

文章编号:1000-0550(2014)05-0863-10

长江口邻近陆架表层沉积物变化特征及成因^①

杨云平^{1,2} 李义天¹ 孙昭华¹ 邓金运¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室 武汉 430072;

2. 交通运输部天津水运工程科学研究所 工程泥沙交通运输行业重点实验室 天津 300456)

摘要 基于近 30 年长江口邻近陆架区域表层沉积物数据,对表层沉积物与流域入海泥沙特征的响应进行研究。结果表明:①沉积物表现为东粗西细,北粗南细的分布格局,砂百分比分布表现为东北向西南为减小,粉砂和黏土均表现为东北向西南增加趋势,其中整个区域黏土与粉砂百分比的比值在 0.12~0.83 之间;②2008~2010 年与 2003~2006 相比,砂的百分含量表现为增加,粉砂和黏土表现为减少趋势,表层沉积物向粗化趋势发展;③砂—泥分界线在 2003~2007 年北侧(31°30′以北)为交替变化,2007~2010 年为向西移动,南侧(31°30′以南)2003~2010 年均向西移动,长江口陆架区域表层沉积物砂泥分界线变化是综合作用的结果,砂质沉积物因海平面上升等作用再悬浮沉积在泥质区的作用将逐渐加强。④泥质区域面积在三峡水库蓄水后减小,且位置略有南偏,主要受北槽深水航道整治工程及自然因素的影响。

关键词 表层沉积物 趋势及成因 砂—泥分界 泥质区 邻近陆架 长江河口

第一作者简介 杨云平 男 1985 年出生 博士 河口海岸学 E-mail: yangsan520_521@163.com

中图分类号 P593 **文献标识码** A

0 引言

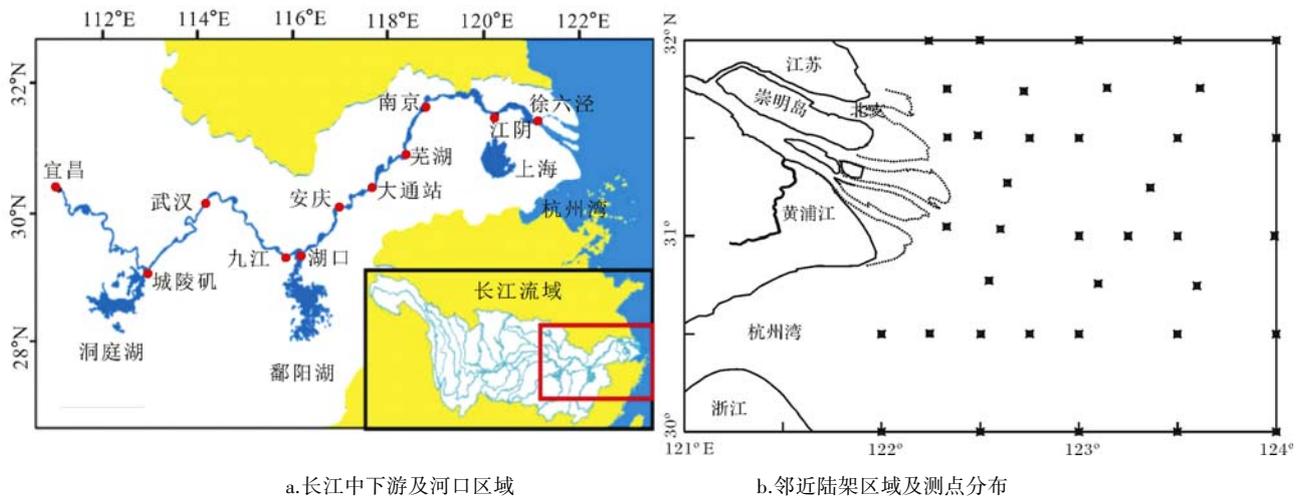
流域泥沙入海沉积在邻近陆架区域,形成了从“源”到“汇”的联动机制,伴随流域水利工程建设和河口整治工程引起河口泥沙要素的变化,邻近陆架区域表层沉积物势必出现一定的响应。研究表明:稀土元素主要富集在 $d < 0.031$ mm 细颗粒中^[1];黑碳^[2]和有机质^[3-5]含量与沉积物平均粒径相关性较好;沉积物颗粒越细,营养元素含量越高^[6];有机磷、自生磷灰石磷以及难分界有机磷是的 $d < 0.008$ mm 粒级沉积物中磷的主要组成成分,碎屑磷主要集中在大于 0.032 mm 粒级中^[7]。以上研究均表明,河口表层沉积物颗粒特征变化直接或间接影响该区域营养盐和离子等输运特征。

上世纪 90 年代数据显示,长江河口表层沉积物的分布格局水下环境粗于潮滩,口内河道粗于口外海滨,南支粗于北支,北港粗于南港,纵向上逐渐变细,横向上表现为深槽粗于浅滩^[8]。基于 2003~2005 年数据进一步印证了文献^[8]的分布特征^[9,10]。基于三峡水库蓄水初期数据发现,总体分布格局尚未变化,砂和黏土百分含量增加,粉砂减少^[11,12]。可见,三峡水库蓄水初期表层沉积物分布格局也未发生变化,随

着三峡水库蓄水时间延长和河口整治工程实施等影响,分布格局是否出现新的变化,有待于进一步研究。长江口外邻近陆架区域表层沉积物来源不完全相同,其中粒径 $d < 0.032$ mm 来自陆源泥沙, $d > 0.063$ mm 来自于陆架残留沉积物的改造和再搬运^[13]。同时以 123°作为内陆细粒沉积物和陆架粗颗粒沉积物地理分界,即内陆架的细颗粒是现代近岸沉积,外陆架粗颗粒沉积物是残留沉积^[14]。基于 2002 年 9 月~10 月长江口外邻近陆架数据与上世纪 60~80 年代资料比较,口外邻近陆架区域砂的百分比等值线向口内移动,黏土区域面积减小,使得前三角洲南部的表层沉积物趋于粗化^[15,16],体现了三峡水库蓄水前表层沉积物的组分变化特征。其后 2008 年 1 月数据显示,砂、粉砂和黏土等值线的变化特征,并与文献^[17]比较了等值线的变化趋势,初步总结了长江口“源”“汇”效应^[18-20]。长江口外邻近陆架区域砂—泥分界和泥质区面积的变化十分重要,是研究河口生态安全要素的基础和前提,需要系统的总结和研究。

本研究以长江口外邻近陆架多年实测数据和文献数据为依托,在研究表层沉积物中值粒径、砂、粉砂和黏土的分布规律和变化趋势基础上,探求砂—泥分界线和泥质区变化趋势,并对表层沉积物变化特征及

