the grain size parameters

相对于平均粒径而言粒径分布范围的大小,分布集中,分选系数就小,反之分选系数大,分选性就差。同时,分选系数也可以用来指示环境的水动力条件和沉积物来源数量,分选系数大可以指示多变的沉积环境和多源沉积混合^[12]。研究区域的沿岸部分和中部少量海域的分选系数相对较好(小于1.8),总体而言,分选差。

偏态(偏度)反应的是粒径分布曲线分布的不对称性^[22]。在正态分布曲线上,沉积物的峰值、均值和中值互相重合,偏态为0。在正偏曲线上,中值和峰值分布在均值的较粗的一侧,在较细的一侧出现了一条尾巴。负偏时情况相反。研究区域表层沉积物偏态(图6C)主要分布在0.1~0.3之间,平均值为0.2,总体上属于正偏,这与长江三角洲潮滩沉积物偏态相同^[26]。在122.55°E以东的研究海区偏态小于0.1,其粒径分布曲线近对称。在122.52°E北部海区沉积物粒径分布曲线出现极正偏(大于0.3)。

该海域表层沉积物的峰态(峭度)分布在0.83~1.71之间(图6D),在0.90~1.10之间的分布为主,平均值为0.99,总体上属于中等峭度。峭度可以用来衡量粒径频率分布曲线的频率极值上下偏离正态分布频率极值的程度。研究区域西南角的海湾内(南沙海滩附近)峭度宽平(小于0.9),东南部岛礁附近的沉积物峭度呈同心圆状分布,由外周到圆心峭度逐渐增大(由“中等峭度”到“窄尖”再到“很窄尖”的分布)。

4 讨论

4.1 沉积地层稳定性

长江水下三角洲向南延伸带上的舟山近岸泥质区全新世沉积厚度约为4~23 m,大部分在8~12 m之间,与DC-1孔、DC-2孔^[6,7]全新世厚度较接近,自西向东逐渐变厚,可见基岩裸露,整体上由西北向东南方向缓慢倾斜(图2β)。其沉积物具有含水率较高(平均为46%);孔隙比高,密度差较差;高压缩性,并且随地层深度的增大压缩性逐渐降低等特点^[30]。另外,固结快剪强度指标 c 、 ψ 值较小,随地层埋深增大,其值逐渐增大。因此,本海区海底沉积物的强度较低,在重力、波浪力等外力作用下易受到破坏。部分浅地层剖面中记录有浅层气存在,其埋藏深度约为12 m(图3c),可能与上部地层黏土含量高有关,浅层气不易穿越上升。浅层气的存在会给海洋工程地基带来安全隐患^[30-32],Whelan *et al.*^[33]研究了浅层气与沉积物抗剪强度之间的关系,结果表明自重作用下的固结作用可以使海底松散沉积物的抗剪强度随深度增大,而含气层中这种增长率明显减小。浅层气的存在可使土质的抗剪强度降低,从而增强了潮流对海床的冲刷侵蚀作用,给海洋工程地基带来安全隐患。研究区北部B断面在近岸朱家尖岛与白沙岛之间发现有岛间海槽,南北走向,海槽宽约4 km,水深可达40 m(图3a)。岛间海槽正处于白沙水道南部开口,其表层沉积物含砂量高(约20%),平均粒径从水道

口门向外海逐渐变细,岛间海槽位置的水动力条件强,有利于粗颗粒沉积。另外,白沙水道的航道疏浚可能会影响海槽的表层沉积物分布。

4.2 沉积速率

流系对舟山近岸沉积物的搬运和沉积起着控制性作用。其周围主要的流系有:长江冲淡水、台湾暖流和闽浙沿岸流等。夏季长江口的悬沙和沉积物主要在河口附近快速淤积,而部分物质则随着冲淡水运动向外海扩散,还有一些物质以异重流的形式向外海逃逸^[25, 34, 35]。冬季台湾暖流减弱和冬季风驱动作用,使得闽浙沿岸流沿岸南下,长江口外沉积物发生再悬浮和输运,大约 20%~30%的长江沉积物^[36]再搬运而堆积于闽浙沿海形成闽浙沿岸泥质区^[37, 38]。

