

doi:10.3799/dqkx.2013.074

长江口及邻近海域现代沉积速率及其对 长江入海泥沙去向的指示意义

王 昕^{1,2}, 石学法^{2*}, 王国庆³, 乔淑卿², 刘 涛²

1. 鲁东大学地理与规划学院, 山东烟台 264025

2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室, 国家海洋局第一海洋研究所, 山东青岛 266061

3. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

摘要: 对长江口及附近海域的 16 根重力柱样进行了 ²¹⁰Pb 沉积速率测试, 结合以往成果, 揭示了该区现代沉积速率分布格局, 对其控制因素以及其对认识长江入海泥沙去向的指示意义进行了探讨。沉积速率最高值分布在南支口外、杭州湾口群岛北部的前三三角洲地区, 最高可达 6.3 cm/a, 总体上在 3 cm/a 以上; 次高值分布在杭州湾北部, 约 1.7~3.0 cm/a, 南部略低, 约 0.4~1.0 cm/a; 长江口水下负地形北部海域存在小片沉积速率较高的区域, 最高值达 2.58 cm/a; 低值主要分布在苏北辐射沙洲、过渡沉积区以及浅海陆架的大片区域, 基本保持在 1 cm/a 以下。研究表明, 长江泥沙出口门后主要在水下三角洲地区进行了堆积, 其次有相当部分在涨潮流顶托下进入杭州湾, 进入杭州湾南部的泥沙又在落潮流作用下经杭州湾南侧向舟山海域方向输运; 长江入海物质向外海的扩散基本被控制在 123°E 以西, 苏北辐射沙洲、过渡沉积区以及浅海陆架的大片区域缺乏现代长江物质供应; 长江悬浮泥沙对研究区东北部陆架区影响较小, 废黄河口被侵蚀物质和黄海悬浮物质为其较高沉积速率的主要贡献者。

关键词: 长江水下三角洲; ²¹⁰Pb; 沉积速率; 输沙; 海洋学。

中图分类号: X141

文章编号: 1000-2383(2013)04-0763-13

收稿日期: 2012-12-20

Sedimentation Rates and Its Indication to Distribution of Yangtze Sediment Supply around the Yangtze (Changjiang) River Estuary and Its Adjacent Area, China

WANG Xin^{1,2}, SHI Xue-fa^{2*}, WANG Guo-qing³, QIAO Shu-qing², LIU Tao²

1. Ludong University, Institute of Geography & Planning, Yantai 264025, China

2. Key laboratory of State Oceanic Administration for Marine Sedimentology & Environmental Geology, First Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China

3. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Based on ²¹⁰Pb data of 16 gravity core samples and from the previous study, the spatial pattern of sedimentation rates and its indication to distribution of Yangtze sediment supply in the Yangtze River estuary and its adjacent area were examined. The high accumulation rates were observed at the subaqueous delta off the south branch with the maximum value of 6.3 cm/a, generally above 3 cm/a. The second highest values distribute on the Hangzhou bay, about 1.7–3.0 cm/a in north and much lower in south (0.4–1.0 cm/a). Relative higher sedimentation rates, about 2.58 cm/a, appear in the northwest of study area. The radial sand ridges along the north Jiangsu coastal line, delta-shelf transitional zone and continental shelf were characterized by low sedimentation rates (<1 cm/a), due to the strong hydrodynamic setting and lack of modern Changjiang material supply. As revealed by this study, a large amount of Yangtze sediment load is deposited around the subaqueous delta and the north Hangzhou Bay. The dispersion of modern Yangtze sediment to East China Sea is constrained to the west of 123°E. The relatively high sedimentation rate in north continental area is mainly contributed by sediment eroded from the abandoned Yellow

基金项目: 海洋公益性行业科研专项(No. 200805063); 中国科学院海洋地质与环境重点实验室开放基金(No. MGE2012KG09); 国家自然科学基金项目(No. 41076023); 海上试验场建设技术研究和原型设计(No. 200905024)。

作者简介: 王昕(1982-), 女, 博士研究生, 海洋地质专业。

* **通讯作者:** 石学法, E-mail: xfshi@fio.org.cn

delta and suspended materials transported by Yellow Sea longshore currents.

Key words: Yangtze Estuary; ^{210}Pb ; sedimentation rate; sediment supply; oceanography.

长江作为世界级大河,平均每年向河口地区输送 4 亿多吨泥沙和大约 921 km^3 的淡水,在河口地区形成了规模巨大的现代三角洲—滨浅海沉积体系 (Milliman and Meade, 1983; Yang *et al.*, 2006). 长江水下三角洲及邻近海域现代沉积速率空间分布研究,对于阐述现代长江物质在河口—陆架地区的分布特征及扩散—输运趋势,阐明附近海域的各种动力因素的作用规律,揭示现代三角洲的地貌演变等具有重要的科学意义.

长江口及邻近海域的现代沉积速率的研究主要基于历史海图比较法和放射性同位素测试法 (^{210}Pb 或 ^{137}Cs) (Su and Hu, 2002; Yang *et al.*, 2003; 夏小明等, 2004; 段凌云等, 2005; 李鹏等, 2007; Wei *et al.*, 2007; 张瑞等, 2009; 王安东等, 2010). DeMaster *et al.* (1985) 利用 ^{210}Pb 方法获取了长江水下三角洲 122.5°E 、 31°N 附近的沉积速率,约 $3\sim 5\text{ cm/a}$. 随后,中外研究者对长江水下三角洲及其邻近地区进行了大量的 ^{210}Pb 沉积速率测定工作. Su and Hu (2002) 对长江口外东海陆架区的现代沉积速率分布、物质来源、输运做了细致研究,但缺少对水下三角洲区域的详细研究. 段凌云等 (2005) 揭示了水下三角洲地区 $25\sim 30\text{ m}$ 水深, $122^\circ 30'\text{N}$ 、 $31^\circ 00'\text{E}$ 附近为泥质区沉积中心,沉积速率高达 6.3 cm/a . 夏小明等 (2004) 研究表明紧邻南汇嘴的杭州湾口北部浅滩地区沉积速率较高,大约为 3 cm/a . 由于 ^{210}Pb 测定沉积速率方法的局限性 (Appleby and Oldfield, 1978; 项亮, 1997), 水下三角洲波基面 (约 $10\sim 15\text{ m}$ 水深) 以浅区域的沉积速率测定更倾向基于海图比较法 (Wei *et al.*, 2007). Wei *et al.* (2007) 综合放射性同位素测试和 DEM 模型的研究表明,水下三角洲的沉积中心位于波基面以上的三角洲前缘地区.

综上所述,以往大量研究主要集中于水下三角洲,尤其是前三三角洲地区,受长江入海物质影响的三角洲邻近海域 (包括杭州湾、苏北海区及长江口外围海区) 的相关研究较弱,为揭示现代长江入海物质在河口—陆架地区的空间分布、扩散、输运特征,揭示长江口物质交换的主要界面,探讨废黄河口被侵蚀物质及黄海悬浮物质对附近区域的贡献,仍需要从更大范围对研究区的沉积速率做深入的研究. “我国近海海洋综合调查与评价专项课题” (“908”专项) 在

长江水下三角洲、杭州湾、苏北辐射沙洲以及浅海陆架区获得了 16 根重力柱状样,本文对其进行了 ^{210}Pb 沉积速率测定,结合已有现代沉积速率研究成果,将海图法对比结果和放射性同位素测试结果进行综合探讨.

1 研究区域概况

研究区域涵盖长江水下三角洲及相邻的苏北辐射沙洲、杭州湾及内陆架部分区域 (图 1). 该区的水动力条件较为复杂 (陈吉余等, 1988; 沈焕庭和潘定安, 2001; Hori *et al.*, 2002; Uehara *et al.*, 2002), 包括长江冲淡水、江苏沿岸流、台湾暖流及潮流系统. 台湾暖流顺 $40\sim 50\text{ m}$ 等深线以外水下负地形北上,使长江冲淡水向外海的扩散被限制在大概 123°E 以西地区 (潘定安等, 1988; 郭志刚等, 2003; Wang *et al.*, 2011). 涨潮流顶托下长江物质进入南汇嘴附近的杭州湾北部区域 (胡方西等, 2002; 陈沈良等, 2009). 杭州湾北部沉积物较南部偏细,主要以粉砂为主,苏北辐射沙洲、浅海陆架区和过渡沉积区沉积物偏粗,以砂、粉砂质砂、砂质粉砂组成 (国家海洋局第一海洋研究所, 2011. 长江三角洲演变规律及重大事件的沉积记录与可持续发展研究报告). 水下三角洲前缘主要分布波基面 (水深 $10\sim 15\text{ m}$) 以上区域,包括潮滩、分流河道、河口沙坝浅滩以及前缘斜坡等地貌部位,沉积物主要为粉砂质砂、砂质粉砂、砂和粉砂也有一定分布,波浪引起的再悬浮作用较为强烈 (陈吉余等, 1988). 前三三角洲,涵盖了前缘斜坡的大部分,主要分布在 $10\sim 15\text{ m}$ 等深线到 40 m 等深线之间区域,以均质粉砂沉积为主,除了极端天气情况 (如风暴潮) 下,基本不受波浪作用 (Chen *et al.*, 2004).

