

文章编号: 1000-0550(2012)01-0137-11

近期长江口—杭州湾邻近海域沉积物粒径 的时空变化及其影响因素^①

罗向欣 杨世伦 张文祥 张 经

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062)

摘 要 为了研究长江口—杭州湾外近海沉积物粒径的现状和近期变化,于2008年4月在该区域用箱式取样器取得了33个表层样,用震动活塞采样器取得7个柱状样;在室内用激光粒度仪对沉积物样品进行了粒度分析并与历史时期的研究成果进行对比。结果表明,1)表层沉积物总体上呈东粗(砂)西细(泥)的特点,粒径总体上的空间格局与历史时期相似;但砂—泥区界线在研究区北部(长江口和杭州湾外)有向西迁移(蚀退)迹象(西移10~30 km),而在南部(舟山群岛以南)则出现明显向东迁移(淤进)现象(最大超过50 km)。2)当前的表层沉积物形成一条南北连续的泥质带(粒径向南逐渐变细),反映过去存在于舟山群岛以东的最细组分(“黏土”)带不连续现象在表层现已趋于消失。3)表层沉积物粒径趋势分析揭示长江入海泥沙的运移方向主要是向南—东南。4)泥质区柱状沉积物具有粉砂和黏土为主但在垂向上(反映在时间上)有粗细多变的特点(侵蚀区表层沉积物有粗化迹象)。研究认为,长江口—杭州湾邻近海域现代沉积物对流域和沿海重大人类活动有较敏感的响应。

关键词 沉积物 粒度 人类活动影响 气候变化 长江口 杭州湾 东海

第一作者简介 罗向欣 男 1983年出生 博士研究生 河口海岸沉积动力过程 E-mail: luox1983@163.com

通讯作者 杨世伦 E-mail: slyang@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P512.2 P737.12 **文献标识码** A

0 前言

近海沉积物特性的研究不仅对沉积学自身的发展十分重要,而且对海洋环境科学、生态学、地貌学、工程学等多学科的交叉发展具有促进作用。粒度是沉积物最重要的物理参数和动力环境指标^[1]。长江入海泥沙通量居世界河流第4位^[2]。历史上,长江入海泥沙约一半左右堆积在长江口门附近^[3],其余泥沙在巨大的径流扩散和强劲的潮流、沿岸流作用下向南和向东扩散^[4],最远可达台湾海峡^[5]。长江入海泥沙向南扩散的沉积物证据——浙闽沿海泥质沉积带——已趋于明了^[5]。但是,长江入海泥沙的向东扩散是否遇到一条动力屏障,以致沉积物粒径在空间分布上存在一条截然的界线,即界线以西是现代长江水下三角洲沉积,而界线以东是冰后期海平面上升以前的残留沉积物?这类问题有待进一步的沉积学证据。更重要的是,近期(特别是三峡工程蓄水以来)长江入海泥沙急剧下降^[6],口门附近水下三角洲出现了侵蚀现象^[7,8]。上海—浙江沿海近期还有很多

大规模的工程建设(包括围垦、港口和跨海大桥等)。这些重大人类活动及其导致的海底地貌冲淤变化是否会在沉积物上有所反映,或海床沉积物特性是否有利于侵蚀的持续发生,也有待从沉积物的特性上做出回答。尽管近年有不少学者对长江口及其口外向浙闽近岸延伸的泥质区的沉积物特性做过单孔^[9,10]或多点^[11~15]的取样研究,但对大范围的砂质、泥质区的综合研究还较少。本文在约7万km²的东海西北部进行表层和柱状沉积物样采集和分析,试图从粒度的角度认识该区域沉积物与长江入海泥沙的关系以及是否对流域和沿岸重大人类活动有敏感响应。

1 取样与样品分析

2008年4月24日至5月1日在东海西北部的长江口邻近浅海(122°10'E~124°E,29°30'N~32°N)用箱式取样器采得33个表层沉积物样,用震动活塞采样器取得7个柱状样(图1)。柱状样主要采自软泥区(砂质区因底床坚硬采样未获成功)。表层沉积物采样深度约5~10 cm,取样时不包括最表层极薄

^①国家自然科学基金创新群体项目(编号:41021064)、国家科技部973项目(编号:2010CB951202)、国家自然科学基金重点项目(批准号:41130856)、上海市科委项目(编号:10dz1210505)、国家重点实验室科研业务课题(编号:SKLEC-2009KYYW02)资助。

收稿日期:2011-03-23;收修改稿日期:2011-05-27

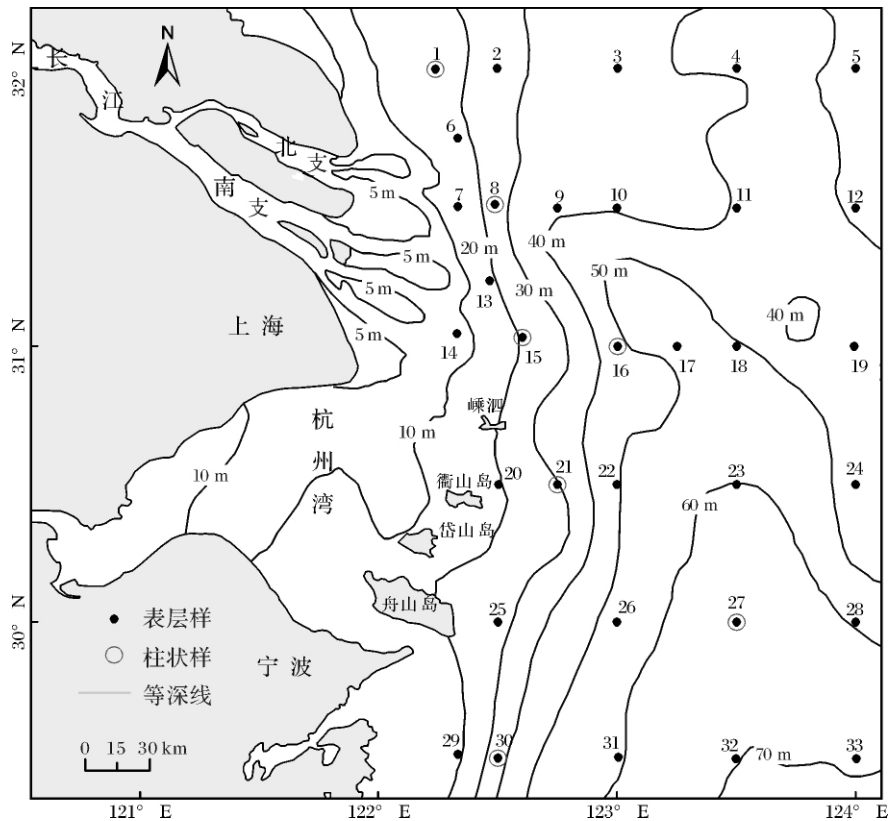


图1 取样点站位图

Fig. 1 Sampling sites

的那部分含水量极高的“浮泥”(某些样品存在这种现象);柱状样长度1.4~4.8 m。除15号柱状样以每2 cm 分层取样外,其它柱样每隔10 cm 取2 cm 厚度。