东海陆架泥质区具有充足的沉积物供应和广阔的陆架结构,其对海平面的变化十分敏感^[12]。自末次盛冰期以来,出现过六次海平面快速上升,其中有两次最为明显,在 300 年内海平面分别上升 20 m (14.3~14.0 ka B.P. MWP-1A 事件,从-96 m 上升到-76 m) 和 13 m (11.5~11.2 ka B.P. MWP-1B 事件,从-58 m 上升到-45 m)^[39, 40]。海平面在大约 7 ka B.P. 时候达到最大高度(+3m),此后逐渐下降到现今海平面高度^[41]。钻孔的 AMS¹⁴C 测年数据表明东海泥质区主体部分是在全新世中晚期(7 ka B.P. 以来)高海平面体系下形成,此时闽浙沿岸流也开始稳定,沉积物通过再悬浮与闽浙沿岸流的作用下向南输运^[13, 42]。但是 Xu *et al.*^[12] 通过钻孔 EC2005 和 MD06-3039/3040 资料表明两个它们在 11~7 ka B.P. 之间的堆积厚度分别为 8 m 和 6 m,说明从 11 ka B.P. 开始长江就持续向南输送沉积物,这与 Liu *et al.*^[13] 认为的在 11~7 ka B.P. 间长江沉积物只向南黄海输送,7 ka B.P. 左右沿岸流形成后沉积物才开始向南输运有所不同。

舟山近岸泥质区处于长江口泥质区和浙闽沿岸泥质区交接的边缘,其全新世泥质沉积厚度约为 4~23 m 大部分在 8~12 m 之间(图 2-3),远远小于两个泥质区中心沉积厚度^[13]。假设舟山泥质区边缘的沉积物是全新世中晚期(7 ka B.P. 以来)形成的^[13, 42]。依此计算得出舟山近岸泥质区长时间尺度沉积速率约 0.57~3.29 m/ka,且大部分集中在 1.14~1.71 m/ka 之间。这一沉积速率远小于位于邻近的浙闽沿岸泥质区沉积中心(7 ka 沉积厚度为 30 m^[13],沉积速率 4.29 m/ka),也远远小于长江口门外水下三角洲泥质沉积中心(7 ka 沉积厚度为 40 m^[13],沉积速

率 5.71 m/ka)。尽管研究海区悬浮泥沙含量较高^[43, 44],但在较强的潮流作用及波浪作用下沉积物再悬浮作用增强,使得长江水下三角洲向南延伸带上舟山泥质区边缘的沉积速率较小。

4.3 沉积环境变化趋势

近年来流域人为活动加剧,长江的入海泥沙通量不断减少。20 世纪 70 年代以前年均通量近 5 亿吨,到 2000 年入海泥沙只有 3.4 亿吨,2003 年三峡水库蓄水运用后大通站测得数据显示每年入海泥沙已经不到 2 亿吨。最近几年数据分别为:2009 年 1.11 亿吨;2010 年 1.85 亿吨;2011 年 0.718 亿吨。研究表明三峡大坝建成后,长江口部分潮滩湿地及水下三角洲已出现侵蚀,至 2007 年侵蚀主要集中在 5~8 m 等深线附近^[45, 46],另外,南汇边滩的淤积速率也有所减缓^[47, 48]。随着长江流域水利水电工程开发不断加强以及南水北调工程的实施,入海泥沙通量在未来几十年可能会继续减少,三角洲侵蚀可能继续或甚至加强。三角洲的侵蚀无疑起到泥沙补给作用,从而减轻对远距离沉积“汇”的影响。但是,三角洲的侵蚀有可能不足以完全补偿长江入海泥沙量的减少。也就是说,在长江流域人类活动影响下,浙江沿岸泥质带沉积速率有可能下降。

5 结论

根据以上研究,得出以下几点结论:

