

文章编号:1000-0550(2020)03-0528-10

DOI: 10.14027/j.issn.1000-0550.2019.064

长江远端三角洲多源沉积分异作用及其动力机制

丛静艺^{1,2}, 袁忠鹏^{1,2}, 胡刚^{2,3}, 毕世普^{2,3}, 张勇^{2,3}, 王永红¹, 马晓红^{1,2}, 江云水^{2,3}, 宁泽^{1,2}

1. 中国海洋大学海洋地球科学学院, 山东青岛 266100
2. 中国地质调查局青岛海洋地质研究所, 山东青岛 266071
3. 海洋国家实验室海洋矿产资源评价与探测技术功能实验室, 山东青岛 266071

摘要 长江是亚洲第一大河,具有丰沛的水沙通量,其形成的长江三角洲和陆架沉积中心一直是学者的研究重点,但对受到多种物质来源供给的长江远端三角洲涉及较少。针对长江远端三角洲南部的海底表层沉积物和河流沉积物,对该地区的表层沉积物性质和分布特征等进行了分析。研究表明,该地区表层沉积物类型主要为泥、粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂等类型,零星分布含砾沉积物,沉积物粒度自西北向东南方向逐渐变粗,与海岸带呈平行分布;该地区沉积物主体为长江源物质,近岸南北两区域主要受到闽江和瓯江河流物质混合作用,东南区域主要为台湾河流物质影响;该区沉积分异模式主要受到东海环流体系的控制影响,浙闽沿岸流与台湾暖流形成的切变锋起到“水障”作用,使长江物质主要存在于中西部地区,同时西部近岸由于受到浙闽沿岸流的季节变化,带来了近岸闽江和瓯江等中小河流物质的混合影响,而东南部则主要受到台湾暖流带来的台湾物质混合作用。该研究对研究区沉积物的物质来源和动力因素等现代过程进行了细致划分,对长江远端三角洲地质时期的形成演化具有一定的辅助作用。

关键词 长江三角洲;东海内陆架;物源;沉积分异;动力环境

第一作者简介 丛静艺,女,1991年出生,博士研究生,海洋地质,E-mail: cji_yoyo2013@sina.com

通信作者 胡刚,男,教授级高工,E-mail: hg_jinan@163.com

中图分类号 P736.21 **文献标志码** A

0 引言

陆架边缘海地区是陆海相互作用的关键地带,包含着丰富的气候与海平面变化的信息^[1],包含了陆源碎屑沉积物从“源”到“汇”再到“源”的整个转换过程。陆架边缘海地区陆源碎屑沉积物的输入与搬运对理解全球变化和生物地球化学循环过程具有重要的意义^[2-4]。作为连接世界上最大大陆—欧亚大陆和最大的海洋——太平洋的东海陆架,是中国东部乃至世界上典型的宽缓陆架,其研究作用至关重要。

亚洲第一大河——长江,是东海陆架边缘海沉积物的主要来源,长江流域陆源碎屑沉积物受到风化、剥蚀、搬运和沉积等过程,在东海陆架边缘海的“源—汇”沉积过程中扮演者“一号角色”。长江巨量

的水沙通量在长江河口及邻近陆架地区的搬运与沉积形成了独具特色的沉积体系^[5],而其中就包含了分布于东海内陆架地区长达800 km的条带状泥质沉积体,是长江远端三角洲的主体(图1)。该泥质沉积体被认为是在末次冰后期的全新世高海平面以来长江细颗粒物质在闽浙沿岸流的输运下形成发育的^[5-9],由于泥质沉积区具有连续沉积、沉积速率高等特点,因此,也成为了全新世高分辨率沉积演化和环境变化的天然实验室。前人通过粒度、地球化学和矿物等多种指标,开展了基于该泥质沉积体的全新世以来高分辨率古气候与古海洋研究^[5-6,8,10-19]。

长江沉积物出河口以后,在门口外和瓯江口南侧分别形成两个泥质沉积中心^[5],东海内陆架存在的这两个沉积中心是以往研究的重点,能够揭示高分

收稿日期:2019-02-18; 收修改稿日期:2019-07-07

基金项目:国家自然科学基金项目(41676052);国家留学基金项目(201609370007);中国地质调查项目(DD20190236,DD20160137,DD20190205, GZH20140204) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41676052; The State Scholarship Fund Sponsored by China Scholarship Council, No.201609370007; China Geological Survey, No. DD20190236, DD20160137, DD20190205, GZH20140204]

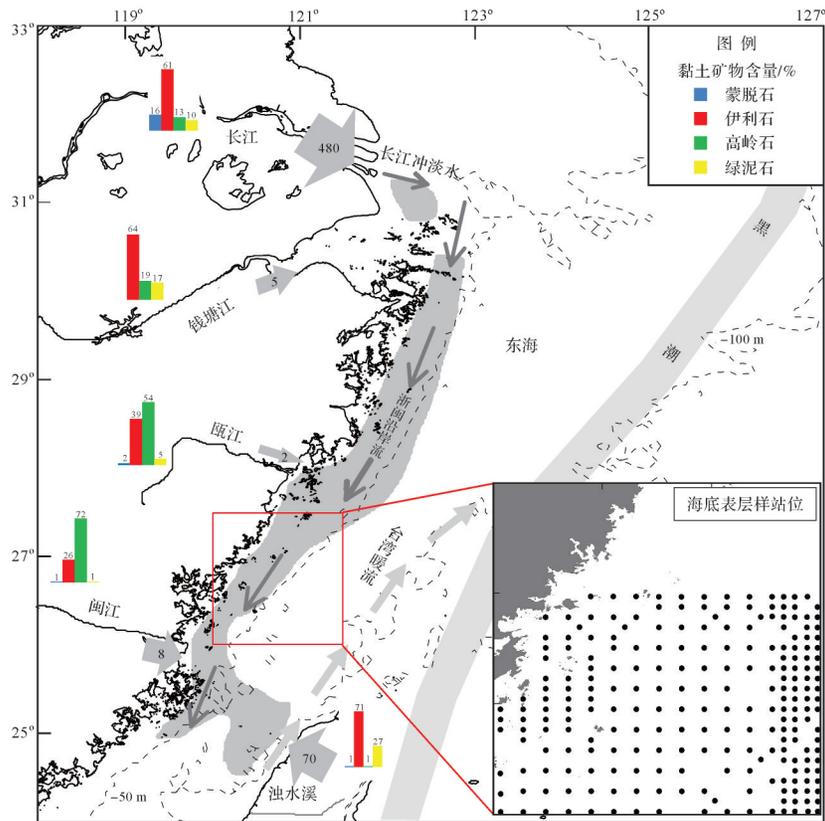


图1 研究区位置及实际材料图

柱状图为河流样品黏土矿物组分;河流泥沙通量单位为Mt/a;沿岸条带状灰色区域为泥质沉积区

Fig.1 Location of study area and sampling stations. Histograms represent the clay mineral composition of the river samples and fluvial sediment discharge (Mt/a). Gray area along the coastal strip represents mud area

