

文章编号: 1000-0550(2006)05-0714-08

黄河三角洲滨海区沉积物的分异特征与规律^①

陈小英 陈沈良 刘勇胜

(华东师范大学河口海岸学国家重点实验室 上海 200062)

摘要 根据 2000 年 7~9 月黄河三角洲滨海区表层沉积物的分析结果, 运用 Flemming 的三角图式对沉积环境进行划分, 并在此基础上结合沉积物结构、地形和水动力条件, 探讨了沉积物的分布规律及其作用机制。结果表明: 研究区域可划分为废弃三角洲滨海区、现行河口区和莱州湾滨海区三个沉积环境。对于废弃三角洲沉积区, 在早期废弃的海湾沟海区风浪作用为主, 沉积物普遍较粗, 抗冲能力较强; 废弃不久的飞雁滩海区在波流联合作用下, 沉积物粒径由岸向海变细, 大致在 -5 ~ -6m 水深处存在一明显的界限, 该水深以浅砂含量较高; 而该水深以深以粉砂和粘土为主, 砂含量较低。现行河口区, 由于沙嘴前方强潮流带的作用, 沉积物粒径由岸向海表现为粗—细—粗的演变趋势。在莱州湾海区, 由于潮流场的影响, 以广利河河口为界, 以北粒径较细, 而以南则较粗。

关键词 黄河三角洲 沉积物粒度 沉积环境 水动力条件

第一作者简介 陈小英 女 1980 年出生 博士研究生 海岸动力地貌与工程应用

中图分类号 P737.2 **文献标识码** A

1 引言

沉积物粒度分析是描述沉积环境的有效手段, 通过研究沉积物分布特征可以判别不同的沉积环境, 进而揭示泥沙运移趋向及水动力作用状况^[1~4]。对于现代黄河三角洲, 人们更多是关注河口流路的变迁、海岸及滨海区的冲淤变化等^[5~9], 而对滨海区沉积物的研究相对较为薄弱, 只局限在局部岸段的潮间带和水上三角洲有限的样品资料进行分析^[10~12]。本文以黄河三角洲滨海区的表层沉积物资料为基础, 结合地形变化、水动力条件和泥沙特征, 对沉积物的分布规律及其动力沉积环境进行较为系统的分析。

黄河三角洲滨海区系指与黄河三角洲毗连的弧形海域, 即北起徒骇河以东, 南至南旺河以北的滨海区域, 包括了渤海湾南缘及莱州湾西部。1855 年黄河在河南铜瓦厢决口夺大清河入渤海, 以年均 20~25 km² 的造陆速率 (1855—1996 年) 在渤海湾的西南岸塑造了近 6 000 km² 的现代黄河三角洲^[13]。而由于自然或人为因素, 黄河尾间在现代三角洲摆动 50 余次, 其中, 1953 年至今有 3 次大的改道, 即 1954 年的神仙沟流路、1964 年的刁口河流路和 1976 年的人工改道清水沟流路^[14] (图 1)。黄河尾间的频繁摆动, 使黄河三角洲滨海区的水动力条件发生了很大改变, 并形成复杂的沉积环境和沉积特征。通过沉积物