(1) 研究区水深在 5~30 m 之间,总体底床较为平缓,东西向剖面近岸坡降较缓。区内地层剖面上部皆为水平浅海相沉积,水平构造发育,层理平行于底床,为典型的浅海相地层特征。剖面 I 东部可见浅层气出露,其顶面埋藏深度约为 12 m,岛礁区及南部剖面可见少量下伏基岩。浅海相地层与下伏层间为不整合界面,下伏沉积物为滨海沙质沉积层,全新世地层平均厚度在 10 m 左右,长时间尺度沉积速率约 0.57~3.29 m/ka。沉积物含水量较大,孔隙比高密实度较差,固结快剪强度指标 c 、 ψ 值较小,且有浅层气存在。因此,研究海区的抗冲蚀能力相对较弱。

(2) 研究区沉积物中不含砾石,砂、粉砂、黏土的平均含量为 9%、65% 和 29%,平均粒径的平均值为 6.6ϕ ,主要为黏土质粉砂。沉积物含水率高,干容重较低;分选性差,分选系数平均值为 1.96;大部分研究区域的偏态属于正偏,偏态平均值为 0.2;属于中等峭度,峰态平均值为 0.99。靠近白沙水道附近水动力作用较强,形成岛间海槽,海槽内表层沉积物砂含量高,

平均粒径较大。

(3) 研究区沉积物主要来源于长江口。近年来长江入海沙量减少, 改变其来水来沙条件。三角洲可能继续侵蚀, 可以起到泥沙补给作用, 从而减轻对远距离沉积“汇”的影响。但是, 三角洲的侵蚀有可能不足以完全补偿长江入海泥沙量的减少。因此, 在长江流域人类活动影响下, 浙江沿岸泥质带沉积速率有可能下降。

致谢 感谢华东师范大学河口海岸国家重点实验室刘健华、史本伟、罗向欣、何海丰、张朝阳在野外采样中提供的帮助; 感谢华东师范大学河口海岸国家重点实验室野外仪器室张文祥老师协助仪器的投放; 感谢张晓笛在论文文字修改方面的帮助与支持; 感谢两位审稿专家宝贵的建议。

参考文献 (References)