在实验室将采集的沉积物样品取出5~10 g 放入烧杯中,先加入10 ml 浓度为10%的 H_2O_2 以去除样品中的有机质,微热后静置24 h,再加入10 ml 浓度为4%的六偏磷酸钠($(NaPO_3)_6$),然后用超声波振荡对样品进行分散处理,用Coulter(LS-100Q)激光粒径仪测试各粒级的组分含量,然后根据Folk and Ward^[16]公式计算平均粒径、分选系数、偏度和峰度4种参数。黏土、粉砂和砂的粒级分类采用国际通用的分类标准^[17],即砂为 $-1 \sim 4\phi$ 、粉砂为 $4 \sim 8\phi$ 、黏土为 $> 8\phi$;沉积物样品的粒径命名依据King^[18],即中值粒径 $-1 \sim 0\phi$ 为极粗砂、 $0 \sim 1\phi$ 为粗砂、 $1 \sim 2\phi$ 为中砂、 $2 \sim 3\phi$ 为细砂、 $3 \sim 4\phi$ 为极细砂、 $4 \sim 5\phi$ 为粗粉砂、 $5 \sim 6\phi$ 为中粉砂、 $6 \sim 7\phi$ 为细粉砂、 $7 \sim 8\phi$ 为极细粉砂、 $> 8\phi$ 为黏土。沉积物分选性、偏度、峭度的分类依据Folk和Ward^[16]。运用Gao-Collins模型进行沉积物运移趋势分析^[19,20]。

2 结果

2.1 表层沉积物特征

33个表层沉积物样品的中值粒径为 $1.62 \sim 7.93\phi$,中砂样8个、细砂3个、极细砂3个、中粉砂3个、细粉砂5个、极细粉砂11个(表1)。这些样品构成中值粒径 $>4\phi$ 和 $<5\phi$ 的两大类(图2),即缺失 $4 \sim 5\phi$ 的样品,反映研究区沉积物属于粗、细两大类。砂、粉砂、黏土三角组分图(图3)反映研究区的表层沉积物基本上属于两大类“残留砂”和“现代长江细颗粒泥沙”,前者砂的含量占75%~97%,后者砂的含量趋于0(图3、表1)。其它的样品属于两者之间的过渡类型(图3)。分选系数 σ_1 为 $0.54 \sim 2.97\phi$,分选中等6个、分选差17个、分选很差10个。偏度为 $-0.08 \sim 0.73$,近对称样13个、正偏10个、极正偏10个。峰度为 $0.62 \sim 3.93$,很宽平样4个、宽平样8个、中等峰度样10个、尖窄样2个、很尖窄样7个、极尖窄样2个(表1)。粒度频率曲线绝大多数为单峰,但在“砂”和“泥”的过渡带有双峰出现(例如8、16、17、23、24、27、28号样),即一个 $<4\phi$ 的主峰和一个6

表 1 表层沉积物粒度参数

Table. 1 Grain size parameters of surficial sediment samples

点号	中值粒径(ϕ_{50})	平均粒径(M_z)	分选系数(σ_1)	偏度(S_{K1})	峰度(K_G)	组分含量/%		
						黏	土	粉 砂 砂
1	5.51	5.99	2.10	0.35	0.91	19.6	65.4	15.0
2	2.37	3.09	1.80	0.72	2.55	5.7	14.2	80.1
3	1.88	1.92	1.35	0.37	3.93	4.2	6.9	88.9
4	1.81	1.82	0.56	0.17	1.55	2.1	2.6	95.3
5	1.98	2.00	0.85	0.36	2.93	2.3	3.7	94.0
6	6.06	6.42	2.04	0.27	0.89	23.1	69.0	7.9
7	6.83	7.07	1.85	0.21	0.87	30.0	69.8	0.2
8	5.37	5.38	2.83	0.09	0.63	21.6	36.4	42.0
9	1.81	1.82	0.65	0.16	1.78	1.9	2.8	95.3
10	1.66	1.65	0.54	-0.06	1.45	1.3	2.0	96.7
11	1.62	1.59	0.61	-0.08	1.32	1.2	1.6	97.2
12	1.75	1.76	1.04	0.27	3.10	2.6	3.5	93.9
13	7.27	7.39	1.86	0.09	0.90	35.9	63.8	0.3
14	7.64	7.75	1.71	0.08	0.96	41.9	58.1	0.0
15	7.28	7.41	1.84	0.10	0.90	35.9	64.0	0.1
16	5.53	5.32	2.97	-0.01	0.63	21.6	33.5	44.9
17	3.85	4.82	2.85	0.49	0.64	20.7	28.7	50.6
18	2.98	3.87	1.98	0.73	2.05	8.6	16.2	75.2
19	1.81	1.79	0.96	0.17	2.77	2.2	3.5	94.3
20	7.14	7.35	1.81	0.16	0.89	34.2	65.8	0.0
21	7.39	7.54	1.76	0.13	0.87	37.9	62.1	0.0
22	7.64	7.74	1.74	0.07	0.89	42.5	57.5	0.0
23	2.20	3.09	2.13	0.70	2.55	7.9	10.9	81.2
24	3.02	4.35	2.73	0.64	0.84	15.0	23.5	61.5
25	6.96	7.10	2.00	0.11	0.88	32.5	64.9	2.6
26	7.80	7.89	1.68	0.07	0.90	45.4	54.6	0.0
27	6.28	6.16	2.58	0.01	0.62	29.0	36.0	35.0
28	3.95	5.15	2.55	0.65	0.67	21.6	28.0	50.4
29	6.36	6.80	1.79	0.36	0.91	25.0	74.9	0.1
30	7.40	7.57	1.76	0.13	0.90	37.9	62.1	0.0
31	7.76	7.81	1.76	0.02	0.94	44.6	55.4	0.0
32	7.93	7.98	1.66	0.02	0.95	48.2	51.8	0.0
33	7.90	7.92	1.77	-0.01	0.95	47.7	52.3	0.0