19 世纪末到 20 世纪启东诸沙并岸,长江主泓由北支入海改为由南支入海,北支分流量长期处于 5% 以下,长江输水输沙主要通过南支入海 (沈焕庭, 2001; 胡静等, 2007). 长江每年向河口地区输送大约 4 亿多吨泥沙,大概有 31% 和 40% 的长江物质分别输入到长江水下三角洲和杭州湾地区,其中北支口外的水下三角洲地区占 12% 左右,仅有 11% 左右能够越过杭州湾口岛屿地形南下 (沈焕庭和潘定安, 2001).

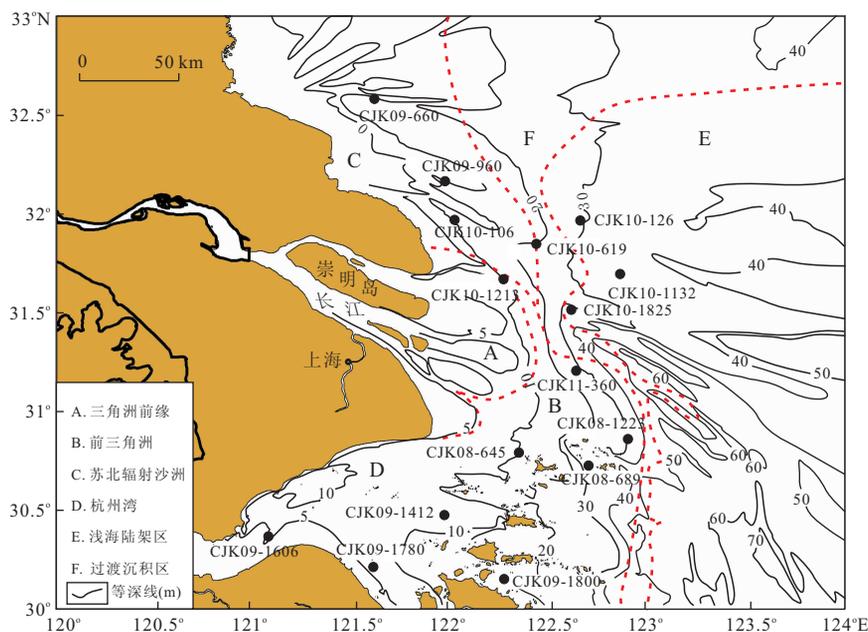


图1 研究区地理位置及柱状样分布(研究区分区修改自黄慧珍等,1996;Chen *et al.*, 2000)

Fig. 1 Geographical location of the study area and the sampling sites of gravity cores

2 材料和方法

国家海洋局第一海洋研究所 2004—2008 年间执行“我国近海海洋综合调查与评价专项”(“908”专项)课题过程中在长江水下三角洲及其附近海域获取了 16 根重力柱状样(图 1),进行岩心岩性描述后,以 2 cm 为间距取样。CJK08、CJK09 和 CJK10 系列孔的²¹⁰Pb 活度测试在国家海洋局第三海洋研究所完成,处理过程参照曾文义等(1983)和苏贤泽等(1984),分析仪为 8 通道 alpha 谱仪(7200-08, Canberra, 美国),使用中国原子能科学研究院提供的²⁰⁹Po 示踪剂。CJK11 系列孔由厦门大学海洋地质系完成测试,样品用 HPGe γ 能谱仪测量。

3 研究结果

3.1 ²¹⁰Pb 比活度垂向分布与沉积速率

文中均利用 CIC (constant initial concentration) 模式计算柱状样的沉积速率(叶崇开, 1991; 万国江, 1997), 衰变方程 $N_H = N_0 e^{-\lambda H/S}$, N_H 为深度 H 处对应放射性活度, N_0 为初始放射性活度, λ 为²¹⁰Pb 衰变常数, 取 0.031 a^{-1} , S 为沉积速率。对于各钻孔均选择过剩²¹⁰Pb 比活度与深度的对数相关性较好的段落来计算沉积速率, 各柱样底部已检测不到过剩²¹⁰Pb, 认为已经测到底了。所有测试数

据均已经在图 2 上表示, 不参与计算部分以空心点区别表示, 16 根岩心的沉积速率计算结果见图 2。

CJ08-645 柱状样表层 0~15 cm 可能由于底栖生物扰动作用²¹⁰Pb 活度异常, 表层 7 cm 没有检测出²¹⁰Pb_{ex}; 15~75 cm 之间²¹⁰Pb_{ex} 活度值随深度呈明显的指数衰减趋势; 75 cm 以下层位²¹⁰Pb_{ex} 活度值分布规律性差。选用中间段 5~75 cm 间的²¹⁰Pb_{ex} 活度值进行沉积速率计算, 线性拟合结果表明 $N_H = 2.8925e^{-0.0331H}$, $R^2 = 0.9647$, 沉积速率约 0.9 cm/a(图 2)。其他岩心计算情况不一——详述。

3.2 基于²¹⁰Pb(或者¹³⁷Cs)现代沉积速率空间分布

三角洲前缘地区由于沉积过程的不连续, 或者沉积物较粗, 不适合利用放射性核素进行现代沉积速率的测定(Robbins and Edgington, 1975; Appleby and Oldfield, 1978; 万国江, 1997; Wei *et al.*, 2007), 因此本文所测试以及搜集的²¹⁰Pb 和¹³⁷Cs 的现代沉积速率值较少覆盖到水下三角洲前缘地区(图 3)。测试数据主要基于²¹⁰Pb 沉积速率, 所搜集的现代沉积速率数据也以²¹⁰Pb 沉积速率居多, 考虑到便于对比, 故均采用了²¹⁰Pb 的测试结果, 缺少²¹⁰Pb 测试结果的钻孔采用了¹³⁷Cs 数据以供参考。所有现代沉积速率数据见表 1。其中包括本论文新测试的 16 个以及搜集的 77 个, 共 93 个现代沉积速率数据。在此基础上绘制了研究区沉积速率等值线分布图(图 3)。