- Shepard F P, Emery K O, Gould H R. Distribution of sediments on East Asiatic continental shelf [M]. State of California: University of Southern California Press, 1949: 64
- Nino H, Emery K O. Sediment of shallow portions of the East China Sea and South China Sea [J]. Geological Society of America Bulletin, 1961, 72(5): 731-762
- 管秉贤. 东海海流系统概述. 黄东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 126-133 [Guan Bingxian. An Overview of the Current System of the East China Sea. The Geology of Yellow Sea and East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1982: 126-133]
- 秦蕴珊, 郑铁民. 东海大陆架沉积物分布特征的初步探讨: 黄东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1982: 39-51 [Qin Yunshan, Zheng Tie-min. A Study of Distribution Pattern of Sediments on the Continental Shelf of the East China Sea: The Geology of Yellow Sea and East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1982: 39-51]
- Milliman J D, Shen H T, Yang Z S, et al. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 37-45
- 官晨钟, 曲秀华. 东海 DC-1 孔岩芯天然热释光测试 [J]. 海洋科学, 1984(4): 35-36 [Guang Chenzhong, Qu Xiuhua. The application of thermoluminescence technique on testing DC-1 core in East China Sea [J]. Marine Sciences, 1984(4): 35-36]
- 孙维敏, 张宏才, 李本兆. 东海 DC-1, DC-2 孔古地磁研究 [J]. 海洋科学, 1989(5): 15-23 [Sun Weimin, Zhang Hongcai, Li Benzhaoh. Study on paleomagnetism of Core DC-1 and DC-2 from East China Sea [J]. Marine Sciences, 1989(5): 15-23]
- 陈洪德, 严钦尚, 项立崇. 舟山朱家尖岛现代海岸沉积 [J]. 华东师范大学学报: 自然科学版, 1982(2): 77-91 [Chen Hongde, Yan Qins-hang, Xiang Lichong. Recent coastal sediments of Zhujiajian island, Zhoushan archipelago [J]. Journal of East China Normal University: Natural Science Edition, 1982(2): 77-91]
- 蒋国俊, 陈吉余. 舟山群岛峡道潮流动力沉积特性 [J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 139-147 [Jiang Guojun, Chen Jiyu. Characteristics of dynamic sedimentation on tidal flat in channels of Zhoushan islands [J]. Acta Oceanologica Sinica, 1998, 20(2): 139-147]
- 王爱军, 高抒, 杨旸. 浙江朱家尖岛砾石海滩沉积物分布及形态特征 [J]. 南京大学学报: 自然科学, 2004, 40(6): 747-759 [Wang Aijun, Gao Shu, Yang Yang. Sediment distribution and shape characteristics of gravel beaches, Zhujiajian island, Zhejiang province [J]. Journal of Nanjing University: Natural Science, 2004, 40(6): 747-759]
- 胡日军, 吴建政, 朱龙海, 等. 东海舟山群岛海域表层沉积物运移特征 [J]. 中国海洋大学学报, 2009, 39(3): 495-500 [Hu Rijun, Wu Jianzheng, Zhu Longhai, et al. Characteristic of surface sediment transport in Zhoushan archipelago sea area, East China Sea [J]. Periodical of Ocean University of China, 2009, 39(3): 495-500]
- Xu K H, Li A C, Liu J P, et al. Provenance, structure, and formation of the mud wedge along inner continental shelf of the East China Sea: A synthesis of the Yangtze dispersal system [J]. Marine Geology, 2012, 291-294: 176-191
- 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
- Deng B, Zhang J, Wu Y. Recent sediment accumulation and carbon burial in the East China Sea [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20(3): GB3014, doi: 10.1029/2005GB002559
- Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2006, 26(17): 2141-2156
- 尤仲杰, 王一农. 舟山朱家尖岛潮间带软体动物的群落生态 [J]. 海洋湖沼通报, 1989(3): 38-45 [You Zhongjie, Wang Yinong. Community ecology of mollusca on the intertidal zone of the Zhujiajian island, Zhoushan [J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 1989(3): 38-45]
- 浙江省海岸带和海洋资源综合调查报告编写委员会. 浙江省海岸带和海洋资源综合调查报告 [R]. 北京: 海洋出版社, 1988: 14-134 [Editorial Committee of Report of Comprehensive Investigation on Coastal Zone and Tidal Flat Resources of Zhejiang Province. Report of Comprehensive Investigation on Coastal Zone and Tidal Flat Resources of Zhejiang Province [R]. Beijing: China Ocean Press, 1988: 14-134]
- 朱静昌, 张国栋, 王益友, 等. 舟山现代滨岸滩脊(坝)沟槽体系迁移与沉积特征 [J]. 海洋与湖沼, 1988, 19(1): 35-43 [Zhu Jingchang, Zhang Guodong, Wang Yiyu, et al. Migration of ridge (bar) runnel systems and the resultant sedimentary characteristics on modern coast, Zhoushan archipelago [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1988, 19(1): 35-43]
- 张国栋, 王益友, 朱静昌, 等. 现代滨岸风暴沉积——以舟山普陀岛、朱家法岛为例 [J]. 沉积学报, 1987, 5(2): 17-28 [Zhang Guodong, Wang Yiyu, Zhu Jingchang, et al. Modern coastal storm deposits of Putuo Island and Zhujiajian Island, Zhoushan [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1987, 5(2): 17-28]
- Davies J L. A morphogenetic approach to world Shorelines [J].