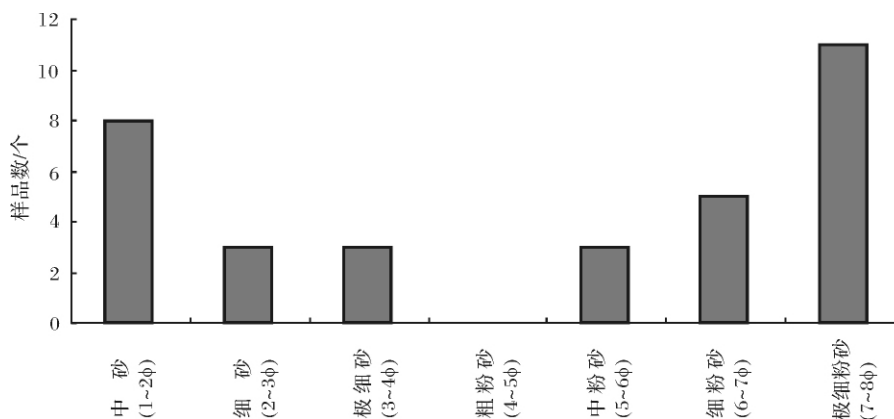


图 2 各粒级沉积物样品数分布图

Fig. 2 Histogram of sample numbers for different size classes

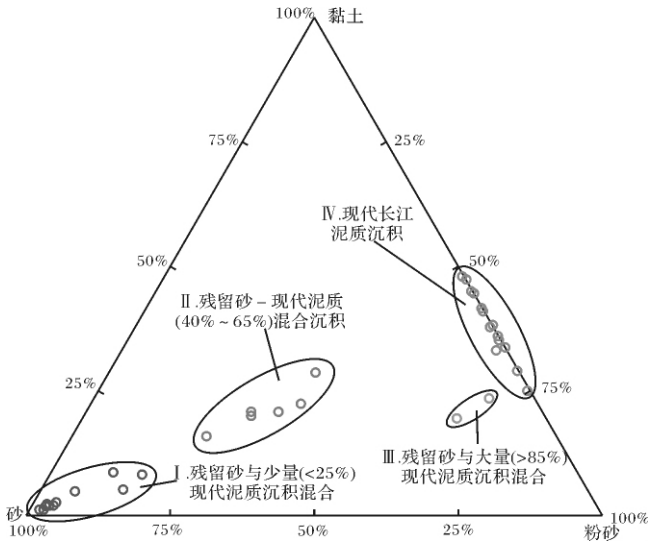


图3 表层沉积物三角组分图 (I : 2、3、4、5、9、10、11、12、18、19、23 号样; II : 8、16、17、24、27、28 号样; III : 1、6 号样; IV : 7、13、14、15、20、21、22、25、26、29、30、31、32、33 号样)

Fig.3 Triangular diagram of surficial sediments (I : samples 2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 18, 19, 23; II : samples 8, 16, 17, 24, 27, 28; III : samples 1, 6; IV samples 7, 13, 14, 15, 20, 21, 22, 25, 26, 29, 30, 31, 32, 33)

~8φ 的次峰(图4),反映在残留砂为主的沉积中混合了一定量的泥质沉积。

研究区表层沉积物呈东粗西细的截然分布格局,中值粒径为4φ的等值线大致呈NNW—SSE方向延伸(图5)。西部泥质带沉积物的粒径变化趋势反映沉积物主要向南和东南运移。

2.2 柱状沉积物样特征

柱状沉积物样具有以下特点: 1) 每根柱样都以粉砂和黏土为主。尤其是长江口外水下三角洲的15号点、杭州湾口外的21号点和舟山岛以南的30号点,砂的含量几乎为零; 16号点除表层含砂外,其它部分砂的含量也几乎为零(图7)。2) 柱样沉积物粒径在垂向上存在不同程度的差异。一种是频繁的粗细相间变化,位于泥质区核心带的柱样(例如自北向南依次出现的15、21和30号点)粒径垂向变化于6.5φ和8φ之间,而位于砂—泥过渡带的柱样(自北向南依次为1、8、27号点)粒径垂向变化于3φ和8φ之间。另一种是一定的粗细变化趋势。例如苏北东嘴以东海域的1号点的平均粒径从140cm深度的约3φ增大至70cm深度的约7.5φ,而后减小至表层

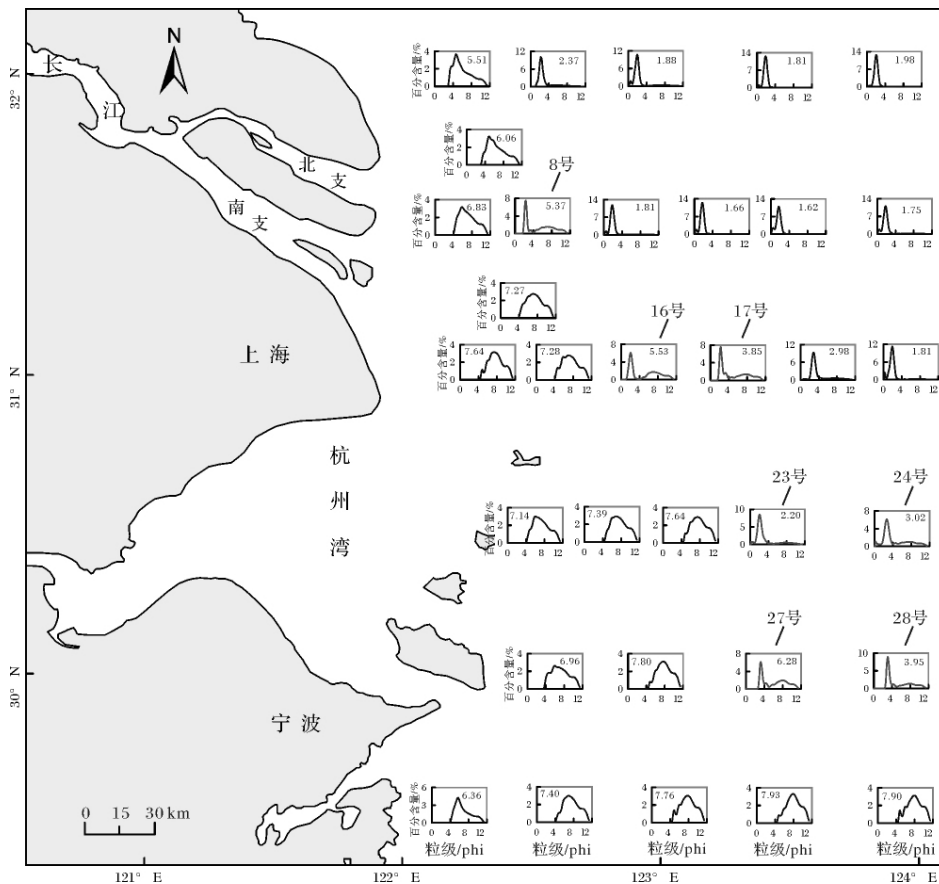


图4 表层沉积物频率曲线图(图中数字代表中值粒径)

Fig.4 Frequency curves of the surficial sediment samples (The numbers in the figure represent median size)