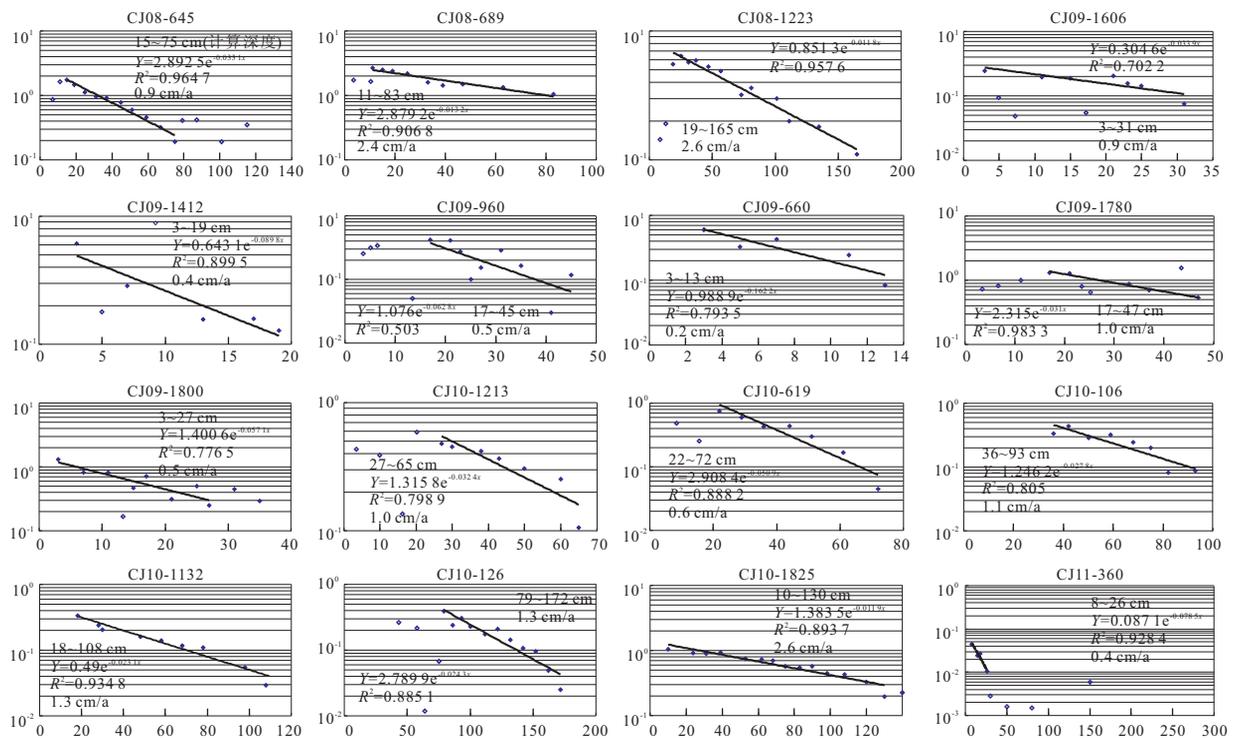


图 2 过剩 ^{210}Pb ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$)钻孔分布及沉积速率(横坐标 x 为钻孔深度,单位:cm;纵坐标 y 为 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$,单位: $\text{Bq} \cdot \text{g}^{-1}$)

Fig. 2 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activity distribution and sedimentation rates in 16 gravity cores

基于 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 测试得到的沉积速率等值线分布(图 3)表明,沉积速率最高值分布在南支口外、杭州湾口群岛北部的前三角洲地区,最高可达 6.3 m/a,沉积速率总体上在 3 cm/a 以上,向南至杭州湾口浅海区沉积速率逐渐降低;次高值分布在杭州湾北部,约 1.7~3.0 cm/a,杭州湾南部略低,约 0.4~1 cm/a;另外,本次研究发现在长江口水下负地形东北部、启动嘴东部海域存在小片沉积速率较高的区域,最高值达 2.58 cm/a。

沉积速率低值区,主要分布在苏北辐射沙洲、过渡沉积区以及浅海陆架的大片区域,沉积速率基本都保持在 0.5 cm/a 以下(图 3,图 4),有些站位沉积速率为 0,其中在过渡沉积区与浅海陆架交界区域附近出现 5 个沉积速率较高的站位,1.1~2.5 cm/a。

杭州湾口群岛附近地区沉积速率不稳定变化,高低变化幅度较大,最低可达 0.3 cm/a,最高在泗礁水道附近约为 3.7 cm/a。水下三角洲前缘区 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 放射性同位素测试所得沉积速率普遍较低,不同地貌部位,如水深较浅的潮滩、分流河道、河口沙坝等地貌部位,沉积速率变化较大,0.2~1.0 cm/a(图 3)。

4 讨论

Wei *et al.* (2007) 利用 1958 年和 2000 年的海图对比揭示水下三角洲前缘区水下沙坝和前缘斜坡地区以堆积为主(表 2),沉积速率分别约为 1.7~8.3 cm/a 和 5.0 cm/a,分流河道堆积和侵蚀作用基本相当。放射性同位素方法在水下沙坝和前缘斜坡地区获得的沉积速率数据较少,值偏低 1.36~1.7 cm/a(SC02、SC07),不能很好反映沉积过程的实际情况(李从先等,1999;Wei *et al.*, 2007)。两者在前三角洲地区获得的沉积速率值基本相当,均显示较高值(图 3,表 1,表 2)。

综合海图对比和同位素测试结果,整个南支口外到 123°E 以西、杭州湾口群岛区以北,包括水下沙坝区、水下三角洲前缘斜坡、前三角洲,为整个研究区沉积速率最高的地区。

研究区现代沉积速率空间分布格局表明,长江携带泥沙出河口后主要在水下三角洲地区进行了堆积,其次有相当部分入海物质进入杭州湾北部,造成水下三角洲和杭州湾北部相对较高的沉积速率。相关研究也支持这一结论,长江每年向河口地区输送大约 4 亿多吨泥沙,大概有 10%、19%、40% 以及 11% 的长江物质分别在大通—徐六泾、南支口外的

表1 沉积速率数据汇总表(基于 ^{210}Pb 或者 ^{137}Cs)Table 1 Date set of sedimentation rates derived by ^{210}Pb and ^{137}Cs

站位号	经度(°)	纬度(°)	沉积速率(cm/a)	测试方法	数据来源
CJ08-645	122.34	30.78	0.9	^{210}Pb	本论文
CJ08-689	122.70	30.70	2.4	^{210}Pb	本论文
CJ08-1223	122.90	30.82	2.6	^{210}Pb	本论文
CJ09-1606	121.06	30.37	0.9	^{210}Pb	本论文
CJ09-1412	121.99	30.48	0.4	^{210}Pb	本论文
CJ09-960	121.96	32.14	0.5	^{210}Pb	本论文
CJ09-660	121.64	32.54	0.2	^{210}Pb	本论文
CJ9-1780	121.61	30.18	1	^{210}Pb	本论文
CJ09-1800	122.24	30.15	0.5	^{210}Pb	本论文
CJ10-1132	122.84	31.68	1.3	^{210}Pb	本论文
CJ10-1213	122.24	31.65	1.0	^{210}Pb	本论文
CJ10-619	122.43	31.82	0.6	^{210}Pb	本论文
CJ10-106	122.01	31.95	1.1	^{210}Pb	本论文
CJ10-126	122.65	31.95	1.3	^{210}Pb	本论文
CJ10-1825	122.62	31.49	2.6	^{210}Pb	本论文
CJ11-360	122.62	31.19	0.4	^{210}Pb	本论文
CJ11-631	122.76	30.97	2.0	^{137}Cs	王国庆(未发表)
H1	121.89	30.67	1.7	^{210}Pb	胡方西等,2002
H2	122.51	30.85	3.5	^{210}Pb	胡方西等,2002
H3	122.38	30.92	>2	^{210}Pb	胡方西等,2002
H4	122.26	30.99	>2	^{210}Pb	胡方西等,2002
H5	122.59	31.00	>2	^{210}Pb	胡方西等,2002
H6	122.51	30.99	5.4	^{210}Pb	胡方西等,2002
H7	122.77	30.99	3.1	^{210}Pb	胡方西等,2002
H8	122.88	30.99	0.5	^{210}Pb	胡方西等,2002
H9	122.52	31.25	1	^{210}Pb	胡方西等,2002
H10	122.52	31.31	0.5	^{210}Pb	胡方西等,2002
H11	122.22	31.61	0.2	^{210}Pb	胡方西等,2002
H12	122.24	31.82	0	^{210}Pb	胡方西等,2002
H13	122.52	31.75	0	^{210}Pb	胡方西等,2002
H14	122.52	31.51	0	^{210}Pb	胡方西等,2002
CR14	122.83	31.09	0.3	^{210}Pb	庄克琳,2005
CR16	122.98	31.09	0.3	^{210}Pb	庄克琳,2005
C11	121.45	31.56	0.9	^{210}Pb	王永红,2003
C12	121.61	31.38	0.4	^{210}Pb	王永红,2003
C2	121.73	31.27	0.2	^{210}Pb	段凌云等,2005
C3	121.73	31.27	0.2	^{210}Pb	段凌云等,2005
C4	121.89	31.51	0.8	^{210}Pb	段凌云等,2005
C5	121.89	31.51	0.8	^{210}Pb	段凌云等,2005
C6	121.89	31.52	0.5	^{210}Pb	段凌云等,2005
C7	121.87	31.31	1.0	^{210}Pb	段凌云等,2005
C8	121.86	31.12	1.9	^{210}Pb	段凌云等,2005
Y5	122.44	31.15	2	^{210}Pb	段凌云等,2005
Y6	122.56	31.10	2.2	^{210}Pb	段凌云等,2005
Y7	122.73	31.03	6.3	^{210}Pb	段凌云等,2005
Y8	122.80	31.01	0.8	^{210}Pb	段凌云等,2005
HN108	122.67	30.85	0.3	^{210}Pb	夏小明等,2004
LH80	122.61	30.80	0.3	^{210}Pb	夏小明等,2004
TX259	121.69	30.65	3.0	^{210}Pb	夏小明等,2004
YS1	121.97	30.63	1.4	^{210}Pb	夏小明等,2004
YS2	122.02	30.62	1.0	^{210}Pb	夏小明等,2004
YS3	122.21	30.55	0.3	^{210}Pb	夏小明等,2004
YS4	122.26	30.55	0.4	^{210}Pb	夏小明等,2004