辨率的沉积演化过程。自全新世高海平面以来,东海陆架区的现今环流体系得以确定^[5-6],而现代沉积过程恰恰可以起到“将今论古”的作用^[20],海底表层沉积物的分布特征和特性主要受到了物质来源和沉积环境两个因素决定^[21]。因此,本文试图利用长江远端三角洲地区的表层沉积物,探讨泥质沉积体南部多种物质来源情况下现代表层沉积物的分布与特性,揭示研究区现代沉积过程与沉积环境,将有助于提高泥质沉积体历史演化过程的认识。

1 研究区概况

东海是位于中国大陆东部的边缘海,平均水深约370 m,最大水深处为2 322 m。宽约740 km(东西向),长约1 300 km(东北西南向),总面积约77×10⁴ km²,仅次于南海。东海海区拥有宽大而平缓的陆架,大陆架和大陆坡面积约占总面积的71%,其中大陆架面积约占66%。内外陆架以50~60 m等深线分界,内陆

架面积约为大陆架的五分之一,外陆架地形十分平坦,北部地形起伏较小,南部地形起伏较大^[22]。长江,是我国第一大河,发源于青藏高原,注入东海。其流域面积约180×10⁴ km²,年径流量可达10 600亿立方米,输沙量达4.8亿吨以上。现代长江三角洲的沉积主体主要为来自长江的细粒物质就近堆积形成;浙闽沿岸泥质沉积区,即长江远端三角洲,是由一部分细粒物质沿着海岸继续向南输送而成^[9](图1)。长江三角洲的形成是东海内陆架最重要的地质事件。

东海沉积物的搬运和沉积受东海流系的影响^[23],影响该地区的主要流系包括黑潮、台湾暖流和浙闽沿岸流等^[24]。黑潮是北太平洋的一支高温高盐、流速强、流量大的西部边界流,多年平均流量约为2 550×10⁴ m³/s。它起源于北赤道,经过菲律宾,沿中国台湾东岸往东北向流动。台湾暖流是闽浙近海海流的主要组成部分,具有高温高盐特征,流量在(150~300)×10⁴ m³/s之间,其紧靠浙江近海处较强的温度锋和盐度锋面北上,流向几乎常年沿等深线流向东北,浙

闽沿岸上升流的形成关键就是靠台湾暖流的驱动^[25]。浙闽沿岸流是低盐水体,它是由长江、钱塘江、闽江等河流入海与附近海水混合而成。其流向和流幅随季节而变化,夏季受强大长江径流量的影响,主流可抵达济州岛附近,形成长江冲淡水;冬季向南与浙闽沿岸水汇集,可达台湾海峡南部。

2 材料与试验方法

依托于中国地质调查局“1:25万霞浦县幅海洋区域地质调查”项目,共取得包括长江、瓯江和闽江在内的64个河流沉积物,收集钱塘江和台湾浊水溪13个河流沉积物,在研究区内于2014年和2016年共取得海底表层沉积物230个,取样站位如图1所示。将河流与海底表层沉积物分别进行了粒度与黏土矿物测试分析工作。

粒度测试由国土资源部海洋地质实验检测中心完成。取原始样品10~20 g,先用双氧水和稀盐酸浸泡,以除去样品中的有机质和碳酸盐。洗盐后,加六偏磷酸钠溶液,在超声波中分散。之后使用Mastersizer—2000型激光粒度分析仪(英国马尔文(MALVERN)公司生产,测量范围为0.02~2 000 μm ,偏差<1%,重现性 $\phi 50 < 1\%$)进行粒度测试。

黏土矿物测试由中国科学院海洋地质与环境重点实验室完成。所有的样品在60 $^{\circ}\text{C}$ 下烘干72 h,将一定量的样品过湿筛提取小于63 μm 颗粒。取2 g小于63 μm 的样品,加入10%的双氧水,然后在60 $^{\circ}\text{C}$ 水浴下加入10%的醋酸溶液,去除有机质和碳酸盐。使用仪器为德国产D8 Advance型X射线衍射仪,仪器工作电压40 kV、电流40 mA, $\lambda=1.54178\text{\AA}$ (CuK α)。

扫描范围 $3^{\circ}\sim 35^{\circ}$ (2 θ),步长0.04 $^{\circ}/\text{s}$ 。扣除背景并平滑所得衍射图谱后,利用软件TOPAS 2.0拟合主要衍射峰面积,并提取特征峰强度值。黏土矿物(蒙脱石、伊利石、高岭石和绿泥石)的相对含量采用Biscaye^[26]方法计算。根据黏土矿物X射线衍射原始数据得到的波谱可以确定,本次实验测试精确分离并鉴定出了四类黏土矿物组分,以文中采用计算方法得到的数据准确可信,对采用统一试验方法和计算方法得到的数据可相互对比(图2)。

3 研究结果

3.1 表层沉积物粒度分布特征

通过计算表层沉积物平均粒度参数,表明研究区表层沉积物粒度平均为6.4 ϕ ,介于1.3~7.8 ϕ ,自西北向东南 ϕ 值减小,对应的沉积物粒度逐渐变粗。平均粒度自西北向东南梯度变化加大,说明西北部沉积物粒度相对一致,愈向东南方向沉积物粒度变化加快(图3)。