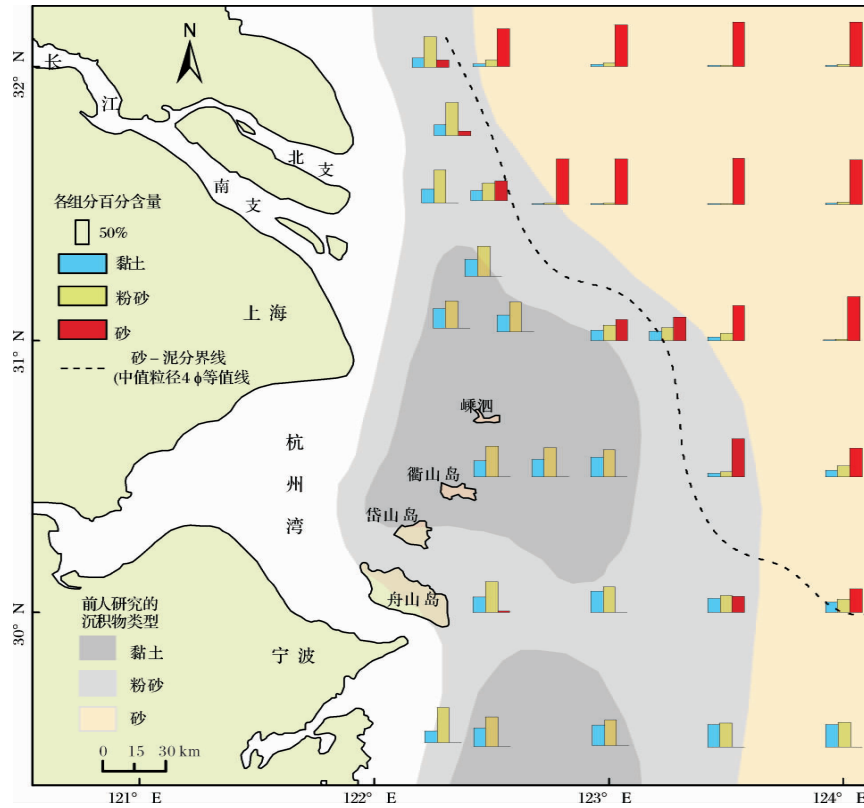


图 5 表层沉积物组分含量柱状图及砂、泥分界线(前人研究的沉积物类型(基于 20 世纪 60 年代的采样分析结果)据参考文献 [29, 30])
 Fig.5 Composition histograms and borderline between sand and mud (The historical type of sediment is cited from references [29] and [30])

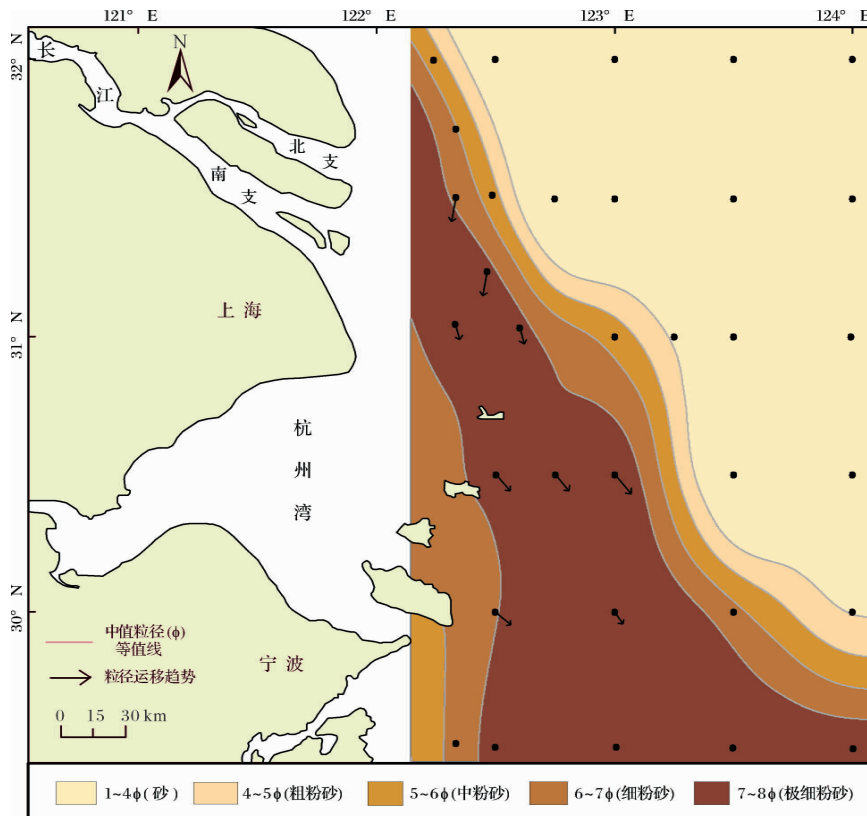


图 6 表层沉积物中值粒径等值线及现代泥质沉积物运移趋势
 Fig.6 Median size isolines of surficial sediments and the transport trend of modern muddy sediments

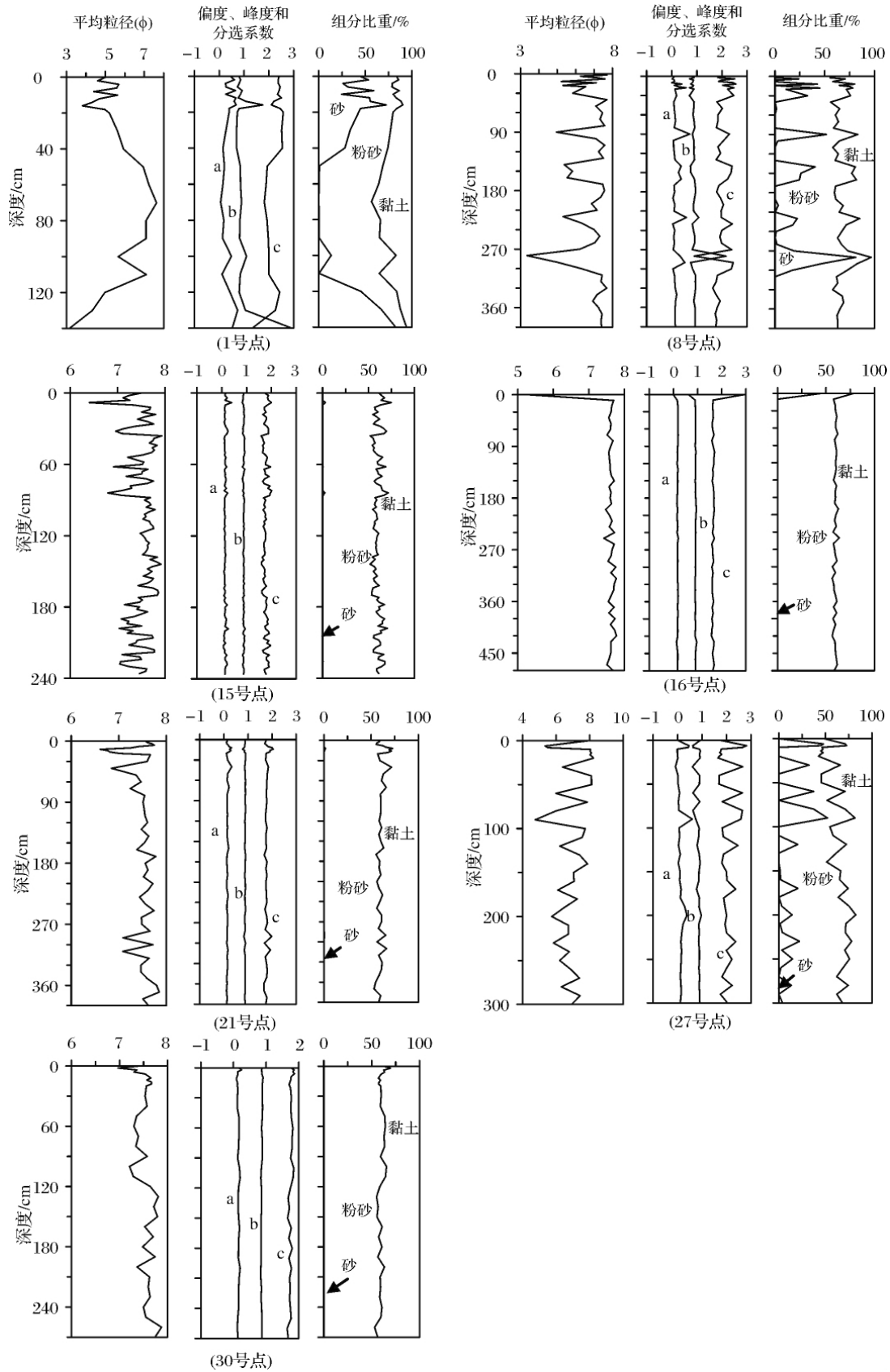


图7 柱状样粒度参数垂向分布(a. 偏度 b. 峰度 c. 分选系数)