①国家 973 项目“重大水利工程影响下河口水沙和地貌变化过程”(编号:2010CB429002)资助
收稿日期:2013-08-05;收修改稿日期:2013-12-01



a. 长江中下游及河口区域

b. 邻近陆架区域及测点分布

图 1 长江口位置及研究区域

Fig. 1 Sketch map of the study area and location of Yangtze estuary

表 1 长江口外邻近陆架数据来源

Table 1 Data source of the nearby shelf of the Yangtze River

年份	数据特点	数据点数	数据来源	年份	数据特点	数据点数	数据来源
1977 年以前	统计值	—	[17]	2004~2006 年	散点	45	[24]
1978~1979 年	统计值	—	[21]	2006 年	散点	39	[14]
1982~1986 年	重绘	—	[22]	2007 年	散点	41	[25]
1990~1991 年	统计值	—	[8]	2008 年	散点	34	[19, 20]
1997~1998 年	散点	35	[23]	2009 年	散点	31	[26]
2003 年	散点	30	[11, 12]	2010 年	散点	40	[27]

趋势成因进行探讨。

1 研究区域及资料来源

1.1 研究区域

长江河口“源”的物质通量,一般以大通水文站为代表,其水沙通量代表着长江流域入海的基本物质要素。长江口外邻近陆架主要为口门拦门沙为分界,本研究的选取区域为东经 $122^{\circ} \sim 124^{\circ}$, 北纬 $30^{\circ} \sim 32^{\circ}$ 区间,这一区域包含了杭州湾的部分区域(图 1)。从泥沙扩散角度分析,长江河口泥沙进口外邻近陆架的“汇”,主要向南偏转,即杭州湾口外部分区域是受长江入海泥沙的影响。

1.2 资料来源与说明

长江流域大通水文站的水量、沙量以及分组沙量的数据来源于长江流域中下游水文年鉴。邻近陆架区域数据来源部分文献数据中的源数据,图表重新绘制及统计数值中统计值为文献之中统计的,1997~2010 年散点数据为源数据,文献中表格数据,重绘数据为原文献中的图进行重新绘制。具体数据来源见表 1。文献中 1987 年以前沉积物测量为滴管测量,

1987 年之后为激光粒度仪测量,测量手段略有不同,选取 1987 年以前数据仅作为历史时期参考,在比较趋势和规律上以 1987 年之后数据为基础。

2 长江流域入海水沙通量的变化特征

2.1 入海水沙通量变化

长江流域入海水量和沙量均较大,1950~2011 年年均入海水通量为 $8.918 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{y}$, 年均入海沙量为 $3.84 \times 10^8 \text{ t/y}$, 含沙量为 0.43 kg/m^3 。长江流域入海水量多年变化趋势性不明显,虽然上世纪 90 年代水量增加,2003~2011 年为枯水期,入海水量略有减小(图 2),为正常水文波动。长江入海沙量和含沙量存在突变特征,近期(2003~2011 年)为入海年均沙通量较 1950~1968 年减小为 $3.46 \times 10^8 \text{ t/y}$, 减幅达 71% 左右(图 2)。入海含沙量也表现为减少趋势,20 世纪 50 年代至 80 年代初期变化不大,80 年代中期至今表现为明显的减小趋势(图 3)。引起入海沙量和含沙量减少的因素较多,主要为流域水库蓄水拦沙^[28,29]、中下游江湖关系调整^[30]、水土保持^[31] 及气候变化等因素。近年来,随着长江流域人类活动的逐

渐增加,对流域入海水量、沙量及分配过程的影响已经逐渐显现出来^[32,33]。通过三峡水库蓄水一、二期实测资料结合对未测区泥沙量的合理估算,认为蓄水后 2003~2007 年与蓄水前 1998~2002 年比较,宜昌站、汉口站及大通站悬沙通量下降 3.54、1.72 及 1.63 $\times 10^8$ t/y,其中三峡水库蓄水的贡献分别占 41%、55% 及 45%^[30,34]。同时长江中下游洞庭湖与鄱阳湖近期入汇长江的泥沙量也呈现减少趋势^[30],上游水土保持工程的实施使得侵蚀强度减小,致使进入长江干流的泥沙量减少,进而影响进入河口区域的泥沙量和悬沙浓度。

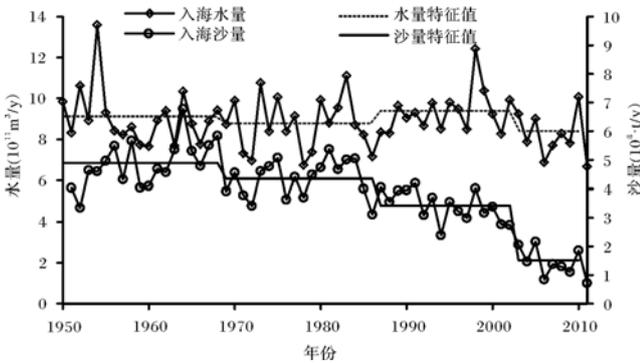


图 2 流域入海水沙通量变化

Fig.2 Variations of seawards water and sediment discharge

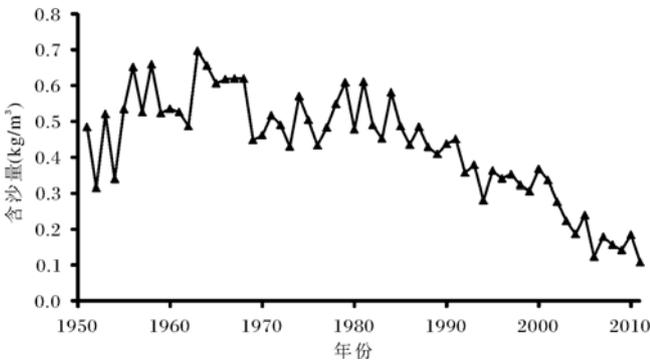


图 3 流域入海含沙量变化

Fig.3 Variations of seawards sediment concentration

2.2 入海悬浮泥沙颗粒特征变化

依据黏土 ($d < 0.004$ mm) — 粉砂 (0.004 mm $< d < 0.063$ mm) — 砂 ($d > 0.063$ mm) 将入海悬沙分为 3 组,在时间上分为 2 段,1986~2002 年和 2003~2010 年,比较不同时段 3 组沙的变化特征。基本规律为:黏土的百分比和输运量均减小;粉砂百分比略有增加,但增加幅度有限,其输运量减小趋势;砂为较粗颗粒泥沙,百分比增加,输运量减少(表 2)。长江流域人类活动,如筑坝工程、调水工程、水土保持工程、江湖关