研究区表层沉积物主要包含砂、粉砂和黏土组分,仅在东南角个别站位出现少量砾石。其中砂组分(-1~4 ϕ)的平均含量为17.59%,介于0~92%,砂含量自西北向东南方向增加,含量变化逐渐与等深线平行分布,直到在东南方向达到含量最高值。粉砂组分(4~8 ϕ)的平均含量为56.7%,介于5.11%~77.04%,为研究区表层沉积物的优势组分,其含量分布成“驼峰型”分布,基本以50 m等深线为中心,中心粉砂含量相对较高,向两侧沉积物粉砂组分含量变小,且向东南方向变化梯度更大,减小更快。黏土组分(细于8 ϕ)平均含量为25.4%,介于1.9%~42.2%,

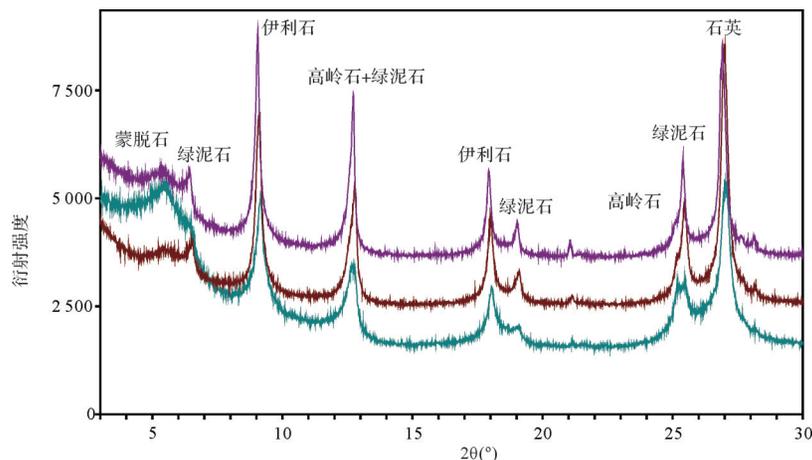


图2 研究区表层沉积物黏土矿物X射线衍射叠加波谱

Fig.2 Typical X-ray diffraction (XRD) patterns of surface sediments in study area

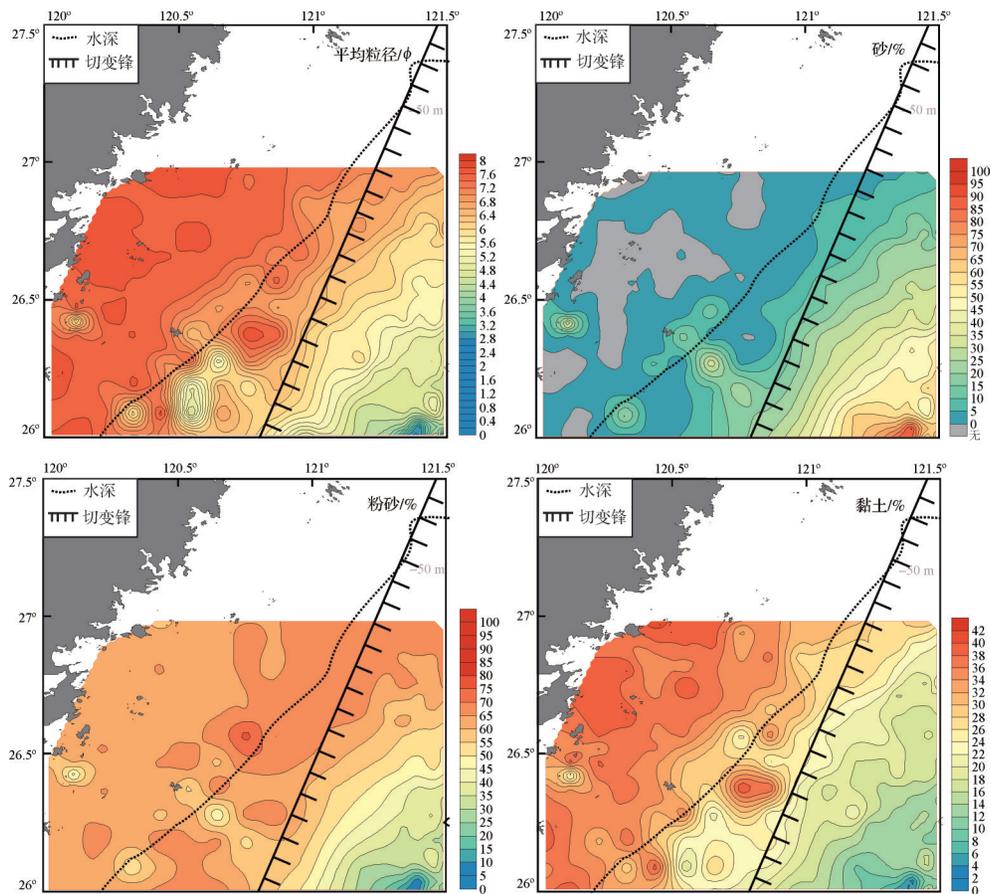


图3 研究区表层沉积物粒度参数分布特征(冬季锋面位置据^[27])

Fig.3 Distribution of grain size parameters of surface sediments in study area

除研究区中部有含量高值分布以外,其余分布特征主要是向东南方向含量依次减少,50 m水深外地区基本与水深线呈平行分布(图3)。

3.2 表层沉积物类型及分布

根据粒度参数计算结果,按照 Folk^[28]的分类方法,研究区沉积物类型主要包括泥(M)、粉砂(Z)、砂质泥(sM)、砂质粉砂(sZ)、粉砂质砂(zS)、砂(S)以及砾质泥(gM)等。其中砾质泥、砂和泥质砂等主要是零星分布,泥、粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂为四种主要类型(图4)。

泥为研究区分布最为广泛的沉积物类型,约占到研究区面积的40%以上,主要分布在研究区西北近岸区域,有粉砂零星分布在泥质区,另有一条带状泥分布在粉砂和砂质粉砂间。研究区中部主要为粉砂类型,约占研究区分布范围的20%,呈东北西南向带状分布,向西南方向变窄,并夹杂多种沉积物类型。粉砂类型分布区向海方向变为砂质粉砂,约占研究区范围30%,其中有含砾沉积物零星分布。东南角分布较粗的粉砂质砂类型,约占研究区范围的