Fig.7 Vertical distribution of grain size parameters for core sediments(a. skewness, b. kurtosis, c. sorting)

的约 5ϕ (图 7)。在柱状样表层或近表层出现最粗沉积物的样点还有长江南支口外水下三角洲 20 m 等深线附近的 15 号点、与之相邻的 16 号点、以及杭州湾口外的 21 号点和舟山岛以南的 30 号点。

3 讨论

3.1 表层沉积物特征的沉积环境意义

研究区缺少 $4 \sim 5\phi$ 的样品, 反映沉积物基本上属于“残留砂”和“现代长江细颗粒泥沙”截然不同的两大类。单一的海岸中、细和极细砂样品(例如海滩和海岸沙丘)通常是分选很好或分选好^[21]。本研究区虽然有 14 个中、细和极细砂样品, 却没有一个分选很好或分选好的样品, 这反映本区所有的表层“残留砂”都或多或少地受到现代泥质沉积(粉砂和黏土)的“污染”, 即不受现代细颗粒泥沙沉积影响的纯“残留砂”是不存在的。如表 1 所示, 每个砂质样品都含有不同程度的粉砂(1.6%~28%)和黏土(1.2%~22%)。根据冰后期中国东部海平面上升的常识, 本研究区“残留砂”(现水深 20 m 以东区域)被海水淹没至少有 8 000 a 的历史。在这样长的历史时期, 本研究区“残留砂”大部分样品仅混合了少量现代泥质沉积, 这在另一方面反映该区域受现代细颗粒泥沙的影响很小, 即长江入海泥沙的向东扩散受到极大限制, 这种限制与东海陆架环流(特别是台湾暖流)格局形成的屏障效应有关^[22]。在正偏态曲线上, 中值和峰值分布在均值的较粗一侧, 即在较细的一侧出现一条拖长的“尾巴”^[23]。河流砂、沙丘砂和风坪砂通常呈正偏^[24]。长江口沉积物也以正偏态为主^[25]。本研究沉积物样绝大多数呈正偏态(表 1, 图 4), 反映了长江物源的影响以及在陆架残留砂上叠加的细颗粒“尾巴”。如前所述, 东部的砂质带反映全新世海平面上升之前的残留沉积^[26, 27], 西部的泥质带则是近六千年(海平面大致处于现代位置)的河流(特别是长江)入海细颗粒泥沙沉积。海底地形西高东低(图 1)的显著差异特点反映现代细颗粒沉积物覆盖在老的陆架残留砂之上, 上覆的现代细颗粒沉积层越向海越薄, 4ϕ 等值线附近为过渡带。双峰频率曲线正好分布在砂和泥的过渡带(图 4), 为过渡带两类沉积物的混合提供了证据。本研究的沉积物粒径趋势(图 6)支持前人长江入海细颗粒泥沙主要向南运输的结论^[4, 28]。

3.2 近期表层沉积物粒径的变化

与上世纪 60 年代的调查结果(图 5 中的背景

图)相比较, 东粗(砂)西细(泥)的宏观格局没有改变, 但出现了三种变化。一是北纬 $30^{\circ}10'$ 以北的砂—泥分界线有西移的趋势。例如 23 号点原来以粉砂为主, 而目前以砂为主(占 81%); 16 号点也由原来的粉砂为主改变为砂为主(表 1)。砂—泥分界线西移的趋势反映原来的淤泥带外缘沉积遭受侵蚀。尽管激光仪法和液移—筛析法测量的粒径有一定差异, 但根据程鹏等^[37]的研究, 筛析法得出的平均粒径(Y)与激光仪法得出的平均粒径(X) (指砂样)的关系为 $Y = 0.998X + 0.061(\phi)$, $r = 0.98$, 即激光法 $Mz = 3.0$ 时, 筛析法 $Mz = 3.06$ 。全长亮和高抒^[38]基于 $3 \sim 8\phi$ 样品的研究得出的关系为 $Y = 0.713X + 1.826(\phi)$, $r = 0.82$ 。即激光法 $Mz = 6.0$ 时, 液移法 $Mz = 6.1$ 。换句话说, 因分析方法的不同导致的对砂—泥分界线判别的误差并不太大。如上所述, 近期由于长江流域大坝的兴建, 长江入海泥沙锐减(特别是 2003 年三峡工程蓄水以来), 长江口外水下三角洲出现了侵蚀迹象^[8, 31]。因此, 砂—泥分界线西移的趋势与近期长江流域人类活动导致的入海泥沙锐减有关。二是北纬 $30^{\circ}10'$ 以南的砂—泥分界线有东移的趋势。三是原来舟山岛以东有“软泥(黏土)”带南、北断开(即南、北较细、断开带较粗)的现象(图 5), 而目前断开带趋于消失, $>7\phi$ 的样品南北连成一片(图 6)。该区域最细组分南北“断开”的现象在过去的很多文献中都提到^[29, 30, 32, 33]。被断开成南、北两块的最细组分被命名为“黏土软泥”^[32]、“软泥”^[29]或“黏土”^[30, 33], 现在统一提“泥质区”(即粉砂质黏土或黏土质粉砂), “软泥”一词不再使用^[15, 28]。本文的 25 和 26 号样正好取自原来的“断开”带(图 5), 它们的粒径并不比南、北两翼大。实际上 25 号点粒径位于南、北两翼之间, 26 号点甚至略细于南、北两翼; 两点平均值与南、北两翼几乎相等(图 4)。因此, “断开”带消失(至少对 $>7\phi$ 的样品是如此)的证据是较为充分。需要说明的是, 前人的研究有的可能不仅仅是基于表层样, 还包括浅剖和柱样的结果, 即沉积物的分布图可能是代表一定厚度的沉积层的综合特征。例如, 在前人的工作中, 只有秦蕴珊等^[30]明确指出了“表层沉积物”, 其它都没有这方面的说明^[29, 31, 32]。如前所述, 我们的“表层沉积物”代表沉积层上部 10 cm 的样品, 基本不包括含水量极高的最表层的新鲜“浮泥”。出现二、三种变化的原因可能与近期杭州湾南部的高强度人类活动导致的动力条件变化有关。这一区域的沉积物也主要来自长江。长江入海细颗