分布规律的研究, 不仅有助于揭示滨海区泥沙运移和水动力状况, 而且可为黄河三角洲的演变趋势分析和海岸防护提供科学依据。

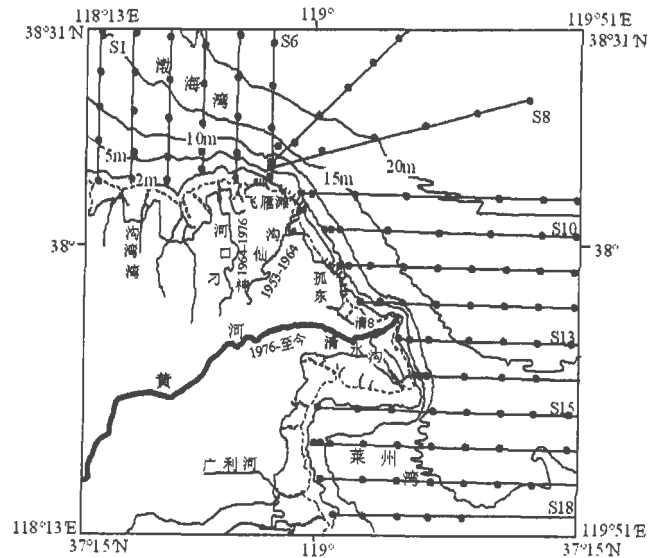


图 1 研究区域及沉积物采样位置

Fig 1 Sketch of the study area and location of the sediment samples

2 资料来源及分析方法

2000 年 7~9 月黄河口水文水资源勘测局在黄

^① 国家重点基础发展研究规划项目 (2002CB412408) 资助。

收稿日期: 2006 01 05 收修修改稿日期: 2006 04 21

河三角洲滨海区地形断面测量的同时,选择了 18 个断面(见图 1 中编号 S1~S18)用帽式采泥器进行海底表层沉积物取样,采样深度约 5 cm,共计采样 124 个。取样范围涵盖了整个滨海区,取样线每 10 km 布设一条,每个断面上采集 7~9 个沉积物样品,其分布为浅滩区 2~3 个,前缘急坡区 3 个,缓坡区 3 个。在采样过程中,用 AG12GPS 信标机进行实时差分定位,定位精度小于 3 m;测量水深用 SDH-13D 型数字化测深仪,测深精度为水深的 $0.4\% \pm 5$ cm,水深数据统一为黄海基准面。

对获取的沉积物样品分析按照泥沙颗粒分析规范进行,其流程简述如下:用电子天平称取少量样品(2 g)置于 50 mL 烧杯中,加入蒸馏水 15 mL 再加入 30% 的 H_2O_2 5 mL 微加热去掉有机质,静置 24h 后,吸取去除上层清液,加入 3.3% 的六偏磷酸钠溶液 5 mL 后在超声波振荡仪内振荡、分散 2h 然后采用库尔特 Coulter LS-100Q 型激光粒度分析仪进行测定,得出各粒级的级配。沉积物的分类和命名采用 Shepard^[15] 的分类方法。

对于粒度参数的数据处理采用 Fleming 的三角图式法^[16](图 2)。在前人的工作基础上^[15 12 18],Fleming 在 2000 年提出了一种新的三角图式,从沉积结构组成及其反映的水动力强度来区分沉积环境及其亚环境,并将其应用于江苏淤泥质潮滩、丹麦瓦登海及威尔士的 Dyfi 河口,取得了较好的效果。在这个三角图式中,首先定义了沉积物中各成分的粒级划分标准, <2 mm 者为砂, 0.002~0.0625 mm 为粉砂、<0.002 mm 者为粘土;然后以沉积物中砂的百分含量分成 S、A、B、C、D、E 6 个组别,其中以 95%、75%、50%、25%、5% 作为结构分类标志线,从 S 到 E 表示砂含量逐渐减少;再按粘土在泥质成分(粉砂+粘土)中的百分含量分为 6 个不同的水动力区(I~VI),并以 10%、25%、50%、75%、90% 作为结构分类标志线,从 I 到 VI 表示水动力逐渐减弱。如图 2 所示,按上述方法将三角形分为 25 个区,分别指示不同的沉积环境:从 S 到 E,离砂端元越近,沉积物粒径越粗;从 I 到 VI,离粉砂端元越近,反映的水动力越强。

3 结果

3.1 沉积物总体分布特征

根据 Shepard 1954 年的分类,黄河三角洲滨海区表层沉积物主要有细砂、粉砂质细砂、砂质粉砂、粉砂、粘土质粉砂、粉砂质粘土和砂-粉砂-粘土,共 7

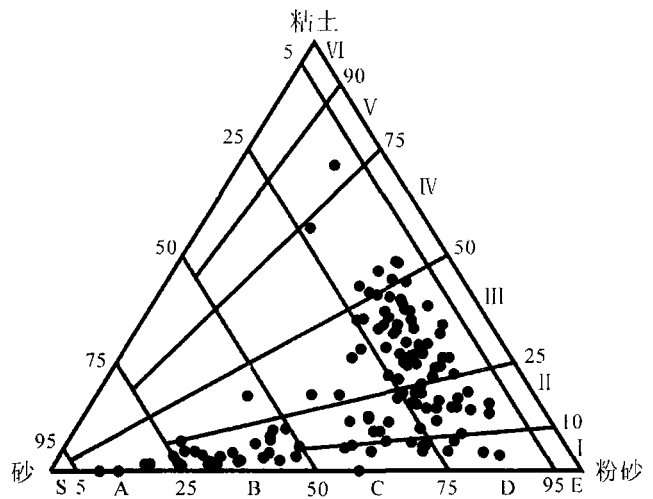


图 2 黄河三角洲滨海区沉积物三角图式
Fig 2 A textural classification of gravel free muddy sediments on the basis of ternary diagrams in nearshore zone of the Yellow River Delta