10%左右,有砂质粉砂和泥质砂等类型点状分布其中。总体上,沉积物类型从近岸到外海,主要沉积物类型成平行海岸或水深线分布,50 m等深线以浅为泥质沉积物,以深地区主要为含砂或者砂质沉积物为主。

3.3 表层沉积物黏土矿物分布特征

沉积物的矿物成分具有一定的物源指示意义,反映了源区母岩风化、剥蚀、搬运以及沉积盆地内部生物活动与后生作用的综合过程。研究区表层沉积物黏土矿物组分主要由伊利石、蒙脱石、高岭石和绿泥石组成。

伊利石为黏土矿物的优势组分,平均含量为62.8%,介于42.1%~75.2%,在研究区主要以斑块状分布,研究区的东南部分是含量高值区。蒙脱石的平均含量为17.8%,介于4.8%~43.3%,分布特征与伊利石相仿,但含量变化与伊利石成反向,在东南区域为蒙脱石含量的低值区。高岭石平均含量为8.2%,介于3.6%~17.6%,其分布特征和含量变化趋势与蒙脱石分布类似。绿泥石平均含量为11.2%,介于

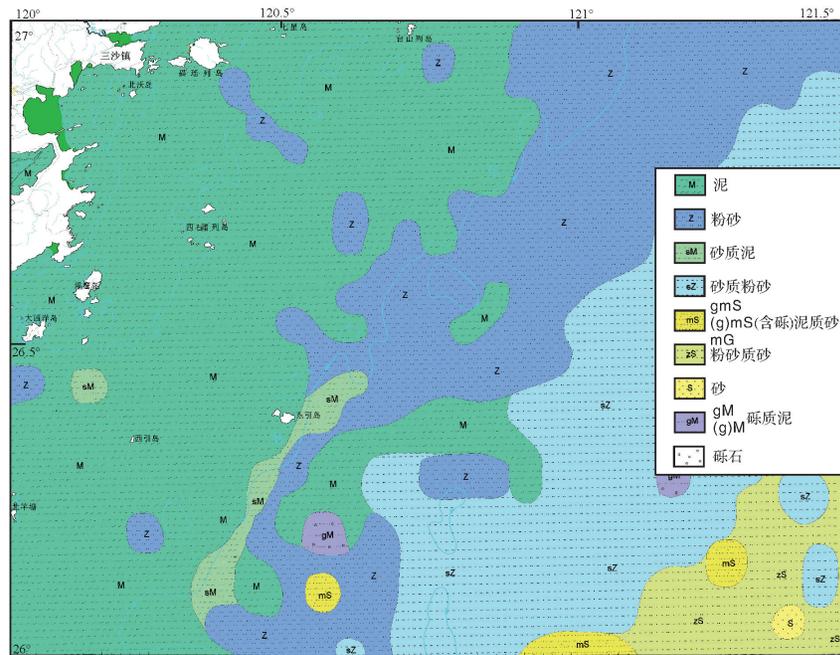


图4 研究区表层沉积物类型及分布(按照 Folk *et al.*^[28]分类)

Fig.4 Type and distribution of surface sediments in the study area (Folk *et al.*^[28] classification)

2.8%~19.5%,其分布特征和含量变化趋势与伊利石分布类似(图5)。总体来说,研究区表层沉积物中黏土矿物组分呈现斑块状分布特征,仅在中部50~60 m水深线附近含量等值线可贯通,呈现条带状分布。

4 讨论

4.1 长江远端三角洲物质混合

作为地表风化作用的典型产物,不仅包含了沉积物物质来源的有用信息,而且同时包含了沉积物运移和沉积过程信息^[29]。研究区是长江远端三角洲的南端,地处多种物质来源的交汇之地。由于南部不仅有瓯江、闽江物质的输入,而且与其相邻的台湾河流物质也是不可忽视的物源之一^[9]。根据本研究测试结果可以看到,对东海内陆架区有物质贡献的不同端元具有不同的黏土矿物组合形式,并且能够在三角图表明确的分离出来(图1,6),长江来源物质富含伊利石,且蒙脱石、高岭石和绿泥石均具有一定比例,瓯江、闽江和台湾浊水溪均少量或者不含蒙脱石为特征,瓯江和闽江基本为伊利石和高岭石为主要成分,而台湾河流以伊利石和绿泥石为主,这与以往研究结果均有较好对应^[17,30-32]。

由于该地区处于多条河流入海物质的交汇处,

每条河流都对研究区的水沙通量具有一定的贡献(图1),而且近年来越来越多的研究表明,中小河流的入海物质对世界边缘海沉积、全球海洋化学组成、碳循环等影响很大,中小型河流的作用以前很可能被明显低估了,尤其是低纬地区的一些中小河流输沙量巨大^[33]。浙闽沿岸中小河流入海物质是浙闽泥质带的重要组成部分^[34],甚至有人认为其是浙闽沿岸泥质带的主要来源^[35]。长江物质在冬季沿岸流作用下可被带到24°30' N的泉州湾附近^[6],研究区表层沉积物物质来源主要来自长江,其黏土矿物组合特征较为符合长江物质(图6),但研究区东南角蒙脱石含量极低,而且具有较高的绿泥石含量,明显受到了低蒙脱石高绿泥石沉积物的冲淡稀释作用(图5),这与台湾山区性河流沉积物的黏土组合特征极为相似,应该受到了台湾河流物质的影响。而近岸地区则相比中部含量等值线贯通,则分为两个区块分布特征,可能分别受到了北来的瓯江物质和北去的闽江物质影响。而西南区域蒙脱石含量较高,与闽江河流样品中蒙脱石极低矛盾,这一现象可能与蒙脱石的另一来源有关,火成岩遇水发生水解作用形成蒙脱石^[36-37]。福建东南区域受新构造运动的影响,中生代岩浆侵入、喷发频繁,发育火山岩^[38],遇到大量的水发生水解作用形成蒙脱石,导致研究区西南部海域蒙脱石含量最高。