- Zeitschrift für Geomorphologie, 1964, 8: 127-142
- 21 Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. Journal of Sedimentary Geology, 1954, 24(3): 151-158
- 22 杨世伦. 海岸环境和地貌过程导论[M]. 北京: 海洋出版社, 2003 [Yang Shilun. Introduction of Coastal Environment and Morphological Processes [M]. Beijing: China Ocean Press, 2003]
- 23 陈沈良, 杨世伦, 吴瑞明. 杭州湾北岸潮滩沉积物粒度的时间变化及其沉积动力学意义[J]. 海洋科学进展, 2004, 22(3): 299-305 [Chen Shenliang, Yang Shilun, Wu Ruiming. Temporal changes in tidal flat sediment grain size along the north bank of the Hangzhou Bay and their implication of sedimentation dynamics [J]. Advances in Marine Science, 2004, 22(3): 299-305]
- 24 McManus J. Grain Size Determination and Interpretation [M]// Tucker M E. Techniques in Sedimentology. Oxford: Blackwell, 1988: 63-85
- 25 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉, 等. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 1-91 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, et al. Geology of East China Sea [M]. Beijing: Science Press, 1987: 1-91]
- 26 刘红, 何青, 王元叶, 等. 长江口表层沉积物粒度时空分布特征[J]. 沉积学报, 2007, 25(3): 445-455 [Liu Hong, He Qing, Wang Yuanye, et al. Temporal and spatial characteristics of surface sediment grain-size distribution in Changjiang estuary [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2007, 25(3): 445-455]
- 27 刘阿成. 杭州湾口北部的表层沉积物粒度分布和动力沉积作用研究[J]. 海洋通报, 2002, 21(1): 49-56 [Liu Acheng. Studies on grain-size of surface sediments and dynamic sedimentation in the northern part of the mouth of Hangzhou Bay [J]. Marine Science Bulletin, 2002, 21(1): 49-56]
- 28 向荣, 杨作升, 郭志刚, 等. 济州岛西南泥质区粒度组分变化的古环境应用[J]. 地球科学, 2005, 30(5): 582-588 [Xiang Rong, Yang Zuosheng, Guo Zhigang, et al. Paleoenvironmental implications of grain-size component variations in the mud area southwest of Cheju Island, ECS [J]. Earth Science, 2005, 30(5): 582-588]
- 29 Xiao S B, Li A C, Liu J P, et al. Coherence between solar activity and the East Asian winter monsoon variability in the past 8000 years from Yangtze River-derived mud in the East China Sea [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2006, 237(2): 293-304
- 30 吴时国, 赵汗青, 伍向阳, 等. 深水钻井安全的地质风险评价技术研究[J]. 海洋科学, 2007, 31(4): 77-80 [Wu Shiguo, Zhao Hanqing, Wu Xiangyang, et al. The research of geohazards estimation technique on deep-water wells [J]. Marine Sciences, 2007, 31(4): 77-80]
- 31 王振红, 潘永坚, 潘国富, 等. 舟山一岱山间西部海域第四纪海底沉积物物理力学指标统计分析[J]. 海洋通报, 2011, 30(5): 557-561 [Wang Zhenhong, Pan Yongjian, Pan Guofu, et al. Statistic analysis of physical and mechanical indices of Quaternary marine sediments in the western sea area between Zhoushan and Daishan Island [J]. Marine Science Bulletin, 2011, 30(5): 557-561]
- 32 叶银灿, 陈俊仁, 潘国富, 等. 海底浅层气的成因、赋存特征及其对工程的危害[J]. 东海海洋, 2003, 21(1): 27-36 [Ye Yincan, Chen Junren, Pan Guofu, et al. A study of formation cause, existing characteristics of the shallow gas and its danger to engineering [J]. Donghai Marine Science, 2003, 21(1): 27-36]
- 33 Whelan T, Coleman J M, Suhayda J N, et al. Acoustical penetration and shear strength in gas-charged sediment [J]. Marine Geotechnology, 1977, 2: 147-159
- 34 杨作升, 陈晓辉. 百年来长江口泥质区高分辨率沉积粒度变化及影响因素探讨[J]. 第四纪研究, 2007, 27(5): 690-699 [Yang Zuosheng, Chen Xiaohui. Centurial high resolution records of sediment grain-size variation in the mud area of the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its influential factors [J]. Quaternary Sciences, 2007, 27(5): 690-699]
- 35 郭志刚, 杨作升, 范德江, 等. 长江口泥质区的季节性沉积效应[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 591-597 [Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Fan Dejiang, et al. Seasonal sedimentary effect on the Changjiang estuary mud area [J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 591-597]
- 36 高抒. 长江三角洲对流域输沙变化的响应: 进展与问题[J]. 地球科学进展, 2010, 25(3): 233-241 [Gao Shu. Changjiang delta sedimentation in response to catchment discharge changes: Progress and problems [J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(3): 233-241]
- 37 Milliman J D. Blessed dams or damned dams? [J]. Nature, 1997, 386: 325-327
- 38 DeMaster D J, McKee B A, Nittouer C A, et al. Rates of sediment accumulation and particle reworking based on radiochemical measurements from continental shelf deposits in the East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 1985, 4(1/2): 143-158
- 39 Bard H B, Fairbanks R G. U-Th ages obtained by mass spectrometry in corals from Barbados, sea level during the past 130,000 years [J]. Nature, 1990, 346: 456-458
- 40 Liu J P, Milliman J D. Reconsidering melt-water pulses 1A and 1B: Global impacts of rapid sea-level rise [J]. Journal of Ocean University of China, 2004, 3(2): 183-190
- 41 Chen Z, Stanley D J. Sea-level rise on eastern China's Yangtze delta [J]. Journal of Coastal Research, 1998, 14: 360-366
- 42 肖尚斌, 李安春, 陈木宏, 等. 近8ka东亚冬季风变化的东海内陆架泥质沉积记录[J]. 地球科学, 2005, 30(5): 573-581 [Xiao Shangbin, Li Anchun, Chen Muhong, et al. Recent 8ka mud records of the East Asian Winter Monsoon from the Inner Shelf of the East China Sea [J]. Earth Science, 2005, 30(5): 573-581]
- 43 翟世奎, 张怀静, 范德江, 等. 长江口及其邻近海域悬浮物浓度和浊度的对应关系[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 693-699 [Zhai Shikui, Zhang Huaijing, Fan Dejiang, et al. Corresponding relationship between suspended matter concentration and turbidity on Changjiang estuary and adjacent sea area [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 693-699]
- 44 王凯, 卢昕晖, 施心慧. 东海混浊海域悬沙浓度的三维数值模拟及与观测的比较[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(6): 884-891 [Wang Kai, Lu Xinhui, Shi Xinhui, et al. A three-dimensional sediment transport model in the offshore area near the Changjiang estuary—a case study [J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2011, 42(6): 884-891]
- 45 Yang S L, Zhang J, Xu X J. Influence of the Three Gorges Dam on downstream delivery of sediment and its environmental implications,