系调整及河道自身特性的变化等均会引起入海泥沙颗粒特征和输运量变化。三峡水库下游主要控制站宜昌站悬沙中值粒径 1987~2008 年期间为减小趋势,汉口站为增加趋势^[35],大通水文站悬沙中值粒径略有增加(图 4)。宜昌—汉口河段在三峡水库蓄水前表现为淤积,一期蓄水期间表现为冲刷,而汉口—大通区间表现为持续侵蚀,但蓄水后侵蚀速率下降^[35,36]。比较已有研究中 2000 年^[37]、2006 年^[38]、2008 年^[18~20]和 2011 年^[18~20]宜昌—徐六泾河段表层沉积物颗粒变化,可知表层沉积物呈粗化趋势,尤其是三峡水库下游近坝河段粗化最为明显。长江中、下游悬沙和表层沉积物颗粒特征的变化,对长江流域入海悬移质颗粒变化有重要影响,直接或间接影响长江口邻近陆架区域沉积物特征和趋势。

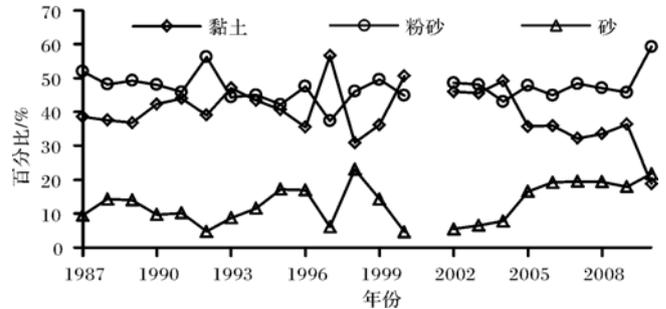


图 4 黏土—粉砂—砂运输百分比

Fig.4 Clay, silt and sand transport in percentage

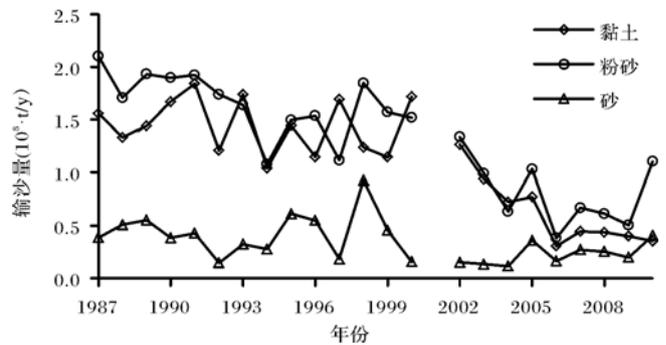


图 5 黏土—粉砂—砂输运量

Fig.5 Amount of clay, silt and sand transport

表 2 三组泥沙百分比和输运量年代特征

Table 2 Yearly characteristics of clay, silt and sand transport percentage and amount

时间	黏土		粉砂		砂	
	百分比 /%	输运量 / 10^8 t/y	百分比 /%	输运量 / 10^8 t/y	百分比 /%	输运量 / 10^8 t/y
1986~2002	41.64	1.324	46.98	1.63	11.38	0.40
2003~2010	35.87	0.55	48.02	0.74	16.11	0.24