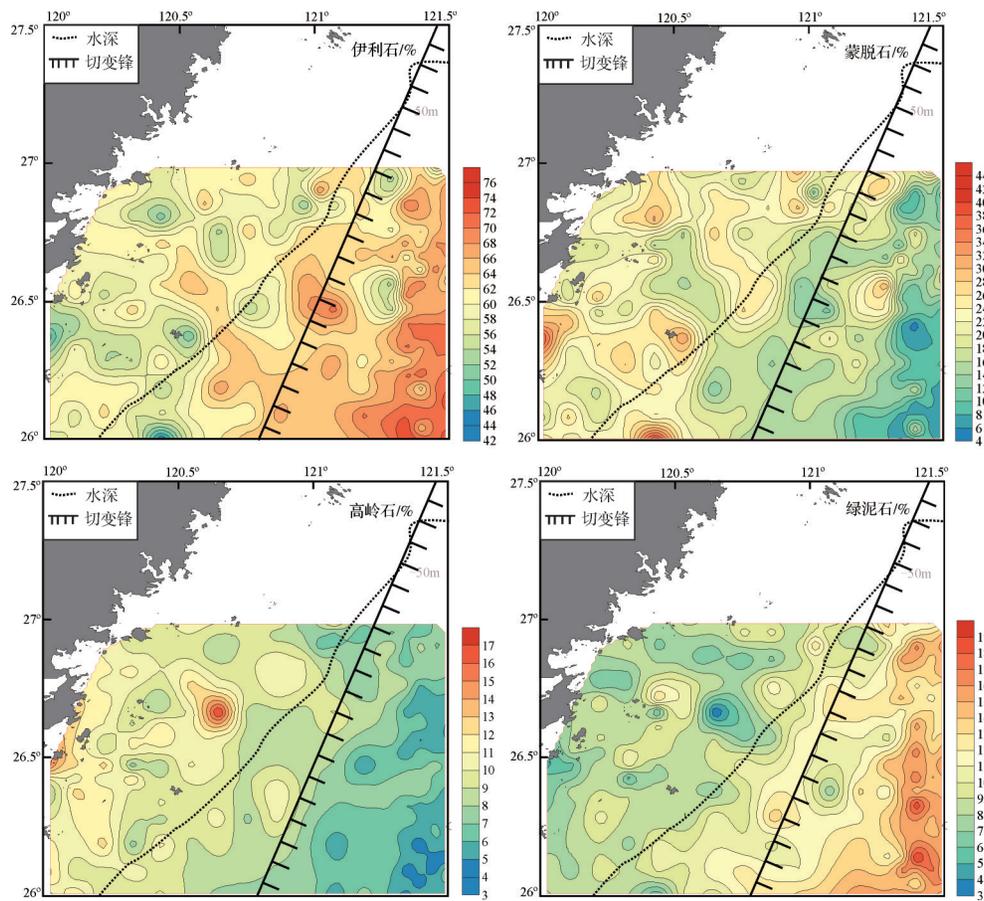


图5 研究区表层沉积物黏土矿物组分分布特征(冬季锋面位置据文献[27])

Fig.5 Distribution of clay mineral compositions of surface sediments in the study area

因此,由于长江的巨量泥沙供给,研究区表层沉积物主要来源于长江物质,但中小河流影响的混合影响作用不容忽视,东南主要受到了来自台湾河流物质的混合作用,而西部近岸地区则主要受到了瓯江与闽江物质来源的影响,可粗略的划分研究区内不同物质来源的沉积单元(图6,7)。

4.2 东海内陆架沉积分异的动力因素

海底表层沉积物的性质及其分布不仅受到物质来源的影响,也与海域环流动力条件紧密相关。影响本地区的主要环流体系就是台湾暖流和浙闽沿岸流系统,他们随季节强度和流向的变化对该区沉积物的分布起决定性作用(图1)。

首先,台湾暖流是闽浙近海海流的主干,它是影响东海陆架区的主要驱动力^[25]。台湾暖流(除表层外)几乎常年沿等深线流向东北,近底层尤为明显。而冬季偏北风盛行,表层流向偏南。夏季由于受到西南风的影响,台湾暖流得到加强,其表层水的前缘可达 31°N 。同时受海底地形的影响,台湾暖流运动

方向与等深线趋同,流速较大处常出现在等深线密集处, β 效应会增加流速,减小流幅^[39],将会导致沉积物粒度和黏土矿物等分布特征呈现与等深线一样的梯度变化,而且夏季也是台湾地区河流受台风影响能够产生巨量瞬时入海泥沙的主要季节,且其分选性差,粒径较粗。因此,台湾河流的入海物质将在夏季被加强的台湾暖流挟带北上,而且在水深50m附近受到了台湾暖流锋面“水障”作用的影响^[40],难以往西扩散。因此,较粗的台湾河流物质造成研究区东南部平均粒径变粗,砂含量增加,且黏土矿物组分含较高绿泥石,该地区受到了台湾河流物质的混合作用(图3,5)。

其次,浙闽沿岸流是一股低盐水体,是由沿岸河流入海与附近海水混合而成的。与台湾暖流暖流形成切变锋,长江的入海物质基本控制在锋面以西,且由于水流强度受到海岸摩擦影响减弱,导致近岸沉积物更细。浙闽沿岸流受季节变化的影响,夏季受长江强大入海径流控制,主流流向东北,影响范围可