续表 1

站位号	经度(°)	纬度(°)	沉积速率(cm/a)	测试方法	数据来源
YS5	122.19	30.59	1.6	^{210}Pb	夏小明等,2004
YS6	122.27	30.60	1.3	^{210}Pb	夏小明等,2004
FG17	122.20	30.87	3.0~3.1	^{137}Cs	夏小明等,2004
G8004	122.49	30.99	5.4	^{210}Pb	Demaster <i>et al.</i> ,1985
G8005	122.74	30.99	3.1	^{210}Pb	Demaster <i>et al.</i> ,1985
G8000	122.49	30.89	3.5	^{210}Pb	Demaster <i>et al.</i> ,1985
ZM11	122.62	30.69	3.7	^{210}Pb	刘升发等,2009
chj01	122.75	30.83	2.8	^{210}Pb	杨作升和陈晓辉,2007
E4	122.62	31.00	3.5	^{210}Pb	杨作升和陈晓辉,2007
CJ43	122.85	31.05	0.2	^{210}Pb	冯旭文等,2009
18	122.62	31.02	2.6	^{210}Pb	Liu and Fan,2010
SC02	122.07	31.00	1.4	^{210}Pb	张瑞等,2009
SC03	122.17	31.10	1.7	^{137}Cs	王安东等,2010
SC04	122.20	31.00	1.7	^{210}Pb	张瑞等,2009
SC05	122.27	31.00	3.9	^{210}Pb	张瑞等,2009
SC06	122.34	31.00	1.9	^{137}Cs	王安东等,2010
SC07	122.38	31.00	4.1	^{210}Pb	张瑞等,2009
SC08	122.43	31.00	2.4	^{210}Pb	张瑞等,2009
SC09	122.50	31.00	3.4	^{210}Pb	张瑞等,2009
SC10	122.50	30.93	3.1	^{210}Pb	张瑞等,2009
SC11	122.50	30.84	4.0	^{210}Pb	张瑞等,2009
Y16	122.83	31.25	0.2	^{137}Cs	Su and Hu,2002
G1	122.83	30.84	1.6	^{210}Pb	Jin <i>et al.</i> ,2010
499-13	122.84	30.01	0.2	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-14	122.84	30.33	1.1	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-15	122.95	30.67	0.5	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-16	122.83	30.83	1.8	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-17	122.27	30.83	0.1	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-27	123.33	31.00	0.2	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-28	123.00	31.00	0.1	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-29	122.83	31.00	0.6	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-31	122.67	31.17	0.7	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-32	122.67	31.33	0.4	^{137}Cs	Su and Hu,2002
499-37	123.00	31.33	1.0	^{137}Cs	Su and Hu,2002
MJ114	122.42	30.67	3.0	^{210}Pb	夏小明等,1999
DS2	122.23	30.28	2.6	^{210}Pb	夏小明等,1999
DEB4	123.01	30.36	0.0	^{210}Pb	Liu <i>et al.</i> (2006)
DEB5	122.90	30.36	2.1	^{210}Pb	Liu <i>et al.</i> (2006)
PN-11	123.66	30.61	0.4	^{210}Pb	Oguri <i>et al.</i> (2003)
PN-12	123.08	31.20	1.8	^{210}Pb	Oguri <i>et al.</i> (2003)

水下三角洲地区、杭州湾及其近海以及浙闽沿海近岸区域落淤(沈焕庭和潘定安,2001)。长江泥沙进入河口区后,水动力条件发生改变,大量粗颗粒泥沙在口门附近区域发生快速沉积,部分细颗粒以悬浮状态被搬运至水深更深的三角洲前缘斜坡—前三角洲沉积(Reading,1978)。大量长江泥沙输入造成南支口外水下三角洲前缘和前三角洲区域的年均淤积厚度达 10.9~13.7 mm,杭州湾北部可达 6.8 mm/a(沈焕庭和潘定安,2001)。

123°E 以东陆架区沉积速率较低,基本低于

0.5 cm/a,表明该区缺乏现代长江物质供应,长江入海物质向外海的扩散基本被控制在 123°E 以西,并通过杭州湾口岛屿之间的峡道向南输送至浙闽沿岸。悬浮体浓度、长江冲淡水分布以及表层沉积物粒度、矿物、孢粉、有孔虫分布等方面的研究均支持这一结果。长江悬浮物质向外海的扩散,被限制在长江冲淡水和陆架海水交汇的锋面附近(122.5°~123°E)及其以西地区(潘定安等,1988;Wang *et al.*,2011),很少向 123°15'E 以东地区海域输运(郭志刚等,2003)。悬沙浓度等值线在 122°~123°E

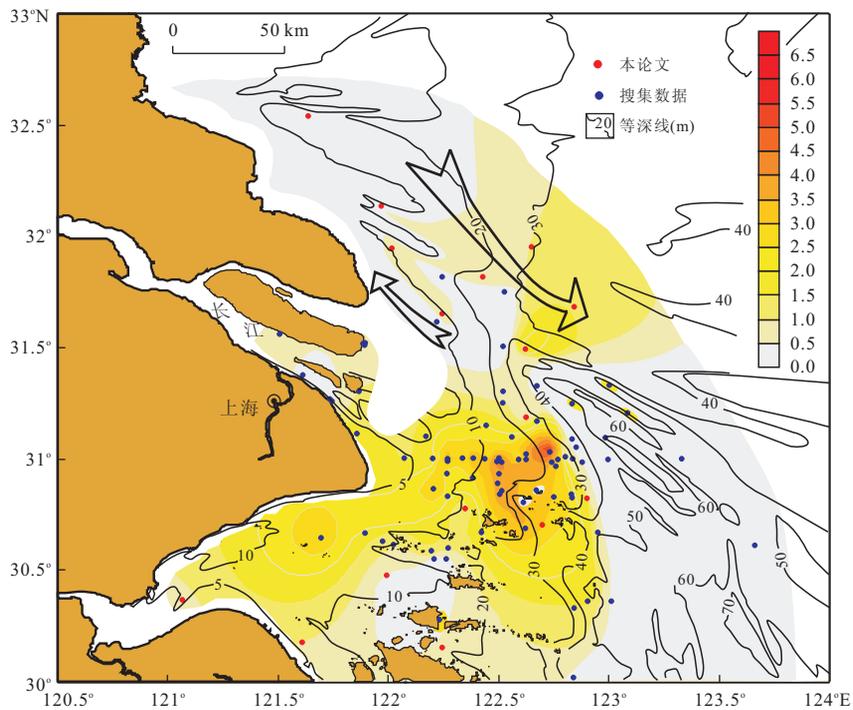


图 3 沉积速率(²¹⁰Pb & ¹³⁷Cs)等值线(单位:cm/a)

Fig. 3 Contour map showing spatial variation of modern sedimentation rates (²¹⁰Pb & ¹³⁷Cs)

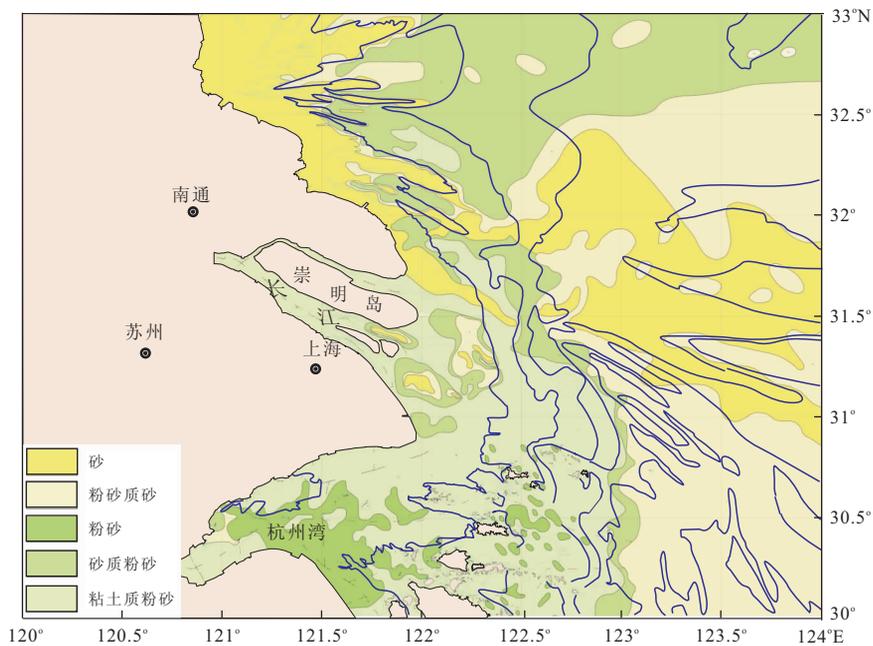


图 4 研究区表层沉积物类型分布

Fig. 4 Surface sediment distribution of study area

基于福克分类原则;国家海洋局第一海洋研究所,2011.长江三角洲演变规律及重大事件的沉积记录与可持续发展研究

之间水平梯度大,悬沙浓度向东迅速降低(沈焕庭和潘定安,2001).长江口外羽状锋的锋面位置大致分布在沿长江冲淡水主轴方向 122°30'~123°E,水深 20~30 m 左右的水域(胡方西等,1995).长江水下