类(图 3)。其中,粘土质粉砂、砂质粉砂和粉砂质砂居多,分别占样品总数的 28.2%、25.0%和 20.2%。由表 1 可知,沉积物中值粒径总体上随水深的增加呈减小趋势。-5 m 水深范围以内,沉积物粗化最明显,平均中值粒径大于 0.05 mm,其中 0~-2 m 范围粒径最粗,为 0.0547 mm; -15 m 以外,沉积物较细,平均粒径为 0.0229 mm。

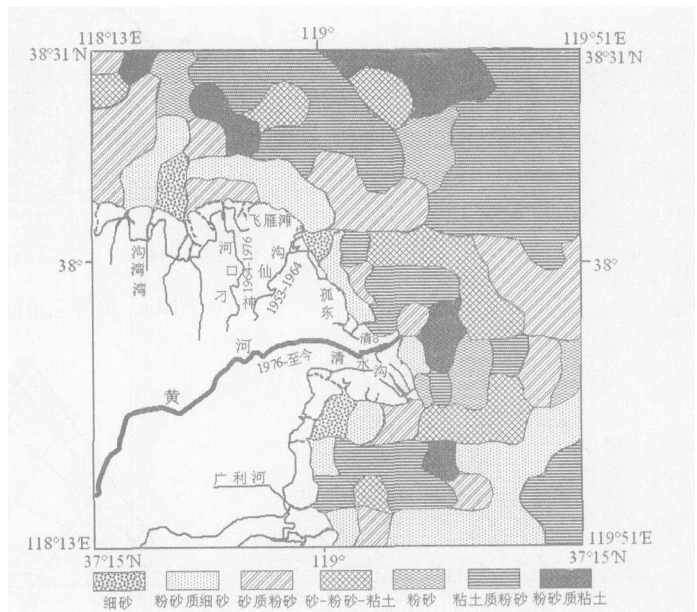


图 3 黄河三角洲滨海区沉积物类型分布
Fig 3 The distribution of bottom sediment types along nearshore zone of the Yellow River Delta

表 1 不同水深范围的沉积物中值粒径

Table 1 The median grain size changes of bottom sed in ent in d ifferent underwater areas

水深 h	0~2	2~5	5~10	10~15	≥ 15
D_{50} /mm	0.0547	0.0508	0.0350	0.0290	0.0229
样品数 /个	15	16	23	28	42

3.2 沉积动力环境分区

根据 Fleming 的沉积物粒度结构分类方法, 将黄河三角洲滨海区沉积物粒度数据点绘于三角图中 (图 2)。可以看出, 大部分数据点分布在 I、II、III 区, 这说明研究区的水动力条件总体上较强。然而不同的亚沉积环境动力条件也有差异, 根据动力差异, 结合泥沙来源状况, 可大致将研究区分为三个亚环境 (图 4a): 废弃三角洲沉积环境 (S01~S10), 河口区沉积环境 (S11~S15), 莱州湾沉积环境 (S16~S18)。在各分区的三角图式 (图 4b) 中, 废弃三角洲 40% 的

数据点分布在 I 区, 表明该区动力很强。对于河口区, 现行清 8 河口附近 (S11~S13) 的数据点主要分布在 II、III 区, 只有 13% 在 I 区分布; 而清水沟老河口附近 (S14~S15) 约 50% 的数据点分布在 I 区, 说明老河口动力较现行河口强; 在莱州湾滨海区, 样品在 I、II、III 区均有分布, 说明该区的动力较为复杂。