粒泥沙在冬季向南的沿岸流作用下向南搬运,并在杭州湾涨落潮流的共同作用下,在这一带沉积。原来“断开带”的存在可能与舟山群岛的峡道效应^[34]有关。近几年修建的舟山群岛连岛大桥工程无疑缩小了岛间通道的过水断面,从而削弱了杭州湾与外海的水体交换能力,导致流速降低和更有利于细颗粒泥沙落淤的环境。近期杭州湾南岸的大规模围垦和杭州湾跨海大桥的修建也缩小了杭州湾的纳潮量,从而产生类似的效应。

3.3 柱状沉积物粒径的沉积动力学意义

粉砂和黏土含量为主的沉积物组成特性表明泥质区沉积层至少在取样深度的几米厚度内是可以被侵蚀再悬浮成为悬沙被带向其它区域,即原来的沉积物“汇”在环境改变的驱动下可以转变成为沉积物的“源”。这一点对于认识今后在三峡工程等流域重大人类活动影响下长江入海泥沙继续减少^[6]导致的水下三角洲持续侵蚀以及与之相关的东海生态、环境和近海工程(例如海底埋藏管线)都有重要意义。垂向上频繁的粗细相间变化可能反映年一代际的沉积物来源和/或海洋动力条件的波动,其中位于砂—泥过渡带的粗细相间变化(不时有砂的加入,见图7中的1、8、27号点的组分比重%图)反映来自流域的细颗粒泥沙和来自陆架的残留砂在沉积历史上此消彼长的过程,这种此消彼长可能多半与气候变化有关。苏北启东嘴以东海域1号点平均粒径自下向上先变细后变粗的趋势可能反映了一段细颗粒泥沙来源逐渐增多而后又逐渐减少的沉积历史。有研究表明,1960s以前因流域人口增多、毁林加重而使长江入海泥沙呈增加趋势,而自那以后流域建坝导致入海泥沙减少^[35]。其它多数柱样(15、16、21、30点)表层或近表层出现沉积物粗化的现象可能与近期长江入海悬沙减少和悬沙变粗^[8]趋势有关。据长江水利委员会的监测资料,三峡工程蓄水以来的长江入海泥沙年通量(大通站)只有20世纪60年代均值的29%;1987年以来的大通年平均粒径有一定的变粗趋势($R = 0.27$, $P = 0.21$),尽管未达到0.05的显著水平(注:1986年以前和1987年以后的粒径分析方法不同,不宜对比)。Fan等^[10]于2006年在长江口泥质区取的柱状样(其位置在本文的15和16号柱样点之间)测年和粒径分析的结果也显示近十几年来(具体是1992—2006年)沉积物有一定的粗化趋势(伴随着沉积速率的下降趋势)。据该研究展示的高分辨率(0.5 cm间隔取样,达到季节时间尺度)粒径资料,沉

积物的 $Mz(\phi)$ 平均值在上世纪90年代初为7.1左右,而近几年(2002—2006)只有6.6左右。Gao最近在杭州湾口外取的几根数米长的柱样也具有最上部粗化的特点。

需指出:不同的柱样代表不同的沉积历史。例如,近百年长江口外水下三角洲的沉积速率为3~5 cm/a^[28,36],即15号柱状样(长度240 cm)只有几十年的沉积历史。而在30号柱样附近,近1500 a的沉积厚度仅200 cm,即沉积速率为0.13 cm/a左右。

3.4 泥质区“黏土”带的考证

在过去的一些文献中,研究区的泥质区中有南北两个“黏土(软泥)”带(见图5背景图),它们被南北连续的“粉砂和粉砂质软泥”^[29]或“粉砂”^[30,33]所包围。本文在这两个“黏土”带的采样分析(图5)表明:没有一个表层沉积物样的中值粒径或平均粒径(ϕ)>8,或黏土含量大于50%(表1),(更不用说依据我国《海洋调查规范》(2007)的>75%)即目前不存在所谓“黏土”带。肖尚斌等^[9]于2002年以及张晓东等^[14]于2003年在南北两个“黏土”带的采样分析结果也是如此。这种与前人研究结果的差异在理论上存在三种可能原因:一是长江入海泥沙急剧减少后^[8]可能导致“黏土”带被冲蚀(从而使表层沉积物变粗),或长江入海泥沙的变粗趋势使“黏土”带沉积物变粗。二是近期采用的激光粒度仪分析方法(基于悬浮颗粒物的体积大小原理)与过去的吸管法(基于泥沙沉降原理)对相同野外采集样品分析结果的差异。例如,程鹏等^[37]对激光粒度仪分析方法与传统的沉降法进行比较,认为激光粒度仪测量的黏土组分(>8 ϕ)含量较沉降法低(平均低40%),平均粒径较沉降法偏粗。三是对“黏土”沉积物样品的命名原则可能存在差异。例如,过去曾使用的苏联科学家命名原则^[39]中,把<0.01 mm 粒级含量占50%~70%的样品称为粉砂质黏土(软泥),把<0.01 mm 粒级含量>70%的样品名为黏土(质软泥);20世纪70年代后期到80年代,中国多数人采用的《海洋调查规范》(1975)^[40]则把砂和粉砂含量均小于20%的沉积物命名为黏土;而Shepard三角图分类法^[41](2007年我国颁布的《海洋调查规范》沿用此法)则把黏土组分含量>75%的样品命名为“黏土”。根据第一种命名法(苏联科学家命名原则),本研究区有6个表层样(样号14、22、26、31~33)属于“黏土(质软泥)”,其中3个样(14、22、31)位于前人的“软泥(黏土)”区,比过去少5个(图5);有趣的是,另外3个位于原来

的“断开带”及其向海的延伸部分,与上述工程影响下的沉积物“变细”区吻合。而根据《海洋调查规范》(1975)^[40]和Shepard^[41]的命名原则,本研究区没有一个样品可以称为“黏土”。假如根据程鹏等^[37]的实验结果推算,若是采用沉降法,本研究区可能有3个样(26、32、33)根据Shepard的命名法可称为黏土,若根据全长亮和高抒的结果,仍然只有这3个样品可能命名为黏土,但如上所述,这3个样都不在过去的“黏土(软泥)”区;而根据《海洋调查规范》(1975)仍然没有样品可以命名为黏土。因此,本研究与前人在“黏土(软泥)”区问题上的差异可能是上述三种原因的共同结果。