三角洲地区沉积物粒度自西向东呈由粗变细趋势(图 4),口门附近水下沙坝由砂、粉砂质砂和粉砂组成,向东过渡为粘土质粉砂,在 122°50'~123°05'E 附近出现由砂质粉砂组成的沉积物过渡区,向东为

表 2 基于海图对比法的长江水下三角洲堆积速率与侵蚀速率

Table 2 Result of DEM-sedimentation and erosion rate

分布区域	水下砂坝					分流河道			前缘斜坡	前三三角洲
	崇明沙	条子沙	横沙沙	九段沙	南汇	北港	北槽	南槽	5~10 m 等深线	10~20 m 等深线
堆积通量(10^6 m^3)	403.7	133.8	425.0	1294.7	205.2	133.8	164.1	154.7	1233.7	1292.2
侵蚀通量(10^6 m^3)	21.4	67.2	62.4	28.1	30.0	490.9	398.2	47.5	35.8	77.1
堆积速率($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$)	6.8	3.6	4.3	8.3	1.7	4.7	3.8	3.0	5.0	5.2
侵蚀速率($\text{cm} \cdot \text{a}^{-1}$)	1.8	3.4	2.0	2.1	1.4	7.3	6.1	1.6	2.7	2.3

注:数据来源于 Wei *et al.*, 2007; 结果基于 1958 年和 2000 年海图对比, 计算区域范围为 $120.8^\circ \sim 122.5^\circ \text{E}$, $31.05^\circ \sim 31.35^\circ \text{N}$.

大面积分布的粉砂质砂(国家海洋局第一海洋研究所, 2011. 长江三角洲演变规律及重大事件的沉积记录与可持续发展研究报告), 显然已经不是现代长江物质了. 沉积物矿物组成方面, 123°E 以西重矿物组合为角闪石—片状矿物—绿帘石—金属矿物, 与口内浅水滩地类似, 123°E 以东则为角闪石—绿帘石—金属矿物—副矿物组合, 属晚更新世末低海面时期古长江的残留沉积(王先兰等, 1984). 孢粉方面证据表明, 水生植物花粉往东最远止于 $123^\circ 15'$. 在 31°N 线附近, 松属花粉总量的百分数自西向东增加, 至 $122^\circ 50' \text{E}$ 达到最大值, 向东便急剧减少. 表层沉积物中有孔虫分布情况也表明, 以 123°E 为界, 以西由于沉积速率高, 表层沉积物中有孔虫数量少, 壳体新鲜, 以东沉积速率低, 壳体多经过强烈磨损充填(国家海洋局第二海洋研究所, 1981. 中美海洋沉积作用过程联合研究(初步航次)专辑)造成这一泥沙输运格局的主要原因与长江口附近海域流系配置有关, 台湾暖流顺长江口外(约 40 m 等深线以外)水下负地形以西北向楔入, 长江冲淡水漂浮在入侵海水上形成羽状浮托水体, 两者之间形成的羽状环流和羽状锋面($122^\circ 30'$), 加之江浙沿岸流与台湾暖流之间形成较强的沿岸锋, 限制了长江冲淡水和长江悬浮物质向外海的扩散(恽才兴, 2010), 使其在浙闽沿岸流作用下向南扩散.

长江泥沙向南输运过程中, 受到杭州湾口一系列岛屿地貌(如崎岖列岛、马鞍列岛)阻挡(图 3), 大量泥沙在岛屿以北的水下三角洲地区就地落淤, 或者进入杭州湾. 南汇嘴附近杭州湾北部区域沉积速率略高, 约 $1.7 \sim 3.0 \text{ cm/a}$ (图 3), 而杭州湾南部泥沙净沉积量相对较低, 约 $0.4 \sim 1 \text{ cm/a}$ (图 3), 表明在杭州湾北部落淤的长江泥沙较南部杭州湾要多. 这一现象, 与早期对杭州湾悬沙浓度研究的结果较为一致, 杭州湾悬沙分布的研究表明在南汇嘴附近存在一个高悬沙浓度中心, 悬沙分布呈现北高南低(曹沛奎等, 1985). 推其原因, 认为是泥沙输入和涨潮流共同作用的结果. 来自太平洋的潮波由东南

向西北方向传播过程中, 在舟山附近受阻碍而偏转向西, 进入河口湾内后, 受湾口岛群和 underwater 地形的控制, 涨潮主流偏北, 落潮主流偏南(陈吉余等, 1988). 长江泥沙南输过程中, 在杭州湾口附近, 受涨潮流作用大量泥沙进入杭州湾, 北岸涨潮流速大于落潮流速, 南岸落潮流速大于涨潮流速(刘苍宇和董永发, 1990), 因而大部分长江泥沙在杭州湾北部进行落淤, 部分进入南部杭州湾的泥沙又在落潮流作用下经杭州湾南侧向舟山海域方向输运.

苏北辐射沙洲整体沉积速率较低, 普遍都在 1 cm/a 以下(图 3), 表明该区缺少现代物质供应. 结合“908”专项海底底质调查的最新结果, 苏北辐射沙洲脊部为大面积分布的砂质沉积, 槽部主要分布粒度略细的粉砂质砂、砂质粉砂和粉砂(图 4), 从粒级上可以基本断定细粒级的现代长江物质向该区的运移量非常低, 对该区的物质输入基本不产生影响. 关于辐射沙洲形成的物质基础有几种不同说法: 赵松岭(1991)认为低海面陆架沙漠化时期的沙漠体是其发育的物质基础; 耿秀山等(1983)则认为辐射沙洲的发育是在玉木冰期后期长江经琼港附近入海时形成的古长江堆积体的基础上进行的; 另外还有学者认为沙脊群的形成是在 12 世纪黄河夺淮后(张忍顺和陈才俊, 1992; 刘振夏和夏东兴, 2004). 尽管说法不一, 但笔者可以肯定的是苏北辐射沙洲在 1855 年黄河改道渤海后, 该区便缺乏足够的物质供应, 是导致其沉积速率较低的主要原因. 苏北辐射沙洲区受黄海潮波和太平洋潮波共同控制, 涨潮时, 潮流向琼港一带辐聚, 落潮时向外辐散(朱玉荣, 2001), 涨潮流流速一般大于落潮流流速, 泥沙倾向于从南北两边向中段集聚, 呈现以琼港为中心, “北沙南移”和“南沙北移”的泥沙运移趋势(沈焕庭和潘定安, 2001). 本研究中沉积速率略高的部位基本位于辐射沙洲的槽部顶点(图 3), 靠近涨潮流汇聚的中心位置, 推测导致其沉积速率略高的主要泥沙来源应当为涨潮流携带的滨浅海受后期改造的再悬浮物质.

研究区东北部最高沉积速率达 2.58 cm/a 的陆

架区(图3),沉积物类型主要为大面积的砂和粉砂质砂(图4),认为长江冲淡水携带细粒悬浮泥沙对该区沉积速率影响较小,主要贡献来自于废黄河口被侵蚀物质和黄海悬浮物质.包括苏北沿岸流在内的黄海沿岸流,一般距岸较远,携带废黄河被侵蚀物质以及再悬浮物质沿辐射沙洲外缘南下,在 $32^{\circ}30' \sim 33^{\circ}N$ 之间转向东南,输运到东海北部(沈焕庭和潘定安,2001;王凡和许炯心,2004),冬季西北风影响下,最远可达济州岛附近泥质区(Milliman *et al.*, 1985, 1989; 杨作升, 1988; 秦蕴珊等, 1989; Graber *et al.*, 1989; 杨作升等, 1992; 郭志刚等, 1999, 2000; 孙效功等, 2000). 另外,卫星遥感影像资料表明台湾暖流东北部的黄海混合水,每年秋季开始向东南延伸,到4月份势力达到最强,向东南可延伸至 $29^{\circ}50'N, 126^{\circ}30'E$,宽度约200 km,带动苏北沿岸泥沙向东南方向扩散(恽才兴, 2010). 另外,来自Liu *et al.* (2010)最新研究的地球化学方面证据表明,现代长江水下三角洲地区在600 aBP就开始接受当时老黄河入海物质的供应,因此笔者有理由相信1855年黄河改道渤海后,废黄河三角洲侵蚀物质在沿岸流作用下仍然可以向南输运较远造成研究区的东北部较高的沉积速率. 该区沉积速率最高值 2.58 cm/a 出现在水下负地形的顶部附近位置,是苏北沿岸流、黄海混合水、台湾暖流及长江冲淡水4种水体在此交汇的结果,附近沉积物也为过渡型砂质粉砂(图4).