3.3 三个区沉积物分布特征

废弃三角洲滨海区: 该区平均中值粒径为 0.0340 mm, 主要分布有细砂、粉砂质细砂、砂质粉砂。其中, 在湾湾沟附近海区 (S1~S4) 由岸向海粒径变化不大, 整体较粗, 平均中值粒径达到 0.0417 mm; 而在飞雁滩海域 (S5~S10), 由岸向海粒径由粗变细, 平均中值粒径为 0.0299 mm。在飞雁滩的岸坡剖面上 -5~-6 m 水深范围内存在一个明显的粗化界限 (图 5), 该水深以浅, 沉积物粒径较粗, 砂含量较高, 主要为砂质粉砂和粉砂质细砂; 该水深以深,

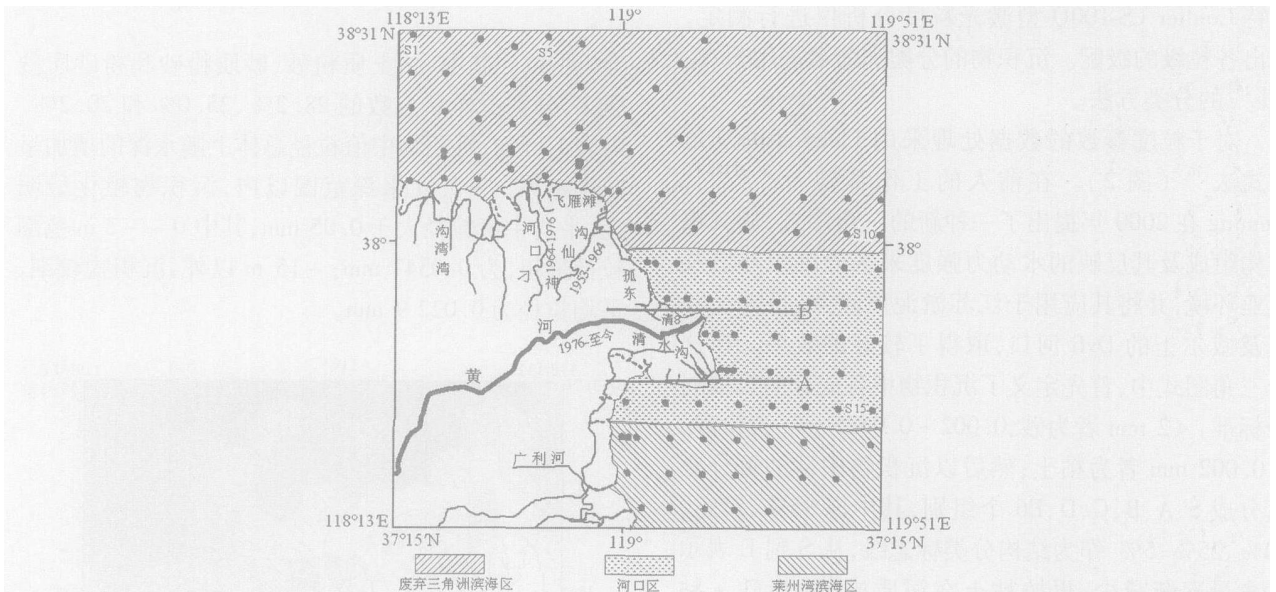


图 4a 黄河三角洲滨海区动力分区

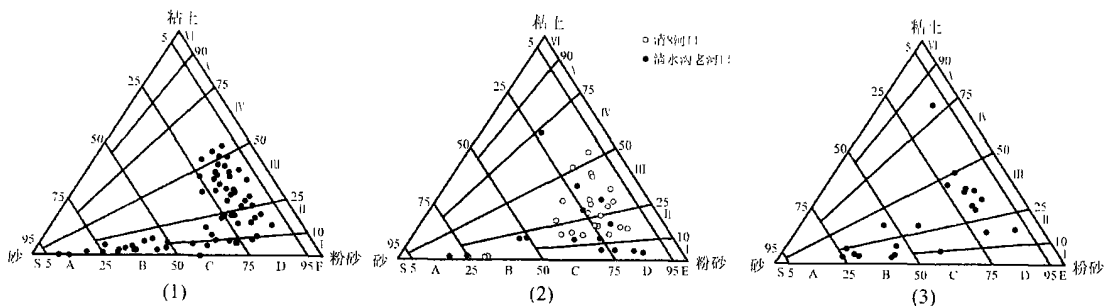


图 4b 黄河三角洲滨海区各分区沉积物三角图式 (1 废弃三角洲滨海区; 2 河口区; 3 莱州湾滨海区)