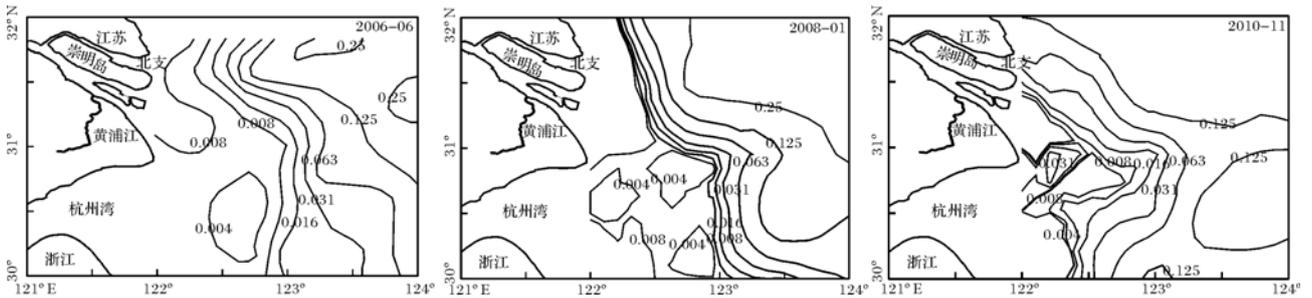


图 6 长江口外邻近陆架区域中值粒径分布

Fig.6 Distribution of median grain size in the nearby shelf of the Yangtze River

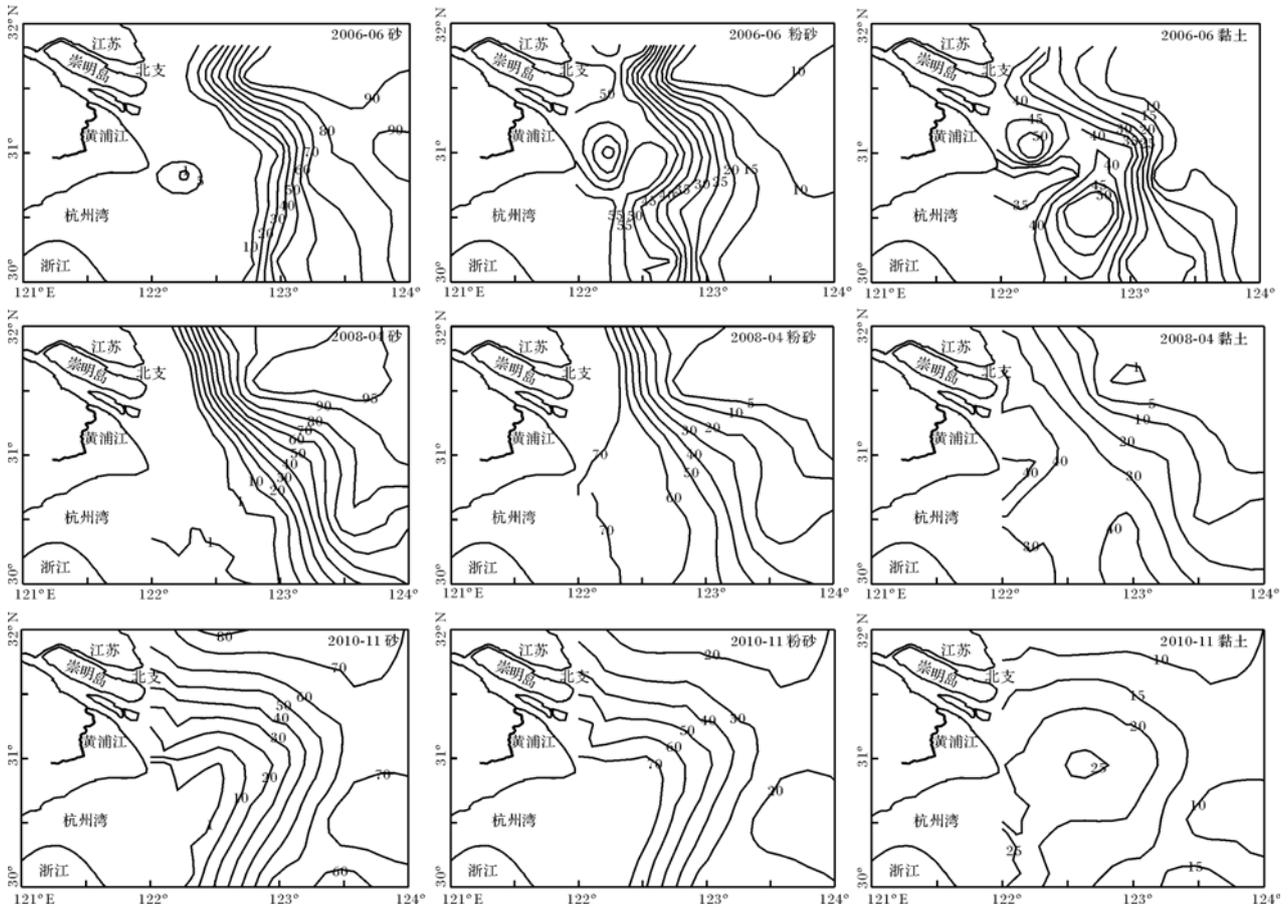


图 7 近期砂—粉砂—黏土百分数等值线分布

Fig.7 Distribution of recent sand, silt and clay percentage

3 长江口外邻近陆架表层沉积物粒径变化特征

3.1 表层沉积物中值粒径等值线的分布特征

表层沉积物中值粒径等值线的空间分布如图 6 所示,可以看出,2006 年、2008 年和 2010 年长江口外邻近陆架表层沉积物整体上均呈现明显的“东粗西细、北粗南细”分布格局。且存在砂—泥分界线和颗

粒较小的泥质区。

3.2 粒径组分百分含量等值线的分布特征

依据表层沉积物粒径的不同,将表层沉积物分为砂、粉砂和黏土 3 种类型。选取 2006 年、2008 年和 2010 年数据、同时与历史时期数据相比较研究其分布特征。图 7 所示,2006~2010 年分组沙分布基本规律为:砂的组分百分含量从东北向西南方向逐渐减少;粉砂含量自西南向东北方向为减少趋势;黏土含

量和粉砂的规律类似,但在长江口南侧存在一个最大数值核心区域,表现为向东北、东南均为减少趋势。三峡水库蓄水前和蓄水后长江口外邻近陆架砂、粉砂和黏土的分布格局未发生变化。

3.3 表层沉积物泥沙组分配比关系

河口表层沉积物存在不同的分组,且分组沙之间存在一定的分配比例,在国外其它河流已经证实^[39,40],黏土和粉砂百分比比值在 0.16~0.25 之间。将本文所有数据整理,绘制砂百分比(C_s)—粉砂百分比(C_T)—黏土百分比(C_Y)之间的关系图(图 8)。黏土和粉砂百分比比值的范围在 0.10~0.83 之间,由于河流入海泥沙性质差异较大,该比值存在较大差异。同时整理 3 个分组沙之间的关系(图 9),采用对数坐标形式进行拟合。建立了砂—粉砂—黏土 3 者百分比分配比关系,如公式(1)、(2)、(3)所示,由于黏土和粉砂百分比仅能确定其比值范围,未能建立 3 个分组沙百分比之间固定比值关系。

$$C_Y + C_T + C_S = 100 \quad (1)$$

$$0.12 < C_Y/C_T < 0.83 \quad (2)$$

$$\ln(C_T) - 0.9191\ln(C_Y) - 0.0809\ln(C_S) = 1.1231 \quad (3)$$

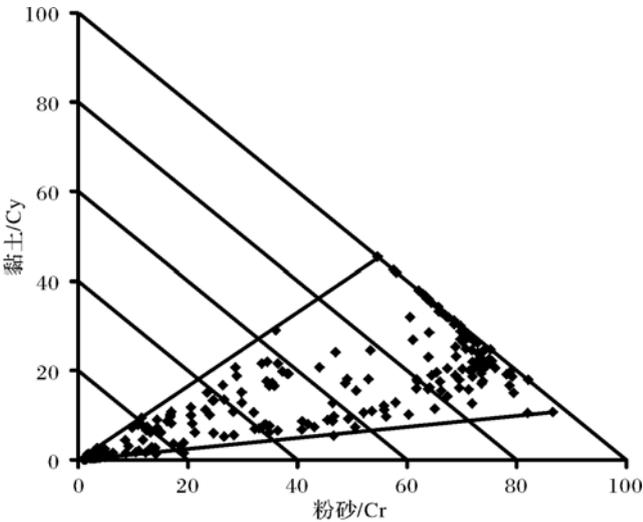


图 8 粉砂和砂的关系

Fig.8 Relationship between silt and sand

4 长江口外邻近陆架表层沉积物输移规律及成因

4.1 表层沉积物的颗粒变化趋势及成因

将历年口外邻近陆架区域中值粒径数据进行整理(图 10),表层沉积物中值粒径趋势为:2003~2006

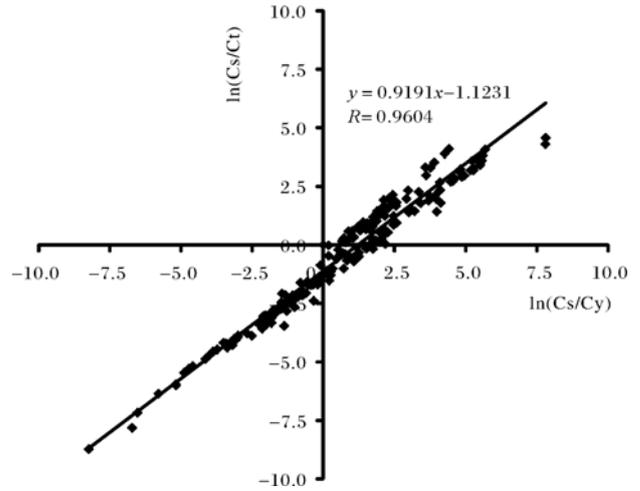


图 9 砂—粉砂—黏土关系

Fig.9 Relationship between sand, silt and clay

年较 1990~1991 年期间表层沉积物颗粒略有粗化,幅度较小,2008~2010 年期间中值粒径明显增加,表明三期蓄水期间沉积物表现为粗化趋势发展。1990~2006 年期间,长江入海悬沙粒径略有粗化,其入海泥沙量也减少,此期间河口水下三角洲处于冲刷和淤积交替变化,整体以微淤为主,尤其是 1998 年和 1999 年大洪水引起的淤积,即该时期表层沉积物中值粒径略有粗化。在 2008~2010 年期间,粒径较 2003~2006 年变化较大,由于入海沙量大幅度减少,河口区域悬沙浓度减少^[41],水流挟沙能力不足,表层沉积物中细颗粒泥沙通过再悬浮作用补给悬沙,使得水下三角洲处于侵蚀状态^[35],即表层沉积物粒径向粗化趋势发展。