- Yangtze River[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(10) : doi: 10.1029/2007GL029472
- 46 Yang S L , Milliman J D , Li P *et al.* 50 000 dams later: Erosion of the Yangtze River and its delta [J]. *Global and Planetary Change* , 2011 , 75(1/2) : 14-20
- 47 Zheng Maohui , Jiang Simin , Xing Fei. Quantitative Analysis on Evolution of Erosion and Deposition in Nanhui Tidal Flat of Yangtze Estuary [C]//Electric Information and Control Engineering (ICEICE) , 2011 International Conference. IEEE , 2011: 3450-3453
- 48 Kuang C P , Liu X , Gu J *et al.* Numerical prediction of medium-term tidal flat evolution in the Yangtze Estuary: Impacts of the Three Gorges project [J]. *Continental Shelf Research* , 2013 , 52: 12-26

A Preliminary Study of the High Resolution Sub-bottom Stratigraphic Structures and Sedimentary Features in the Mud Area along Southern Distal Yangtze Subaqueous Delta: An example from the area off eastern Zhujiajian island

LUO Guang-fu DENG Bing YANG Shi-lun

(State Key Laboratory of Estuary and Coastal , East China Normal University , Shanghai 200062)

Abstract: In this paper , based on 58 surface sediment samples collected in the mud deposited zone along the southern distal Yangtze subaqueous delta recently , the grain size of the surface sediment was analyzed and the sub-bottom stratigraphic structure was also measured. Results show that the clayey silt is the main type of the sediment in the study area. These sediments are characterized by high water content (46%) , high porosity , high compressibility and low shear strength which are potentially vulnerable to coast erosion. The upper part of the seismic profiles shows horizontal neritic strata. Underlying bedrocks are discovered in the area of reefs and the southern profiles. Sparse shallow gas is found in the eastern part of Profile I , with top imbedded depth about 12 m. The thickness of the Holocene sediment is 4~23 m and the sedimentation rate is estimated about 0.57~3.29 m/ka. Considering low sedimentation rate of the study area , recent accelerated human activity in the river basin , leading to decreased sediment discharge from Changjiang River , will cause a potential threat to the seabed stability of the Zhejiang coast.

Key words: the subaqueous Yangtze delta; grain size; sub-bottom profiler; sedimentation rate