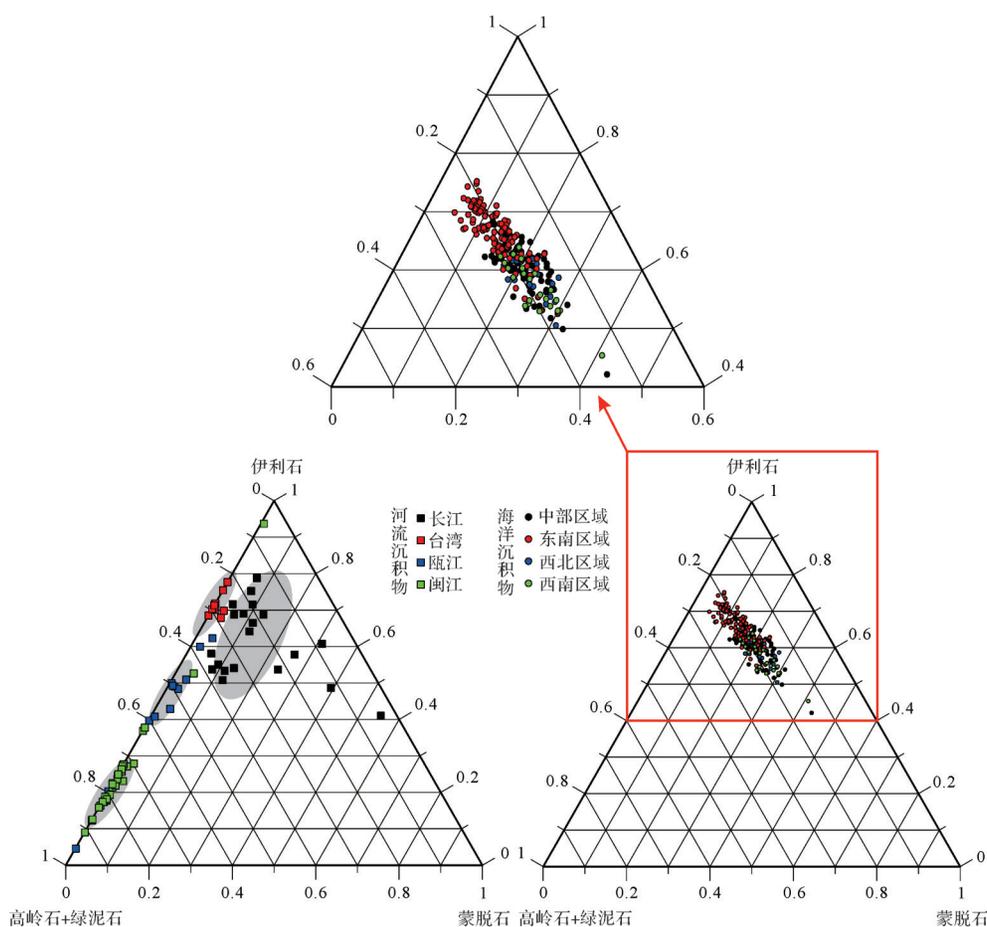


图6 研究区表层沉积物及多端元物源黏土矿物三角图

Fig.6 Triangular map of surface sediments and multi-source clay minerals in the study area

达济州岛一带,形成长江冲淡水舌,仅在长江口到舟山群岛近岸一段流向偏南^[24],长江入海物质“夏储冬输”^[41],受西南季风的加强,台湾暖流的分支将引起沿岸水体向北运输,从而使研究区西南区域可能会受到闽江入海物质的影响;而冬季该水体受到偏北冬季风的影响,主体自北沿岸南下,沿岸流将带来更多瓯江物质在研究区西北部(图5,7)。

因此,研究区由于受到了浙闽沿岸流和台湾暖流引起的切变锋的“水障”作用,东南地区(Ⅳ)主要受到了台湾暖流带来的台湾入海物质的混合影响,而研究区中部(Ⅲ)受浙闽沿岸流主体影响主要是长江物质,近岸地区(Ⅰ,Ⅱ)由于浙闽沿岸流的季节变化造成了瓯江和闽江等河流物质的混合作用(图6,7)。

5 结论

根据河流取样和海底表层物取样分析,对长江

远端三角洲地区多源物质背景下的沉积物分布特征、物质来源和动力影响因素进行了分析,得出以下主要结论:

(1) 研究区表层沉积物类型主要以泥、粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂为主,零星分布砾质泥,沉积物粒度由西北向东南方向变粗。

(2) 研究区为众多河流入海物质影响区域,黏土矿物组合特征表明中部主体为长江来源物质,西部南北近岸地区主要受到了闽江和瓯江等小河流物质的混合影响,而东南部主要受到了台湾河流入海物质的混合作用。

(3) 物源分区与研究区环流体系相对应,受到浙闽沿岸流和台湾暖流切变锋“水障”作用的影响,中西部地区主要为长江物质,且瓯江和闽江物质的影响主要是浙闽沿岸流季节变化带来的影响,而东南部主要是由于台湾暖流带来的台湾河流入海物质的混合影响。

致谢 对“业治铮”号全体技术人员在表层沉

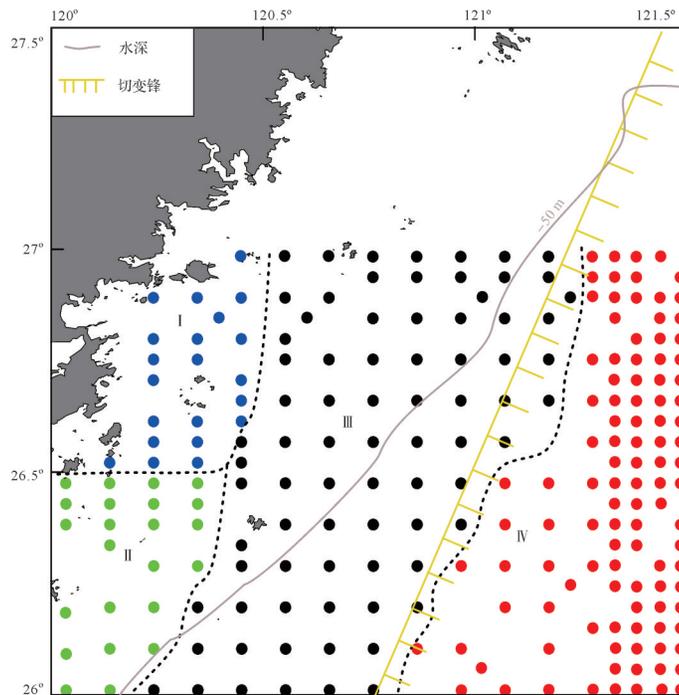


图7 研究区表层沉积物物源动力分区图(I区瓯江物质混合;II区闽江物质混合;III区长江物质;IV区台湾河流物质混合)(冬季锋面位置据文献[27])