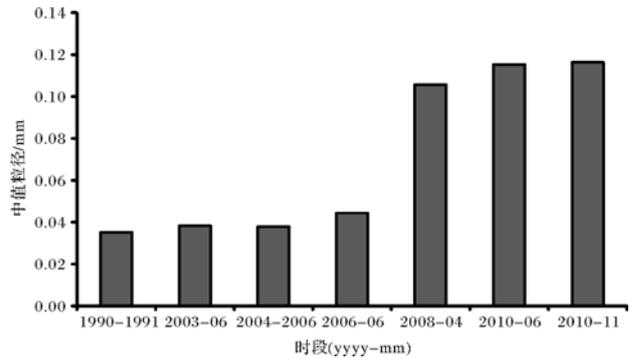


图 10 长江口外邻近陆架沉积物中值粒径变化

Fig.10 Change of sediment median size in the nearby shelf of the Yangtze River

综上,长江口外邻近陆架区域表层沉积物,在受流域泥沙沉积效应影响区域,三角洲淤涨和入海悬沙

颗粒变粗使得表层沉积物略有粗化,三峡水库三期蓄水后入海沙量大幅减少,入海悬沙粗化,使得河口悬沙浓度减小,水流挟沙能力不足,表层沉积物向粗化趋势发展。

图 11 为砂—粉砂—黏土百分比多年变化特征,三峡水库蓄水前 1997~1998 年砂的含量较高,达 50%左右,2003~2006 年期间砂的百分数大幅减少,

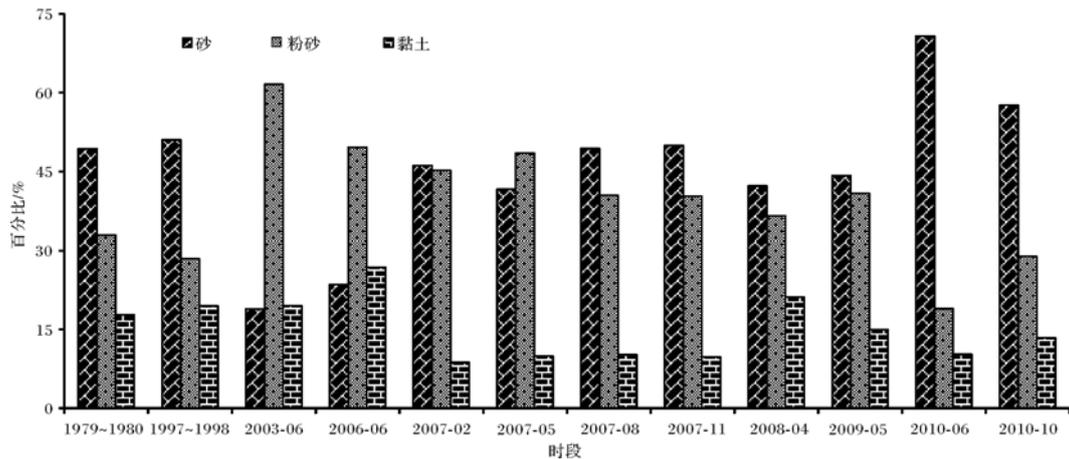


图 11 长江口外邻近陆架不同年份分组泥沙变化

Fig.11 Yearly changes of clay, silt and sand in the nearby shelf of the Yangtze River

4.2 砂—泥分界线的变化趋势及成因

将长江口外邻近陆架区域的砂—泥分界数据进行整理,以粒径 $d=0.063\text{ mm}$ 为分界粒径,将处理结果与上世纪 80 年代以前研究成果^[17]相比较。结果表明:2004~2007 年以 $31^{\circ}30'$ 分界,北侧无明显规律为交替变化,而 $31^{\circ}30'$ 以南表现为向口内推移;2008~2010 年砂—泥的分界线整体上向口内移动。砂—泥分界线向西移动,表明淤泥带外缘遭受侵蚀,沉积物存在一定的粗化趋势。采用 2010 年 6 月和 10 月数据分析季节变化,在枯季砂—泥分界线大幅向西移动,洪季则向东移动(图 12)。主要原因为:在枯季长江流域进入河口的径流量较洪季大幅减少,在径流和潮流水动力对比中,枯季潮径比大于洪季,使得枯季潮流上溯动力增加,涨潮过程中潮流携带泥沙能力增加,河床表层大量泥沙悬起引起侵蚀,使得沉积物表现为粗化趋势。

已有研究表明,长江河口邻近陆架区域的悬沙浓度在 123° 以东,在流域泥沙变化情况下,悬沙浓度变化不明显^[41]。文献^[18-20]将砂泥分界线变动原因分为两类:①泥质沉积物的侵蚀暴露了下面的砂质沉积物;②砂质沉积物沉积在泥质之上。并认为砂泥分界线的移动是原因①所致^[18-20]。本研究将其进行丰

2007~2010 年期间砂的百分数明显增加;蓄水初期粉砂百分数最大,其后表现为减少趋势;黏土百分数为先增加后减少,在 2006 年达到最大。对比图 7 中砂、粉砂和黏土等值线可知,相同百分比等值线为整体平移,其中部分为交替变化,虽然 3 组泥沙和中值粒径存在一定趋势性变化,但判断口外邻近陆架全面或整体粗化这一结论,仍需进行大量观测予以证实。

富,增加两者综合作用的结果,并从水动力、悬沙浓度和引证地貌变化对其进行详细描述。长江流域入海泥沙量减少,使得邻近陆架区域悬沙浓度降低^[42],致使表层细颗粒沉积物被携带,使得下层的砂质沉积物暴露出来,使得中值粒径增加。在径流和潮流平衡时,河口沉积区域不会发生较大变化,三峡水库蓄水以来,改变了径流下泄过程,这一改变使长江河口径流和潮流作用的潮流界面下移^[43],使得河口水动力作用过程中径流作用增强但改变有限。但在口外潮流的影响首先受海域海平面变化影响,近 30 余年(1977~2011 年)海平面上升了 30 cm ^[44],相对增加了邻近陆架区域的潮汐动力,潮流动力的增强,使得陆架砂质沉积物中较细颗粒泥沙被悬起,携带至河口三角洲区域。因此,径流和潮流水动力的增加或减弱,均会对陆架区域表层沉积物颗粒特征造成影响。在砂泥分界线以西水下区域,流域入海沙量锐减,河口区悬沙浓度减小,使得三角洲前缘处于侵蚀状态,使得泥质沉积物侵蚀暴露了下层的砂质沉积物,使得沉积物粒径向粗化趋势发展。砂泥分界线移动区域,虽然长江口海域(124° 以东)悬沙浓度增减趋势不明显^[42],但近年海平面上升,使得潮汐动力将略有增强,使得原有砂质沉积物中较细颗粒泥沙悬起携带至