4 结语

研究区的表层沉积物呈现出东北部陆架残留砂和西南部以现代长江物源为主的泥(粉砂和黏土)沉积的明显格局,在两者的过渡区出现两种物源混合沉积的迹象。泥质区的表层沉积物粒径空间分布特点还支持了长江入海泥沙主要向南和东南方向运移的结论。砂—泥沉积区界线反映长江入海泥沙的向东扩散和沉积在南支(绝大部分长江来沙入海通道)口外限制在大约123°E以西(即距口门约100 km)范围,而在杭州湾南沿则限制在大约124°E以西区域。沉积物粒径特征还反映了近期人类活动的影响迹象。一是长江口外砂—泥界线相对于几十年前可能有向西退缩的趋势,它可能是与流域来沙锐减导致的水下三角洲蚀退有一定关系。二是泥质区柱样顶部沉积物有一定的粗化现象,可能与流域入海泥沙减少和入海悬沙有一定粗化趋势有关。三是杭州湾南部以东的表层沉积物出现一定的细化迹象,可能是近期一系列重大工程建设导致的湾内外水交换能力降低从而易于细颗粒悬沙淤积有关。柱样沉积物以粉砂和黏土为主的特性表明泥质区底床可进一步遭受侵蚀,这对于海底埋藏管线设施的安全是潜在的威胁。另一方面,侵蚀再悬浮的泥沙又可在一定程度上削弱流域入海泥沙减少对环境 and 生态系统的影响。研究表明,河口邻近海域底床沉积物对流域和沿海的重大人类活动可以产生较为敏感的反应。

致谢 野外观测航次由朱建荣教授带队,现场取样得到黄德坤等同学的帮助,粒度分析由河口海岸学国家重点实验室的吴瑞明老师完成,在此一并致谢!

参考文献 (References)

1 Yang S L, H Li, Ysebaert T, *et al.* Spatial and temporal variations in

- sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze delta: On the role of physical and biotic controls [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77, 657-671. 10.1016/j.ecss.2007.10.024
- 2 Eisma D. *Intertidal Deposits* [M]. Boca Raton: CRC Press, 1998: 459
- 3 Chen J Y, Zhu H F, Dong Y F, *et al.* Development of the Changjiang Estuary and its submerged delta [J]. *Continental Shelf Research*, 1985, 4: 47-56
- 4 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: 37-45
- 5 Liu J P, Xu K H, Li A C, *et al.* Flux and fate of Yangtze River sediment to the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2007, 85: 208-224
- 6 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, L10401, doi: 10.1029/2007GL029472
- 7 Yang S L, Liu Z, Dai S B, *et al.* Temporal variations in water resources in the Yangtze River (Changjiang) over the Industrial Period based on reconstruction of missing monthly discharges [J]. *Water Resources Research*, 2010a, 46, doi: 10.1029/2009WR008589
- 8 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*, 2010b, doi: 10.1016/j.gloplacha.2010.09.006.
- 9 肖尚斌, 李安春. 东海内陆架泥区沉积物的环境敏感粒径组分 [J]. *沉积学报*, 2005, 23(1): 122-129 [Xiao Shangbin, Li Anchun. A study on environmentally sensitive grain-size population in inner shelf of the East China Sea [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 122-129]
- 10 Fan Dejiang, Qi Hongyan, Sun Xiaoxia, *et al.* Annual lamination and its sedimentary implications in the Yangtze River delta inferred from High-resolution biogenic silica and sensitive grain-size records [J]. *Continental Shelf Research*, 2011, 31: 129-137
- 11 Wei Taoyuan, Chen Zhongyuan, Duan Lingyun, *et al.* Sedimentation rates in relation to sedimentary processes of the Yangtze Estuary, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71: 37-46
- 12 Wang Zhanghua, Saito Yoshiki, Hori Kazuaki, *et al.* Yangtze offshore, China: highly laminated sediments from the transition zone between subaqueous delta and the continental shelf [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2005, 62: 161-168
- 13 许淑梅, 张晓东, 翟世奎, 等. 长江口及其邻近海域表层沉积物粒度划分及变化规律研究 [J]. *海洋地质动态*, 2007, 23(2): 1-8 [Xu Shumei, Zhang Xiaodong, Zhai Shikui, *et al.* Division of granularity and characteristic of variation for the surface sediment in the Yangtze estuary and its adjacent waters [J]. *Marine Geology Letters*, 2007, 23(2): 1-8]
- 14 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 长江口外近海表层沉积物粒径的级配特性及其意义 [J]. *中国海洋大学学报*, 2007, 37(2): 328-334 [Zhang Xiaodong, Zhai Shikui, Xu Shumei. The grain size fractions distribution characteristics and their significance of the surface sediments on the adjacent sea area off the Changjiang Estuary [J]. *Period-*