杭州湾口的岛屿周围以及潮滩(C2-6、C8)、分流河道(C11、C12)、沙坝(C7)等三角洲前缘地区沉积速率高低不等的变化,与区域大范围输沙无太大关系,前者主要是对局部地形地貌、水动力和人为因素(如港湾、航道建设)干扰综合影响的反映,而后者可能更多是受到径流、潮流、及人工航道开挖、滩涂围垦及微地貌形态等各种因素的综合影响(陈吉余等, 1988; 段凌云等, 2005; Wei *et al.*, 2007). 长江悬浮泥沙越过马鞍列岛—嵎泗列岛,通过泗礁水道向南部浙闽东海内陆架泥质区输运(杨作升等, 1992; 孙效功等, 2000),处在水道附近及长江泥沙南输路径附近的区域现代沉积速率均表现为较高值,例如ZM11、CJ08-689、499-14、DEB5等孔,基本都在 1.1 cm/a 以上(表1,图3),最高值 3.7 cm/a 出现在泗礁水道附近. 航道附近沉积速率受人为因素影响较大(YS1-6)(图3),沉积速率不稳定, $0.3 \sim 1.6 \text{ cm/a}$. 三角洲前缘的北港、北槽附近河道以冲刷为主(表2),泥沙相对不易沉积,南汇东滩由于人工

围垦沉积速率高达 1.9 cm/a ,其余潮滩上沉积速率普遍不高,约 $0.2 \sim 0.8 \text{ cm/a}$.

5 结论

(1)长江南支口外、杭州湾口群岛区以北,包括水下沙坝区、水下三角洲前缘斜坡、前三角洲,为整个研究区沉积速率最高的地区,沉积速率总体上在 3 cm/a 以上,最高可达 6.3 m/a ,表明长江泥沙出河口后主要在水下三角洲地区进行了堆积.

(2)沉积速率次高值分布在杭州湾北部,约 $1.7 \sim 3.0 \text{ cm/a}$,杭州湾南部略低,约 $0.4 \sim 1.0 \text{ cm/a}$. 长江泥沙向南输运过程中,受涨潮流顶托作用,有相当部分在杭州湾北部进行落淤,部分进入南部杭州湾的泥沙又在落潮流作用下经杭州湾南侧向舟山海域方向输运.

(3)苏北辐射沙洲和 $123^{\circ}E$ 以东陆架区沉积速率较低,基本低于 $0.5 \sim 1.0 \text{ cm/a}$,表明该区缺乏现代长江物质供应. 长江入海物质向外海的扩散基本被控制在 $123^{\circ}E$ 以西,并通过杭州湾口岛屿之间的峡道向南输送至浙闽沿岸.

(4)研究区东北部陆架区沉积速率较高,最高可达 2.58 cm/a ,主要贡献来自于废黄河口被侵蚀物质和黄海悬浮物质,长江冲淡水携带细粒悬浮泥沙对该区沉积速率影响较小.

(5)杭州湾口的岛屿周围以及潮滩(C2-6、C8)、分流河道(C11、C12)、沙坝(C7)等三角洲前缘地区沉积速率高低不等的变化,与区域大范围输沙无太大关系,前者主要是对局部地形地貌、水动力和人为因素(如港湾、航道建设)干扰综合影响的反映,而后者可能更多是受到径流、潮流、及人工航道开挖、滩涂围垦及微地貌形态等各种因素的综合影响.

References

- Appleby, P. G., Oldfield, F., 1978. The Calculation of Lead-210 Dates Assuming a Constant Rate of Supply of Unsupported ^{210}Pb to the Sediment. *Catena*, 5(1): 1-8.
- Cao, P. K., Gu, G. C., Dong, Y. F., et al., 1985. Basic Characteristics of Sediment Transport in Hangzhou Bay. *Journal of East China Normal University (Natural Science Edition)*, 3: 75-84 (in Chinese with English abstract).
- Chen, J. Y., Shen, H. T., Yun, C. X., et al., 1988. Process of Dynamics and Geomorphology of the Changjiang Estuary. Shanghai Scientific and Technical Publishers,

- Shanghai (in Chinese).
- Chen, S. L., Yan, S. Z., Li, Y. Z., 2009. Characteristics of Surface Sediment Distribution in the Yangtze Estuary and Its Adjacent Waters. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 18(2): 152—156 (in Chinese with English abstract).
- Chen, Z. Y., Saito, Y., Hori, K., et al., 2004. Low Concentration of Heavy Metals in the Yangtze Estuarine Sediments, China: A Diluting Setting. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 60: 91—100.
- Chen, Z. Y., Song, B. P., Wang, Z. H., et al., 2000. Late Quaternary Evolution of the Sub-Aqueous Yangtze Delta, China: Sedimentation, Stratigraphy, Palynology, and Deformation. *Marine Geology*, 162: 423—441.
- DeMaster, D. J., McKee, B. A., Nittrouer, C. A., et al., 1985. Rates of Sediment Accumulation and Particle Re-working Based on Radiochemical Measurements from Continental Shelf Deposits in the East China Sea. *Continental Shelf Research*, 4: 143—158.
- Duan, L. Y., Wang Z. H., Li M. T., et al., 2005. ²¹⁰Pb Distribution of the Changjiang Estuarine Sediment and the Implications to Sedimentary Environment. *Acta Sedimentologica Sinica*, 23(3): 514—522 (in Chinese with English abstract).
- Feng, X. W., Jin, X. L., Zhang, W. Y., et al., 2009. Variation of Elements in Sediments from the Hypoxia Zone of the Yangtze Estuary and Its Response to Sedimentary Environment over the Last 100 Years. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(2): 25—31 (in Chinese with English abstract).
- Geng, X. S., Wan, Y. S., Li, S. W., et al., 1983. Evolution of Subei Coastal Areas and Discussions on Dynamic Evolution Mode of Subei Shoals. *Acta Oceanologica Sinica*, 5(1): 62—70 (in Chinese with English abstract).
- Graber, H. C., Robert, C. R., William, D. G., 1989. Storm-Generated Waves and Sediment Resuspension in the East China and Yellow Seas. *Journal of Physical Oceanography*, 19: 1039—1059.
- Guo, Z. G., Yang, Z. S., Fan, D. J., et al., 2003. Seasonal Sedimentary Effect on the Changjiang Estuary Mud Area. *Acta Geographica Sinica*, 58(4): 591—597 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. G., Yang, Z. S., Lei, K., et al., 1999. Seasonal Variation of the Sedimentary Dynamic Processes for the Mud Area in the Northern East China Sea. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 29(3): 507—513 (in Chinese with English abstract).
- Guo, Z. G., Yang, Z. S., Qu, Y. H., et al., 2000. Study on the Comparison of Sedimentary Geochemistry of Mud Areas on the East China Sea Shelf. *Acta Sedimentologica Sinica*, 18(2): 284—289 (in Chinese with English abstract).
- Hori, K., Saito, Y., Zhao, Q. H., et al., 2002. Architecture and Evolution of the Tide-Dominated Changjiang (Yangtze) River Delta, China. *Sedimentary Geology*, 146: 249—264.
- Hu, F. X., Hu, H., Gu, G. C., et al., 1995. Salinity Fronts in the Changjiang River Estuary. *Oceanologia et Limnologia Sinica (Suppl.)*, 26(5): 23—31 (in Chinese with English abstract).
- Hu, F. X., Hu, H., Gu, G. C., et al., 2002. Studies of Fronts in the Changjiang Estuary. East China Normal University Press, Shanghai (in Chinese).
- Hu, J., Chen, S. L., Gu, G. C., 2007. An Approach to Water and Sediment Diversion Ratios and Transports in the Changjiang River Estuary Area. *Coastal Engineering*, 26(2): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H. Z., Tang, B. G., Yang, W. D., et al., 1996. Sedimentary Geology of the Yangtze River Delta. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Jin, H. Y., Chen, J. F., Weng, H. X., et al., 2010. Variations in Paleoproductivity and the Environmental Implications over the Past Six Decades in the Changjiang Estuary. *Acta Oceanol. Sin.*, 29(3): 38—45.
- Li, C. X., Wang, P., Fan, D. D., et al., 1999. Sedimentation Rate and Sedimentary Break in Tidal Deposits. *Marine Geology and Quaternary Geology*, 19(2): 11—18 (in Chinese with English summary).
- Li, P., Yang, S. L., Dai, S. B., et al., 2007. Accretion/Erosion of the Subaqueous Delta at the Yangtze Estuary in Recent 10 Years. *Acta Geographica Sinica*, 62(7): 707—716 (in Chinese with English abstract).
- Liu, C. Z., Dong, Y. F., 1990. Sedimentary Textures and Environments of the Hangzhou Bay. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 10(4): 53—65 (in Chinese with English abstract).
- Liu, J., Saito, Y., Kong, X. H., et al., 2010. Sedimentary Record of Environmental Evolution off the Yangtze River Estuary, East China Sea, during the Last ~ 13 000 years, with Special Reference to the Influence of the Yellow River on the Yangtze River Delta during the Last 600 Years. *Quaternary Science Reviews*, 29: 2424—2438.
- Liu, J. P., Li, A. C., Xu, K. H., et al., 2006. Sedimentary Features of the Yangtze River-Derived Along-Shelf Clinoform Deposit in the East China Sea. *Continental*