河口区域。由于河口最大浑浊带区域为河口滞流点和滞沙点活动区域,也是河口重要泥沙淤积区域,较粗颗粒泥沙将在该区域沉积,使得河口区域的沉积物粗化。综上,长江口陆架区域表层沉积物砂泥分界线变化是综合作用的结果,未来一段时间,砂质沉积物因海平面上升等影响使得再悬浮加强,悬浮泥沙沉积在海滨区域的作用将会增强。

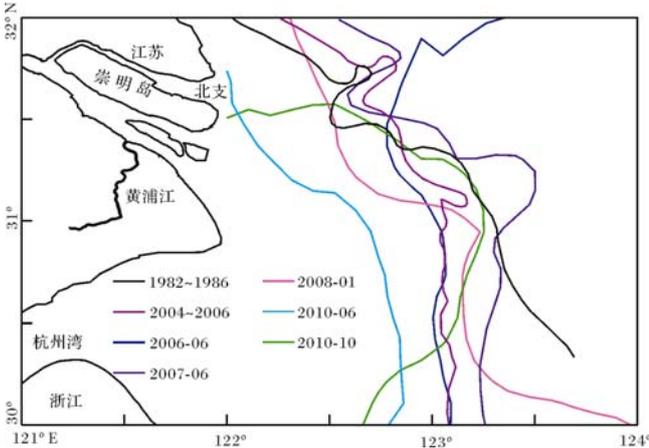


图 12 长江口外邻近陆架区域砂—泥分界多年变化
Fig.12 Secular variation of the sand-silt boundary in the nearby shelf of the Yangtze River

4.3 泥质区变化特征及趋势

长江口外邻近陆架的泥质区是沉降速率较大的区域^[45],是长江入海泥沙“汇”的体现,且泥质区变化的主要影响因素为长江入海主泓位置和采样位置等有关^[46]。整理历年泥质区位置和面积变化可知,将 2004~2010 年成果与早期文献^[17]成果相比,泥质区面积呈现减小的趋势,同时位置存在向南偏移。1977 年以前泥质区相连,1978~1979 年、2008 年和 2010 年泥质区表现为非整体,由 2~3 个区域组成,面积表现为减少,且位置表现为向南偏移(图 13)。自 1998 年起,由于北槽实施了深水航道整治工程,改变了南槽和北槽的分流比,破坏了原有的水动力平衡。北槽深水航道整治工程实施过程中的 1998~2010 年期间得南支分流比增加,径流和潮流对比过程中径流占优势。已有研究表明,落潮流入海向南偏移,由于水动力的增强,使得原有的泥质区表现为冲刷趋势,将泥质区分为几个小部分组成。同时自上世纪 80 年代中期,入海的沙量和含沙量也表现为减少的趋势,使得河口区域悬沙浓度也表现为减少趋势,即引起表层泥沙的再悬浮,两者综合作用下使得长江口邻近陆架区域的泥质区面积减少,且向南偏移。

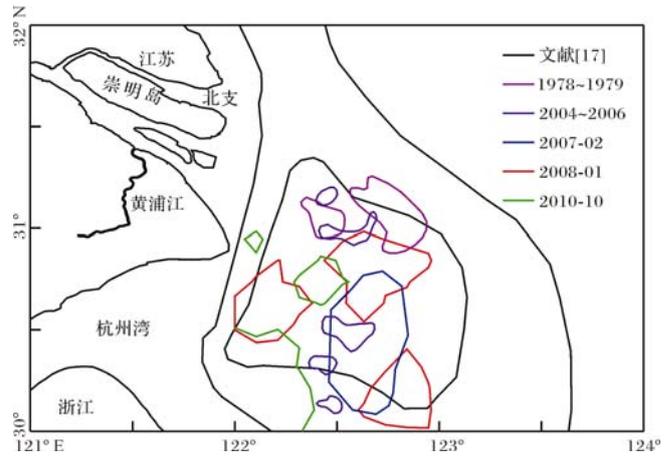


图 13 长江口外邻近陆架区域泥质区域多年变化
Fig.13 Secular variation of the argillaceous zone in the nearby shelf of the Yangtze River

5 结论

长江口邻近陆架区域中值粒径分布表现东粗西细,北粗南细的分布格局,近期(2008~2011 年)较 2003~2006 年表现为粗化趋势;粉砂百分比分布为东北向西南为减小,粉砂和黏土均为东北向西南为增加趋势,其中整个区域黏土与粉砂百分比的比值在 0.10~0.83 之间;砂的百分含量表现为增加,粉砂和黏土表现为减少趋势;砂—黏土分界线在 2003~2006 年北侧(31°30'以北)为交替变化,2007~2010 年为向西移动,南侧(31°30'以南)2003~2010 年均为向西移动;泥质区域在三峡水库蓄水后面积减小,位置存在南移趋势。三峡水库蓄水使得长江流域入海泥沙量和含沙量减少、悬沙颗粒变细,分组沙量的组分存在趋势性变化,使得沉积物颗粒粗化,长江口深水航道整治工程及自然因素的作用使得泥质区域南移,同时砂—泥分界线的变化主要受自然因素,流域变化次之。本文对河口营养盐、离子输运、底栖生物等生态安全要素和生态安全评价的研究有一定借鉴意义。

致谢 研究过程中引证和引用了大量文献数据,在此对原文献数据作者表示感谢,使得论文得以进行长系列比较,对长江口外邻近陆架的表层沉积物有了较深刻的认识。

参考文献(References)

1 周晓静. 东海陆架细颗粒沉积物组成分布特征及其物源指示[D]. 青岛:中国科学院海洋研究所,2009:27-113 [Zhou Xiaojing. The source and composition of fine-grained sediment deposited on the East