- ical of Ocean University of China ,2007 ,37(2) : 328-334]
- 15 张瑞,汪亚平,高建华,等. 长江口泥质区垂向沉积结构及其环境指示意义[J]. 海洋学报,2008,30(2):80-91 [Zhang Rui, Wang Yaping, Gao Jianhua, *et al.* The vertical sedimentary structure and its implications for environmental evolutions in the Changjiang Estuary in China [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008, 30(2):80-91]
- 16 Folk R L, Ward W C. Brazos river bar: a study in the signification of grain size parameters [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1957, 27: 3-27
- 17 Trefethen J M. Classification of Sediments [J]. *American Journal of Science*, 1950, 248: 55-62
- 18 King C A M. *Beaches and Coasts*, 2nd ed [M]. London: Edward Arnold, 1972: 570
- 19 Gao S, Collins M. The use of grain size trends in marine sediment dynamics: a review [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2001, 19(3): 265-271
- 20 高抒. 沉积物粒径趋势分析: 原理与应用 [J]. 沉积学报, 2009, 27(5): 826-836 [Gao Shu. Grain size trend analysis: Principle and applicability [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(5): 826-836]
- 21 任明达,王乃梁. 现代沉积环境概论 [M]. 北京: 科学出版社, 1985: 8-26 [Ren Mingda, Wang Nailiang. *Generality of Modern Sedimentation Environment* [M]. Beijing: Science Press, 1985: 8-26]
- 22 郭志刚,杨作升,范德江,等. 长江口泥质区的季节性沉降效应 [J]. 地理学报, 2003, 58(4): 591-595 [Guo Zhigang, Yang Zuosheng, Fan Dejiang, *et al.* Seasonal sedimentary effect on the Changjiang estuary mud area [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 591-595]
- 23 杨世伦. 海岸环境和地貌过程导论 [M]. 北京: 海洋出版社, 2003: 240 [Yang Shilun. *An Introduction to Coastal Environments and Geomorphological Processes* [M]. Beijing: China Ocean Press, 2003: 240]
- 24 Komar P D. *Beach Processes and Sedimentation* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1976: 429
- 25 杨世伦. 长江口沉积物粒度参数的统计规律及其沉积动力学解释 [J]. 泥沙研究, 1994, (3): 23-31 [Yang Shilun. Statistic features for grain-size parameters of the Yangtze River estuary and their hydrodynamic explanation [J]. *Journal of Sediment Research*, 1994, (3): 23-31]
- 26 Emery K O. Relict sediments on continental shelves of world [J]. *AAPG Bulletin*, 1968, 52(3): 445-464
- 27 沈华梯. 东海陆架残留沉积时代和成因模式 [J]. 海洋学报, 1985, 7(1): 67-77 [Shen Huati. The time and genetic model of the relict sediment on the continental shelf of East China Sea [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(1): 67-77]
- 28 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 off the changjiang (Yangtze River) estuary and its influential factors [J]. *Quaternary Sciences*, 2007, 27(5): 690-699]
- 29 秦蕴珊,郑铁民. 东海大陆架沉积物分布特征的初步探讨 [C]// 中国科学院海洋研究所海洋地质研究室编. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 1982: 31-51 [Qin Yunshan, Zheng Tiemin. A study of distribution pattern of sediments on the continental shelf of the East China Sea [C]// Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Academia Sinica. Ed. *The Geology of the Yellow and East China Seas*. Beijing: Science Press, 1982: 31-51]
- 30 秦蕴珊,赵一阳,陈丽蓉,等. 东海地质 [M]. 北京: 科学出版社, 1987: 29 [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong, *et al.* *Geology of the East China Sea* [M]. Beijing: Science Press, 1987: 290]
- 31 李鹏,杨世伦,戴仕宝,等. 近10年来长江口水下三角洲的冲淤变化——兼论三峡工程蓄水的影响 [J]. 地理学报, 2007, 62(7): 707-716 [Li Peng, Yang Shilun, Dai Shibao, *et al.* Accretion/erosion of the subaqueous delta at the Yangtze Estuary in recent 10 Years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, 62(7): 707-716]
- 32 秦蕴珊. 中国陆棚海的地形及沉积类型的初步研究 [J]. 海洋与湖沼, 1963, 5(1): 71-85 [Qin Yunshan. Preliminary study on the terrain and type of sediment in the shelf sea of China [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1963, 5(1): 71-85]
- 33 Saito Y, Yang Z S. Historical change of the Huanghe (Yellow River) and its impact on the sediment budget of the East China Sea [C]// Iseki K, Koike I, Tsunogai S, *et al.* Eds. *Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and its Related Substances in the Coastal Ocean Atmosphere System*. Sapporo: Hokkaido University, 1994: 7-12
- 34 蒋国俊,陈吉余,姚炎明. 舟山群岛岛道潮流动力沉积特性 [J]. 海洋学报, 1998, 20(2): 139-147 [Jiang Guojun, Chen Jiayu, Yao Yanming. Characteristics of dynamic sedimentation on tidal flat in channels of Zhoushan Islands [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1998, 20(2): 139-147]
- 35 Yang S L, Zhao Q Y, Belkin I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze River and the influences of the human activities [J]. *Journal of Hydrology*. 2002, 263: 56-71
- 36 张瑞,潘少明,汪亚平,等. 长江河口水下三角洲²¹⁰Pb分布特征及其沉积速率 [J]. 沉积学报, 2009, 27(4): 704-713 [Zhang Rui, Pan Shaoming, Wang Yaping, *et al.* Sedimentation rates and characteristics of radionuclide ²¹⁰Pb at the subaqueous delta in Changjiang Estuary [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009 27(4): 704-713]
- 37 程鹏,高抒,李徐生. 激光粒度仪测试结果及其与沉降法、筛析法的比较 [J]. 沉积学报, 2001, 19(3): 449-455 [Cheng Peng, Gao Shu, Li Xusheng. Evaluation of a wide range laser particle size analyses and comparison with pipette and sieving methods [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2001, 19(3): 449-455]
- 38 仝长亮,高抒. 江苏潮滩沉积物激光粒度仪与移液管一筛析分析结果的对比 [J]. 沉积学报, 2008, 26(1): 46-53 [Tong Changliang, Gao Shu. Comparison between grain size data by laser and pipette-sieve methods for tidal flat sediments on Jiangsu Coast [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2008, 26(1): 46-53]

- 39 别兹鲁柯夫 П Л, 穆尔德玛 И О, 赛多娃 Х М 等. 论中国东东北部的沉积物及底栖动物区系[J]. 海洋与湖沼, 1958, 1(3): 269-291 [Безруков П Л, МурДема И О, Дова гонки Х М, *et al.* Research on the sediment and the fauna of benthonic animal in the northern East China Sea [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1958, 1(3): 269-291]
- 40 国家海洋局. 海洋调查规范 [C]. 1975 [State Oceanic Administration. Specifications for Oceanographic Survey [C]. 1975]
- 41 Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, 24: 151-158

Recent Spatial Pattern and Temporal Variation in Sediment Grain Size in the Inshore Area Adjacent to the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay

LUO Xiang-xin YANG Shi-lun ZHANG Wen-xiang ZHANG Jing

(State Key Lab of Estuarine & Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062)

Abstract: Grain size of sediment in littoral area of estuaries is vulnerable to human-induced changes in riverine sediment supply and coastal hydrodynamics. In recent years, sediment from the Yangtze River to the sea has drastically decreased, which has resulted in erosion in the subaqueous delta. Meanwhile, many coastal engineering structures have been built at the mouth of the Hangzhou Bay. Less has been known of the sedimentary impacts in the inshore area adjacent to the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay. To examine the spatial pattern of and recent changes in sediment grain size in the littoral area off the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay, we obtained 33 surface sediment samples using a box sampler and 7 sediment cores (1.4 to 4.8 m in length) using a vibro piston corer in April 2008. These samples were analyzed for grain size parameters in the laboratory using a laser particle size analyzer. Comparison of grain size was made between the present result and results of historical periods. The results include: 1) In agreement with the results of historical periods, the present study showed an overall spatial pattern of coarse sediment in the east (sand) and fine-grained sediment in the west (mud). Nevertheless, in contrast to the historical results, the borderline between the sand and mud areas has retreated landward (or westward) for 10 to 30 km in the northern portion (off the Yangtze Estuary and the main Hangzhou Bay) whereas it has advanced seaward (or eastward) for up to 50 km in the southern area (south of the Zhoushan Archipelago). 2) In comparison with the results of historical periods that the longshore distributed mud (clay) zone was disconnected at the east of the Zhoushan Archipelago, the spatial pattern of surface sediment grain size in the present study indicated a consecutive longshore mud zone, which suggests the historical disconnection of the longshore mud (clay) zone at the east of the Zhoushan Archipelago has disappeared at least for surface sediment. This change was mainly attributed to the construction of large bridges across the channels between the islands of the Zhoushan Archipelago. The piers of these bridges were considered to have reduced the water and sediment exchange between the Hangzhou Bay and the East China Sea and weakened the currents at the previous disconnecting area of the longshore mud (clay) zone. 3) The results of grain size trend analysis of surface sediment along the longshore mud zone support the hypothesis that the sediments derived from the Yangtze River have been mainly transported southward and southeastward. 4) The core sediments, sampled successfully in the mud zone (we failed to sample core sediment in the sand zone), are mainly composed of silt and clay. Most of the cores show significant vertical fluctuations of grain size. These vertical fluctuations seem to reflect historical events of climate changes which have resulted in long-term changes in riverine sediment supply and ocean hydrodynamics. The surface sediment of the cores sampled in the recent erosion area (recognized by other authors based on bathymetric comparison) indicates a coarsening trend, which is considered to have resulted from the recent drastic decrease in riverine sediment supply. We conclude that the sediments in the littoral area of the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay are susceptible to anthropogenic and climate impacts both from the catchment and the coastal region.

Key words: sediment; grain size; anthropogenic impact; climate change; Yangtze Estuary; Hangzhou Bay; East China Sea