Fig.7 Partition of provenance and dynamics of surface sediments in the study area: (I, blue) Mixing zone from Oujiang River; (II, green) mixing zone from Minjiang River; (III, black) main zone derived from Changjiang River; (IV, red) mixing zone from Taiwanese River

积物取样、青岛海洋地质研究所测试中心和中国科学院海洋研究所在样品分析测试中所做的工作一并感谢。

参考文献(References)

- [1] Walsh J P, Wiberg P L, Aalto R, et al. Source-to-sink research: Economy of the Earth's surface and its strata[J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 1-6.
- [2] Liu J T, Liu K J, Huang J C. The effect of a submarine canyon on the river sediment dispersal and inner shelf sediment movements in southern Taiwan[J]. *Marine Geology*, 2002, 181(4): 357-386.
- [3] McKee B A, Aller R C, Allison M A, et al. Transport and transformation of dissolved and particulate materials on continental margins influenced by major rivers: Benthic boundary layer and seabed processes[J]. *Continental Shelf Research*, 2004, 24(7/8): 899-926.
- [4] Gao S, Collins M B. Holocene sedimentary systems on continental shelves[J]. *Marine Geology*, 2014, 352: 268-294.
- [5] 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(17/18): 2141-2156.
- [6] Liu J P, Liu C S, Xu K H, et al. Flux and fate of small mountainous rivers derived sediments into the Taiwan Strait[J]. *Marine Geology*, 2008, 256(1/4): 65-76.
- [7] 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.
- [8] 徐方建, 李安春, 肖尚斌, 等. 末次冰消期以来东海内陆架古环境演化[J]. *沉积学报*, 2009, 27(1): 118-127. [Xu Fangjian, Li Anchun, Xiao Shangbin, et al. Paleoenvironmental evolution in the inner shelf of the East China Sea since the last deglaciation[J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2009, 27(1): 118-127.]
- [9] 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.
- [10] 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近2ka来东海内陆架的泥质沉积记录及其气候意义[J]. *科学通报*, 2004, 49(21): 2233-2238. [Xiao Shangbin, Li Anchun, Jiang Fuqing, et al. Recent 2000-year geological records of mud in the inner shelf of the East China Sea and their climatic implications[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(21): 2233-2238.]
- [11] 肖尚斌, 李安春, 蒋富清, 等. 近2ka闽浙沿岸泥质沉积物物源分析[J]. *沉积学报*, 2005, 23(2): 268-274. [Xiao Shangbin, Li Anchun, Jiang Fuqing, et al. Provenance analysis of mud along the Min-Zhe Coast since 2 Ka BP[J]. *Acta Sedimentologica Si-*