- China Sea Shelf [D]. Qingdao: Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, 2009: 27-113]
- 2 黄亮, 张国森, 吴莹, 等. 东海内陆架表层沉积物中黑碳的分布及来源[J]. 地球与环境, 2012, 40(1): 63-69 [Huang Liang, Zhang Guosen, Wu Ying, *et al.* Distribution and source of black carbon in the surface sediment of the inner continental of the East China Sea [J]. Earth and Environment, 2012, 40(1): 63-69]
 - 3 于培松, 薛斌, 潘建明, 等. 长江口和东海海域沉积物粒径对有机质分布的影响[J]. 海洋学研究, 2011, 29(3): 202-208 [Yu Peisong, Xue Bin, Pan Jianming, *et al.* Impact of sediment grain size on the distribution of organic matter in Changjiang River Estuary and East China Sea [J]. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(3): 202-208]
 - 4 王华新, 钱微微. 长江口表层沉积物有机碳分布及其影响因素[J]. 海洋科学, 2011, 35(5): 24-31 [Wang Huaxin, Xian Weiwei. Distribution of the total organic carbon of surface sediment and its influence factors in the Yangtze River Estuary [J]. Marine Sciences, 2011, 35(5): 24-31]
 - 5 章伟艳, 金海燕, 张富元, 等. 长江口—杭州湾及其邻近海域不同粒级沉积物有机碳分布特征[J]. 地球科学进展, 2009, 24(11): 1202-1209 [Zhang Weiyang, Jin Haiyan, Zhang Fuyuan, *et al.* Organic carbon distribution in the Yangtze River Estuary-Hangzhou Bay and its adjacent sea area [J]. Advances in Earth Science, 2009, 24(11): 1202-1209]
 - 6 Lu X X, Song J M, Yuan H M, *et al.* Grain-size related distribution of nitrogen in the southern Yellow Sea surface sediments [J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2005, 23(3): 306-316
 - 7 何会军, 于志刚, 姚庆祯, 等. 长江口及毗邻海区沉积物中磷的分布特征[J]. 海洋学报, 2009, 31(5): 19-30 [He Huijun, Yu Zhigang, Yao Qingzhen, *et al.* Distribution of phosphorus in sediments from the Changjiang Estuary and its adjacent sea [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(5): 19-30]
 - 8 杨世纶. 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]
 - 9 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]
 - 10 陈沈良, 严肃庄, 李玉中. 长江口及其邻近海域表层沉积物分布特征[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(2): 152-156 [Chen Shenliang, Yan Suzhuang, Li Yuzhong. Characteristics of surface sediment distribution in the Yangtze Estuary and its adjacent waters [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(2): 152-156]
 - 11 董爱国, 翟世奎, ZABEL Matthias, 等. 长江口及邻近海域表层沉积物中重金属元素含量分布及其影响因素[J]. 海洋学报, 2009, 31(6): 54-68 [Dong Aiguo, Zhai Shikui, ZABEL Matthias, *et al.* The distribution of heavy metal contents in surface sediments of the Changjiang Estuary in /china and surrounding coastal areas [J]. Acta Oceanologica Sinica, 2009, 31(6): 54-68]
 - 12 董爱国. 长江口及邻近海域沉积物重金属元素地球化学特征及其人类活动的响应[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008: 28-35 [Dong Aiguo. Geochemical characters of heavy metals and its responds to human activity in sediments of Yangtze estuary and surrounding coastal area, China [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008: 28-35]
 - 13 张晓东, 翟世奎, 许淑梅. 长江口外近海表层沉积物粒度的级配特征及其意义[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]. Periodical of Ocean University of China, 2007, 37(2): 328-334]
 - 14 田姗姗, 张富元, 阎丽妮, 等. 东海西南陆架表层沉积物粒度分布特征[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2009, 29(5): 13-20 [Tian Shanshan, Zhang Fuyuan, Yan Lini, *et al.* Distribution characteristics of granularities of surface sediments in the southwestern shelf of the East China Sea [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2009, 29(5): 13-20]
 - 15 庄克琳. 长江水下三角洲的沉积特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2005: 57-66 [Zhuang Kelin. Sedimentation features in the subaqueous Yangtze Delta [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005: 57-66]
 - 16 庄克琳, 毕世善, 刘振夏, 等. 长江水下三角洲的动力沉积[J]. 海洋地质与第四纪地质, 2005, 25(2): 1-9 [Zhuang Kelin, Bi Shipu, Liu Zhenxia, *et al.* Dynamic sedimentation in the subaqueous Yangtze (Changjiang) Delta [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2005, 25(2): 1-9]
 - 17 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. 黄东海地质. 北京: 科学出版社, 1982: 39-51 [Qin Yunshan, Zheng Tiemin. A study of distribution pattern of sediment in the continental shelf of the East China Sea [C]//Department of Marine Geology, Institute of Oceanology, Academia Sinica. The Geology of the Yellow Sea and the East China Sea. Beijing: Science Press, 1982: 39-51]
 - 18 罗向欣. 长江中下游、河口及邻近海域底床沉积物粒径的时空变化—自然机制和人类活动的影响[D]. 上海: 华东师范大学, 2012: 25-80 [Luo Xiangxin. The spatial and temporal variation in sediment grain size in the middle and lower Yangtze River, Yangtze Estuary and the offshore area adjacent to Yangtze Estuary—the impact of natural factors and human activities [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012: 25-80]
 - 19 罗向欣, 杨世纶, 张文祥, 等. 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[J]. 沉积学报, 2012, 30(1): 137-147 [Luo Xiangxin, Yang Shilun, Zhang Wenxiang, *et al.* Recent spatial pattern and temporal variation in sediment grain size in the inshore area adjacent to the Yangtze Estuary and Hangzhou Bay [J]. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(1): 137-147]
 - 20 Luo X X, Yang S L, Zhang J. The impact of the Three Gorges Dam on the downstream distribution and texture of sediments along the middle