- Shelf Research*, 26: 2141—2156.
- Liu, M., Fan, D. J., 2010. Geochemical Records in the Subaqueous Yangtze River Delta and Their Responses to Human Activities in the Past 60 years. *Chinese Science Bulletin*, 56(6): 552—561.
- Liu, S. F., Shi, X. F., Liu, Y. G., et al., 2009. Sedimentation Rate of Mud Area in the East China Sea inner Continental Shelf. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 29(6): 1—7 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. X., Xia, D. X., 2004. Tidal Sands in the China Seas. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Milliman, J. D., Bestsley, K. C., Yang, Z. S., et al., 1985. Modern Huanghe Derived on the Outer Shelf of the East China Sea; Identification and Potential Mud-Transport Mechanisms. *Continental Shelf Research*, 4: 215—227.
- Milliman, J. D., Meade, R. H., 1983. World-Wide Delivery of River Sediment to the Oceans. *The Journal of Geology*, 91(1): 1—21.
- Milliman, J. D., Qin, Y. S., Park, Y. A., 1989. Sediments and Sedimentary Processes in the Yellow and East China Seas. In: Taira, A., Masuda, F., eds., *Sedimentary Facies in the Active Plate Margin*. Terra Scientific Publishing Company, Tokyo, 233—249.
- Oguri, K., Matsumoto, E., Yamada, M., et al., 2003. Sediment Accumulation Rates and Budgets of Depositing Particles of the East China Sea. *Deep-Sea Research*, 50: 513—528.
- Pan, D. A., Hu, F. X., Zhou, Y. Q., et al., 1988. Mixing of Salt Water with Fresh Water on the Changjiang Estuary in Summer. In: Chen, J. Y., ed., *Processes of Dynamics and Geomorphology of the Changjiang Estuary*. Shanghai Scientific and Technical Publishers, Shanghai, 151—165 (in Chinese).
- Qin, Y. S., Li, F., Xu, S. M., et al., 1989. Study on the Suspended Matter in the Sea Water of the Southern Huanghai Sea. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 20(2): 101—111 (in Chinese with English summary).
- Reading, H. G., 1978. *Sedimentary Environments and Facies*. Blackwell Scientific Publications, Oxford, London, Edinburgh, Melbourne. Translator by Zhou, M. J., eds., 1985. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Robbins, J. A., Edgington, D. N., 1975. Determination of Recent Sedimentation Rates in Lake Michigan Using Pb-210 and Cs-137. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 39: 285—304.
- Shen, H. T., 2001. Material Flux of the Changjiang Estuary. China Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Shen, H. T., Pan, D. A., 2001. Turbidity Maximum in the Changjiang Estuary. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Su, C. C., Hu, C. A., 2002. ²¹⁰Pb, ¹³⁷Cs and ^{239,240}Pu in East China Sea Sediments; Sources, Pathways and Budgets of Sediments and Radionuclides. *Marine Geology*, 183: 163—178.
- Su, X. Z., Ma, W. T., Xu, S. L., et al., 1984. The Method of Lead-210 Geochronology for Marine Sediments. *Taiwan Strait*, 3(1): 50—58 (in Chinese with English abstract).
- Sun, X. G., Fang, M., Huang, W., 2000. Spatial and Temporal Variations in Suspended Particulate Matter Transport on the Yellow and East China Sea Shelf. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 31(6): 81—587 (in Chinese with English summary).
- Uehara, K., Saito, Y., Hori, K., et al., 2002. Paleotidal Regime in the Changjiang (Yangtze) Estuary, the East China Sea, and the Yellow Sea at 6 ka and 10 ka Estimated from a Numerical Model. *Marine Geology*, 183: 179—192.
- Wan, G. J., 1997. ²¹⁰Pb Dating for Recent Sedimentation. *Quaternary Sciences*, 3: 230—239 (in Chinese with English abstract).
- Wang, A. D., Pan, S. M., Zhang, Y. Z., et al., 2010. Modern Sedimentation Rate on the Submarine Delta of the Changjiang River. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 30(3): 1—6 (in Chinese with English abstract).
- Wang, F., Xu, J. X., 2004. Key Issues on Land-Ocean Interactions in the Changjiang and Huanghe Estuaries and Their Adjacent Waters. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Wang, G. Q., Shi, X. F., Liu, Y. G., et al., 2011. Seasonal and Spatial Variation in Suspended Sediment Characteristics off the Changjiang Estuary. In: Li, M. Z., Sherwood, C. R., Hill, P. R., eds., *Sediments, Morphology and Sedimentary Processes on Continental Shelves*, International Association of Sedimentologists Special Publication, Blackwell Publishing Ltd., Oxford.
- Wang, X. L., Ma, K. J., Chen, J. L., et al., 1984. Detrital Minerals in the Surface Sediments of East China Sea Shelf and Their Geological Significance. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 4(3): 43—55 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. H., 2003. Reformation Mechanism and Features of Dynamic Sediment in Flood Channels of the Changjiang Estuary. East Normal University, Shanghai (in Chinese).
- Wei, T. Y., Chen, Z. Y., Duan, L. Y., et al., 2007. Sedimen-

- tation Rates in Relation to Sedimentary Processes of the Yangtze Estuary, China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 71(1-2): 37-46.
- Xia, X. M., Xie, Q. C., Li, Y., et al., 1999. ^{137}Cs and ^{210}Pb Profiles of the Seabed Cores along the East China Sea Coast and Their Implications to Sedimentary Environment. *Donghai Marine Science*, 17(1): 20-27 (in Chinese with English summary).
- Xia, X. M., Yang, H., Li, Y., et al., 2004. Modern Sedimentation Rates in the Contiguous Sea Area of Changjiang Estuary and Hangzhou Bay. *Acta Sedimentologica Sinica*, 22(1): 130-135 (in Chinese with English abstract).
- Xiang, L., 1997. Dating of Recent Dianchi Lake Sediments by Gamma Ray Analysis. *Nuclear Techniques*, 20(2): 100-104 (in Chinese with English abstract).
- Yang, S. L., Zhao, Q. Y., Belkin, I. M., 2003. Temporal Variation in the Sediment Load of the Yangtze River and the Influences of Human Activities. *Journal of Hydrology*, 263: 56-71.
- Yang, Z. S., 1988. Mineralogical Assemblages and Chemical Characteristics of Clays from Sediments of the Huanghe, Changjiang, Zhujiang Rivers and Their Relationship to the Climate Environment in Their Sediment Source Areas. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 19(4): 336-346 (in Chinese with English summary).
- Yang, Z. S., Chen, X. H., 2007. Centurial High Resolution Records of Sediment Grain-Size Variation in the Mud Area off the Changjiang (Yangtze River) Estuary and Its Influential Factors. *Quaternary Sciences*, 27(5): 690-699 (in Chinese with English abstract).
- Yang, Z. S., Guo, Z. G., Wang, Z. X., et al., 1992. Suspended Sediments on the Yellow and East China Sea Shelf and Macro-Pattern of Their being Transported to the Eastern Deeper Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 14(2): 81-90 (in Chinese with English summary).
- Yang, Z. S., Wang, H. J., Saito, Y., et al., 2006. Dam Impacts on the Changjiang (Yangtze) River Sediment Discharge to the Sea: The Past 55 Years and after the Three Gorges Dam. *Water Resources Research*, 42(4): W04407. doi: 10.1029/2005WR003970
- Ye, C. K., 1991. Contrasting Investigation by ^{137}Cs Method and ^{210}Pb Method for the Present Sedimentation Rate of Poyang Lake, Jiangxi. *Acta Sedimentologica Sinica*, 9(1): 106-114 (in Chinese with English abstract).
- Yun, C. X., 2010. Diagram of the Evolution of the Yangtze Delta. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zeng, W. Y., Cheng, H. L., Yao, J. H., et al., 1983. The De-termination of ^{210}Po in the Marine Sediments and Its Application in Geochronology. *Taiwan Strait*, 2(2): 30-36 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R., Pan, S. M., Wang, Y. P., et al., 2009. Sedimentation Rates and Characteristics of Radionuclide ^{210}Pb at the Subaqueous Delta in Changjiang Estuary. *Acta Sedimentologica Sinica*, 4: 704-713 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, R. S., Chen, C. J., 1992. Combination Trend with Land of Jiangsu Sand Ridges and Tiaozini Sand Shoals. Ocean Press, Beijing (in Chinese).
- Zhao, S. L., 1991. The Latest Study on Origin of the North Jiangsu Shoals. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 11(3): 103-112 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, Y. R., 2001. The Controlling Role of Tidal Current Regime in the Distribution Patterns of Bottom Sediments in the Continental Shelves of the Bohai Sea, Yellow Sea and East China Sea. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 21(2): 7-13 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang, K. L., 2005. Sedimentation Features in the Subaqueous Yangtze Delta (Dissertation). Ocean University of China, Qingdao (in Chinese).