- nica, 2005, 23(2): 268-274.]
- [12] 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(2/3/4): 293-304.
- [13] 徐方建, 李安春, 李铁刚, 等. 中全新世以来东海内陆架泥质沉积物来源[J]. *中国石油大学学报(自然科学版)*, 2011, 35(1): 1-6, 12. [Xu Fangjian, Li Anchun, Li Tiegang, et al. Provenance of mud sediments in the inner shelf of East China Sea since Mid-Holocene [J]. *Journal of China University of Petroleum*, 2011, 35(1): 1-6, 12.]
- [14] 王昕, 石学法, 刘升发, 等. 近百年来长江口外泥质区高分辨率的沉积记录及影响因素探讨[J]. *沉积学报*, 2012, 30(1): 148-157. [Wang Xin, Shi Xuefa, Liu Shengfa, et al. High resolution sedimentary record within a hundred years on the mud area near the Changjiang Estuary and discussion of its impacting factors [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2012, 30(1): 148-157.]
- [15] Liu S F, Shi X F, Liu Y G, et al. Holocene paleoclimatic reconstruction based on mud deposits on the inner shelf of the East China Sea [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2013, 69: 113-120.
- [16] Liu S F, Shi X F, Fang X S, et al. Spatial and temporal distributions of clay minerals in mud deposits on the inner shelf of the East China Sea: Implications for paleoenvironmental changes in the Holocene [J]. *Quaternary International*, 2014, 349: 270-279.
- [17] 徐勇航, 陈坚, 王爱军, 等. 台湾海峡表层沉积物中黏土矿物特征及物质来源[J]. *沉积学报*, 2013, 31(1): 120-129. [Xu Yonghang, Chen Jian, Wang Aijun, et al. Clay minerals in surface sediments of the Taiwan Strait and their provenance [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2013, 31(1): 120-129.]
- [18] Liu X T, Li A C, Dong J, et al. Provenance discrimination of sediments in the Zhejiang-Fujian mud belt, East China Sea: Implications for the development of the mud depocenter [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2018, 151: 1-15.
- [19] Liu X T, Li A C, Dong J, et al. Nonevaporative origin for gypsum in mud sediments from the East China Sea shelf [J]. *Marine Chemistry*, 2018, 205: 90-97.
- [20] 高抒. 沉积记录研究的现代过程视角[J]. *沉积学报*, 2017, 35(5): 918-925. [Gao Shu. Discover more information from sedimentary records: views based on contemporary earth surface dynamic processes [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2017, 35(5): 918-925.]
- [21] 胡刚, 毕世普, 张勇, 等. 山东半岛中南部滨浅海地区表层沉积物分布特征及形成机制[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2015, 35(6): 17-23. [Hu Gang, Bi Shipu, Zhang Yong, et al. Distribution pattern and depositional mechanism of surface sediments offshore southern Shandong peninsula [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2015, 35(6): 17-23.]
- [22] 李家彪. 东海区域地质[M]. 北京: 海洋出版社, 2008. [Li Jiabiao. *Regional geology of East China Sea* [M]. Beijing: Ocean Press, 2008.]
- [23] 秦蕴珊, 赵一阳, 陈丽蓉. 东海地质[M]. 北京: 科学出版社, 1987. [Qin Yunshan, Zhao Yiyang, Chen Lirong. *Geology of East China Sea* [M]. Beijing: Science Press, 1987.]
- [24] 李凤岐, 苏育嵩. 海洋水团分析[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2000. [Li Fengqi, Su Yusong. *Partition of water mass* [M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2000.]
- [25] 胡敦欣, 吕良洪, 熊庆成, 等. 关于浙江沿岸上升流的研究[J]. *科学通报*, 1980(3): 123-133. [Hu Dunxin, Lü Lianghong, Xiong Qingcheng, et al. A study of coastal upwelling off Se China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 1980(3): 123-133.]
- [26] Biscaye P. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans [J]. *GSA Bulletin*, 1965, 76(7): 803-832.
- [27] 汤毓祥, 郑义芳. 关于黄、东海海洋锋的研究[J]. *海洋通报*, 1990, 9(5): 89-96. [Tang Yuxiang, Zheng Yifang. Research on fronts in East China Sea [J]. *Marine Science Bulletin*, 1990, 9(5): 89-96.]
- [28] Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand [J]. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13(4): 937-968.
- [29] Liu Z F, Zhao Y L, Colin C, et al. Source-to-sink transport processes of fluvial sediments in the South China Sea [J]. *Earth-Science Reviews*, 2016, 153: 238-273.
- [30] 杨作升. 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[J]. *海洋与湖沼*, 1988, 19(4): 336-346. [Yang Zuosheng. 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 [J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 1988, 19(4): 336-346.]
- [31] 范德江, 杨作升, 毛登, 等. 长江与黄河沉积物中粘土矿物及地化成分的组成[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2001, 21(4): 7-12. [Fan Dejiang, Yang Zuosheng, Mao Deng, et al. Clay minerals and geochemistry of the sediments from the Yangtze and Yellow Rivers [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2001, 21(4): 7-12.]
- [32] Wan S M, Li A C, Clift P D, et al. Development of the East Asian monsoon: Mineralogical and sedimentologic records in the northern South China Sea since 20 Ma [J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2007, 254(3/4): 561-582.
- [33] Milliman J D, Farnsworth K L. River discharge to the coastal ocean: A global synthesis [M]. Cambridge, New York: Cambridge University Press, 2011.
- [34] 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.
- [35] Li C S, Shi X F, Kao S J, et al. Clay mineral composition and their sources for the fluvial sediments of Taiwanese rivers[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(6): 673-681.
- [36] Xu Z K, Li T G, Chang F M, et al. Clay-sized sediment provenance change in the northern Okinawa Trough since 22 kyr BP and its paleoenvironmental implication[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 2014, 399: 236-245.
- [37] Wang J Z, Li A C, Xu K H, et al. Clay mineral and grain size studies of sediment provenances and paleoenvironment evolution in the middle Okinawa Trough since 17 ka[J]. *Marine Geology*, 2015, 366: 49-61.
- [38] 王舒畋,李斌. 东海新构造与新构造运动[J]. *海洋地质与第四纪地质*, 2010, 30(4): 141-150. [Wang Shutian, Li Bin. Neotectonic features and movement in the East China Sea[J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2010, 30(4): 141-150.]
- [39] 朱耀华,方国洪. 陆架和浅海环流的一个三维正压模式及其在渤、黄、东海的应用[J]. *海洋学报*, 1994, 16(6): 11-26. [Zhu Yaohua, Fang Guohong. A three-dimensional barotropic model of shelf and shallow water circulation and its application in Bohai Sea, Yellow Sea and the East China Sea[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1994, 16(6): 11-26.]
- [40] 潘玉球,徐端蓉,许建平. 浙江沿岸上升流区的锋面结构、变化及其原因[J]. *海洋学报*, 1985, 7(4): 401-411. [Pan Yuqiu, Xu Duanrong, Xu Jianping. Frontal structure, change, and its causes of upwelling area along Zhejiang Coast[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1985, 7(4): 401-411.]
- [41] 杨作升,郭志刚,王兆祥,等. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海区输送的宏观格局[J]. *海洋学报*, 1992, 14(2): 81-90. [Yang Zuosheng, Guo Zhigang, Wang Zhaoxiang, et al. Macro pattern of suspended matter transport from the Yellow and East China Sea shelf to the eastern deep ocean[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 1992, 14(2): 81-90.]

Sedimentary Differentiation and Hydrodynamic Environment of Multi-sourced Sediment in the Changjiang Distal Delta

CONG JingYi^{1,2}, YUAN ZhongPeng^{1,2}, HU Gang^{2,3}, BI ShiPu^{2,3}, ZHANG Yong^{2,3}, WANG YongHong¹, MA XiaoHong^{1,2}, JIANG YunShui^{2,3}, NING Ze^{1,2}

1. College of Marine Geosciences, Ocean University of China, Qingdao, Shandong 266100, China

2. Qingdao Institute of Marine Geology, China Geological Survey, Qingdao, Shandong 266071, China

3. Laboratory for Marine Mineral Resources, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao, Shandong 266071, China

Abstract: The Changjiang River is the largest river in Asia in terms of its enormous amount of sediment and water discharge, which has formed a subaqueous mega-delta. Its depocenter has always been an important research area focusing on high-resolution environmental evolution; however, little attention has been paid to its distal delta, which is an area in which multi-sourced sediments interact. Grain size and clay mineral data of surface sediments were analyzed to determine the distribution characteristics and mechanism within the mixing zone. It was found that there are four main sediment types (mud, silt, sandy silt and silty sand) distributed parallel to the coastline and becoming coarser seawards. A provenance analysis showed that the surface sediment in the study area is primarily sourced from the Changjiang River, with four sub-zones within the study area: (i) a central sub-zone containing sediment from the Changjiang River; (ii) a northwestern sub-zone containing mixed sediment from the Oujiang River; (iii) a southwestern sub-zone containing mixed sediment from the Minjiang River; and (iv) a southeastern sub-zone containing mixed sediment from the Taiwanese River. Sediment from the different provenances is differentiated by currents in the East China Sea. The fronts and seasonal variation of the Zhejiang-Fujian Coastal Current and the Taiwan Warm Current play the key role in sediment differentiation in the study area. Knowledge of sediment differentiation and the mechanism of present-day sedimentary processes is helpful for understanding the evolution of the Changjiang Distal Delta since the Holocene.

Key words: Changjiang Delta; inner shelf of East China Sea; provenance; sedimentary differentiation; hydrodynamic environment