- and lower Yangtze River (Changjiang) and its estuary and subsequent sediment dispersal in the East China Sea [J]. *Geomorphology*, 2012, 179: 126-140
- 21 李维显, 荣人德, 冯诗齐. 长江口海区表层沉积物及其有机质分布特征[J]. *上海地质*, 1987(23): 40-53 [Li Weixian, Rong Rende, Feng Shiqi. Yangtze Delta sea sediments and organic matter distribution [J]. *Shanghai Geology*, 1987(23): 40-53]
- 22 Chen Zhongyuan, Song Baoping, Wang Zhanghua, *et al.* Late Quaternary evolution of the subaqueous Yangtze Delta, China; sedimentation, stratigraphy, palynology, and deformation [J]. *Marine Geology*, 2000, 162(2): 423-441
- 23 Youn Jeungsu, Yang Shouye, PAPK Yong Ahn. Clay minerals and geochemistry of the bottom sediments in the northwestern East China Sea [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2007, 25(3): 235-246
- 24 窦衍光. 长江口邻近海域沉积物粒度和元素地球化学特征及其对沉积环境的指示[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2007: 15-34 [Dou Yanguang. Characteristics of sediment granularity, element geochemistry and their significance for identifying sedimentary environment in the contiguous sea areas of Changjiang River Estuary [D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, Sea, 2007: 15-34]
- 25 黄龙, 张志珣, 杨慧良. 东海陆架北部表层有用重砂资源形成条件及成矿远景[J]. *海洋地质前沿*, 2012, 28(7): 10-16 [Huang Long, Zhang Zhixun, Yang Huiliang. Formation and prospect of valuable heavy minerals in surface sediments in the northern East China Sea shelf [J]. *Marine Geology Frontiers*, 2012, 28(7): 10-16]
- 26 史晓宁. 东海陆架沉积物中硫、铁形态分析及其早期成岩作用[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012 [Shi Xiaoning. Speciation and early diagenesis study of sulfur and iron in sediments of the East China Sea continental shelf [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2012]
- 27 黄德坤. 基于核素示踪的长江口、东海和海南东部近海泥沙的沉降过程[D]. 上海: 华东师范大学博士论文, 2012: 50-78 [Huang Dekun. Applications of radionuclides to trace sources, transport pathways and depositions of sediments in the Changjiang Estuary, East China Sea and coastal environment of eastern Hainan Island [D]. Shanghai: East China Normal University, 2012: 50-78]
- 28 Yang S L, Zhao Q Y, Belkin I M. Temporal variation in the sediment load of the Yangtze river and the influences of human activities [J]. *Journal of Hydrology*, 2000, 263(1/2/3/4): 56-71
- 29 Yang S L, Zhang J, Zhu J, *et al.* Impact of dams on Yangtze River sediment supply to the sea and delta intertidal wetland response [J]. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 2005, 110(F3): 1-12
- 30 Yang S L, Zhang J, Dai S B, *et al.* Effect of deposition and erosion within the main river channel and large lakes on sediment delivery to the estuary of the Yangtze River [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007, 112(F02005): 1-13
- 31 Yang Z, Wang H, Saito Y, *et al.* Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment load to the sea; the past 55 years and after the Three Gorges Dam [J]. *Water Resources Research*, 2006, 42(4): 1-10
- 32 Dai S B, Lu X X, Yang S L, *et al.* A preliminary estimate of human and natural contributions to the decline in sediment flux from the Yangtze River to the East China Sea [J]. *Quaternary International*, 2008, 186(1): 43-54
- 33 Dai S B, Yang S L, Li M. The sharp decrease in suspended sediment supply from China's rivers to the sea: anthropogenic and natural causes [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2009, 54(1): 135-146
- 34 张珍, 杨世伦, 李鹏. 三峡水库一、二期蓄水对下游悬沙通量影响的计算[J]. *地理学报*, 2010, 65(5): 623-631 [Zhang Zhen, Yang Shilun, Li Peng. Quantifying the influence of water impoundment phases I and II of the Three Gorges Reservoir on downstream suspended sediment flux [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(5): 623-631]
- 35 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
- 36 何坚, 潘少明, 沙红良, 等. 长江大通站床沙粒径变化及其对流域工程建设的响应分析[J]. *南京大学学报: 自然科学版*, 2010, 46(3): 349-357 [He Jian, Pan Shaoming, Sha Hongliang, *et al.* The analysis on the grain size variation of bed materials at Datong Hydrological Station and its response to the project constructions along the Yangtze River [J]. *Journal of Nanjing University: Natural Sciences*, 2010, 46(3): 349-357]
- 37 Wang Zhangqiao, Chen Zhongyuan, Li Maotian, *et al.* Variations in downstream grain-sizes to interpret sediment transport in the middle-lower Yangtze River, China: A pre-study of Three-Gorges Dam [J]. *Geomorphology*, 2009, 113(3/4): 217-229
- 38 Guo Leicheng, He Qing. Freshwater flocculation of suspended sediments in the Yangtze River, China [J]. *Ocean Dynamics*, 2012, 61(2): 371-386
- 39 Flemming B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams [J]. *Continental Shelf Research*, 2000, 20(10): 1125-1137
- 40 Van Ledden M. Sand-mud segregation in estuaries and tidal basins [D]. Delft: Delft University of Technology, 2003: 17-35
- 41 杨云平, 李义天, 孙昭华, 等. 长江口最大浑浊带悬沙浓度变化趋势及成因[J]. *地理学报*, 2013, 68(9): 1240-1250 [Yang Yunping, Li Yitian, Sun Zhaohua, *et al.* Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: Its trend and causes [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(9): 1240-1250]
- 42 Yang Yunping, Li Yitian, Sun Zhaohua, *et al.* Suspended sediment load in the turbidity maximum zone at the Yangtze River Estuary: The trends and causes [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1): 129-142
- 43 杨云平, 李义天, 韩剑桥, 等. 长江口潮区和潮流界面变化及对工程响应[J]. *泥沙研究*, 2012(6): 46-51 [Yang Yunping, Li Yitian, Han Jianqiao, *et al.* Variation of tide limit and tidal current limit in Yangtze Estuary and its impact on projects [J]. *Journal of Sediment Research*, 2012(6): 46-51]
- 44 中国国家海洋局. 2011年中国海平面公报[R]. 2011 [State Oce-

- anic Administration People's Republic of China. Journal of China Ocean Level Information, 2011[R]. 2011]
- 45 刘红,何青,Gert Jan Weltje,等. 长江入海泥沙的交换和输移过程-兼论泥质区的“泥库”效应[J]. 地理学报,2011,66(3):291-304 [Liu Hong, He Qing, Gert Jan Weltje, *et al.* Sediment exchange and transport processes in the Yangtze River Estuary: Concurrent discussion on the effects of sediment sink in the muddy area [J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(3): 291-304]
- 46 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]. 沉积学报,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]

Surface Sediment in the Nearby Shelf of the Yangtze River: Change and Causes

YANG Yun-ping^{1,2} LI Yi-tian¹ SUN Zhao-hua¹ DENG Jin-yun¹

(1. Wuhan University, State Key Laboratory of Water Resources & Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072;

2. Key Laboratory of Engineering Sediment, Tianjin Research Institute for Water Transport Engineering, Ministry of Transport, Tianjin 300456)

Abstract: The transportation to a sea of sediment with water founds the linkage mechanism of from “source” to “sink” and the response of surface sediment characteristics in the nearby shelf to factors of incoming sediment from the watershed. Take the response of the surface sediment in the offshore area of the Yangtze River to the characteristics of the incoming sediment from the watershed for example. Results showed that: ①for median grain size, it was large in the east and north while small in the west and south. Silt percentage decreased from northeast to southwest while silt and clay showed trends of increasing from northeast to southwest. And the ratio of clay percentage to silt percentage in the whole area was 0.12~0.83. ②compared to that in 2003~2006, sand percentage in 2008~2011 rose while silt and clay percentages showed trends of dropping, and surface sediment tended to be larger. ③The north part (north of 31°31′) of the sand-silt boundary changed alternately during 2003~2007, shifted to the west during 2007~2010 while the south part (south of 31°31′) shifted to the west for the whole period of 2003~2010. The shift of the boundary was mainly caused by the deposition of sandy sediment from sea area on argillaceous sediment, with diffusion deposition playing a secondary role. ④The argillaceous zone shrank after the impoundment of the Three Gorges and shifted slightly to the south, which was mainly influenced by the training works and natural factors.

Key words: surface sediment; trends and causes; sand-silt boundary; the argillaceous zone; nearby shelf; Yangtze River Estuary