附中文参考文献

- 曹沛奎, 谷国传, 董永发, 等, 1985. 杭州湾泥沙运移的基本特征. 华东师范大学学报(自然科学版), 3: 75-84.
- 陈吉余, 沈焕庭, 恽才兴, 等, 1988. 长江河口动力过程和地貌演变. 上海: 上海科学技术出版社.
- 陈沈良, 严肃庄, 李玉中, 等, 2009. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征. 长江流域资源与环境, 18(2): 152-156.
- 段凌云, 王张华, 李茂田, 等, 2005. 长江口沉积物 ^{210}Pb 分布及沉积环境解释. 沉积学报, 23(3): 514-522.
- 冯旭文, 金翔龙, 章伟艳, 等, 2009. 长江口外缺氧区柱样沉积物元素的分布及其百年沉积环境效应. 海洋地质与第四纪地质, 29(2): 25-31.
- 耿秀山, 万延森, 李善为, 等, 1983. 苏北海岸的演变过程及苏北浅滩动态模式的初步探讨. 海洋学报, 5(1): 62-70.
- 郭志刚, 杨作升, 范德江, 等, 2003. 长江口泥质区的季节性沉积效应. 地理学报, 58(4): 591-597.
- 郭志刚, 杨作升, 雷坤, 等, 1999. 东海陆架北部泥质区沉积动力过程的季节性变化规律. 青岛海洋大学学报, 29(3): 507-513.
- 郭志刚, 杨作升, 曲艳慧, 等, 2000. 东海陆架泥质区沉积地球化学的比较研究. 沉积学报, 18(2): 284-289.
- 胡方西, 胡辉, 谷国传, 等, 1995. 长江河口盐度锋. 海洋与湖

- 沼(增刊),26(5):23—31.
- 胡方西,胡辉,谷国传,等,2002.长江口锋面研究.上海:华东师范大学出版社.
- 胡静,陈沈良,谷国传,2007.长江河口泥沙分流和输移的探讨.海岸工程,26(2):1—10.
- 黄慧珍,唐保根,杨文达,等,1996.长江三角洲沉积地质学.北京:地质出版社.
- 李从先,王平,范代读,等,1999.潮汐沉积率与沉积间断.海洋地质与第四纪地质,19(2):11—18.
- 李鹏,杨世伦,戴仕宝,等,2007.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.地理学报,62(7):707—716.
- 刘苍宇,董永发,1990.杭州湾的沉积构造与沉积环境分析.海洋地质与第四纪地质,10(4):53—65.
- 刘升发,石学法,刘焱光,等,2009.东海内陆架泥质区沉积速率.海洋地质与第四纪地质,29(6):1—7.
- 刘振夏,夏东兴,2004.中国近海潮流沉积沙体.北京:海洋出版社.
- 潘定安,胡方西,周月琴,等,1988.长江河口夏季的盐淡水混合.见:陈吉余编.长江河口动力过程和地貌演变.上海:上海科学技术出版社,151—165.
- 秦蕴珊,李凡,徐善民,等,1989.南黄海水体中悬浮体的研究.海洋与湖沼,20(2):101—111.
- Reading, H. G., 1978. 沉积环境和相. 牛津, 伦敦, 爱丁堡, 墨尔本: Blackwell 科学出版社. 周明鉴, 等译, 1985. 北京: 科学出版社.
- 沈焕庭, 2001. 长江河口物质通量. 北京: 海洋出版社.
- 沈焕庭, 潘定安, 2001. 长江河口最大浑浊带. 北京: 海洋出版社.
- 苏贤泽, 马文通, 徐胜利, 等, 1984. 海洋沉积物的铅-210 地质年代学方法. 台湾海峡, 3(1): 50—58.
- 孙效功, 方明, 黄伟, 2000. 黄东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律. 海洋与湖沼, 31: 581—587.
- 万国江, 1997. 现代沉积的²¹⁰Pb 计年. 第四纪研究, 3: 230—239.
- 王安东, 潘少明, 张永战, 等, 2010. 长江口水下三角洲现代沉积速率. 海洋地质与第四纪地质, 30(3): 1—6.
- 王凡, 许炯心, 2004. 长江、黄河口及邻近海域陆海相互作用若干重要问题. 北京: 海洋出版社.
- 王先兰, 马克俭, 陈建林, 等, 1984. 东海海底表层沉积物中的碎屑矿物及其地质意义. 海洋地质与第四纪地质, 4(3): 43—55.
- 王永红, 2003. 长江河口涨潮槽的形成机理与动力沉积特征. 上海: 华东师范大学.
- 夏小明, 谢钦春, 李炎, 等, 1999. 东海沿海海底沉积物中的¹³⁷Cs、²¹⁰Pb 分布及其沉积环境解释. 东海海洋, 17(1): 20—27.
- 夏小明, 杨辉, 李炎, 等, 2004. 长江口—杭州湾毗连海区的现代沉积速率. 沉积学报, 22(1): 130—135.
- 项亮, 1997. 用 γ 分析方法研究滇池现代沉积年代. 核技术, 20(2): 100—104.
- 杨作升, 1988. 黄河、长江、珠江沉积物中粘土的矿物组合、化学特征及其与物源区气候环境的关系. 海洋与湖沼, 19(4): 336—346.
- 杨作升, 陈晓辉, 2007. 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. 第四纪研究, 27: 690—699.
- 杨作升, 郭志刚, 王兆祥, 等, 1992. 黄东海陆架悬浮体及其向东部深海区输送的宏观格局. 海洋学报, 14(2): 81—90.
- 叶崇开, 1991. ¹³⁷Cs 法和²¹⁰Pb 法对比研究鄱阳湖近代沉积速率. 沉积学报, 9(1): 106—114.
- 恽才兴, 2010. 图说长江河口演变. 北京: 海洋出版社.
- 曾文义, 程汉良, 姚建华, 等, 1983. 海洋沉积物中²¹⁰Po 的测定及其在地质年代学上的应用. 台湾海峡, 2(2): 30—36.
- 张瑞, 潘少明, 汪亚平, 等, 2009. 长江河口水下三角洲²¹⁰Pb 分布特征及其沉积速率. 沉积学报, 27(4): 704—713.
- 张忍顺, 陈才俊, 1992. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究. 北京: 海洋出版社.
- 赵松龄, 1991. 苏北浅滩成因的最新研究. 海洋地质与第四纪地质, 11(3): 103—112.
- 朱玉荣, 2001. 潮流场对渤、黄、东海陆架底质分布的控制作用. 海洋地质与第四纪地质, 21(2): 7—13.
- 庄克琳, 2005. 长江水下三角洲的沉积特征(博士论文). 青岛: 中国海洋大学.