Fig. 4 The different parts and their respective sediment ternary diagrams along the subaqueous delta of Yellow River

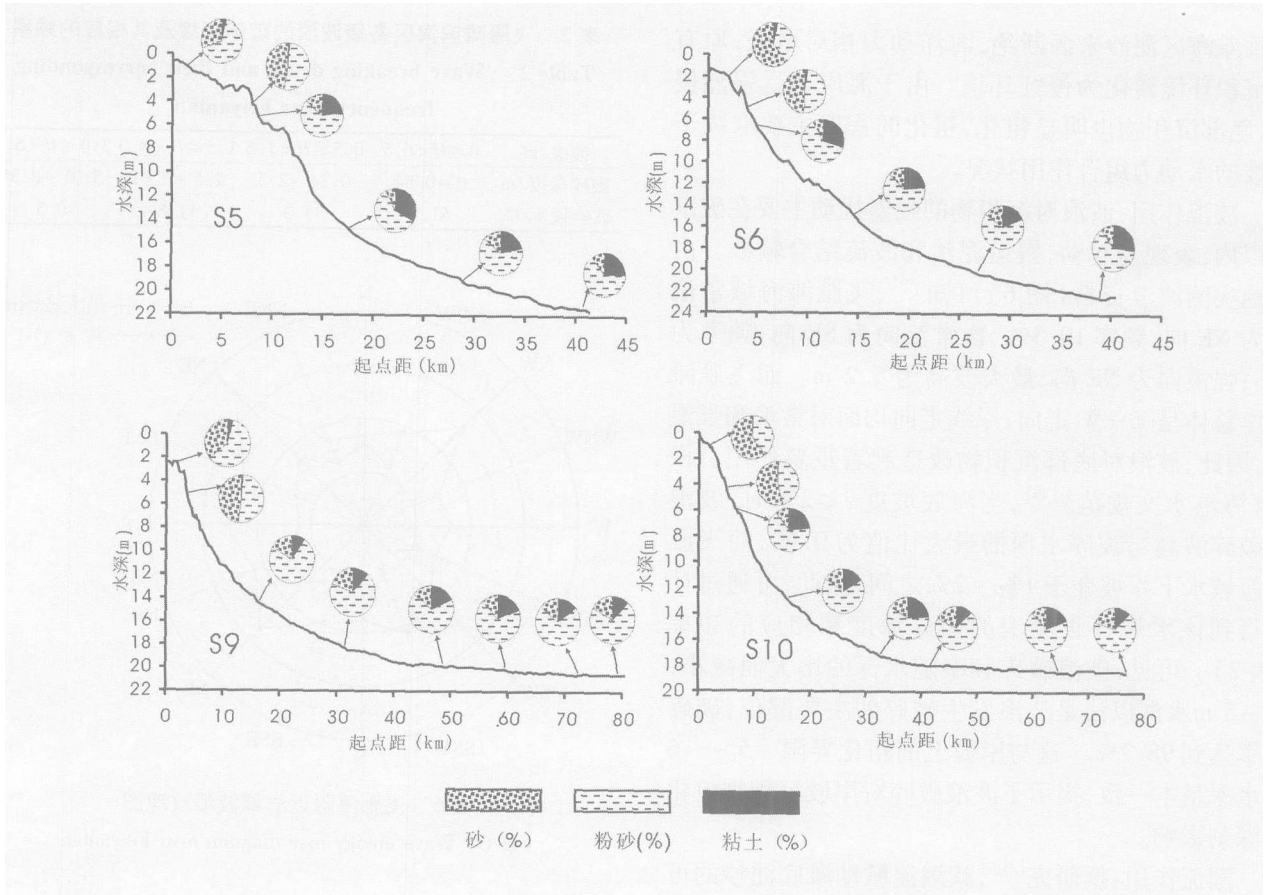


图 5 飞雁滩水下岸坡剖面表层沉积物砂、粉砂、粘土含量随水深的变化

Fig 5 The grain composition changes with deeper water at underwater slope in Feiyantan

则以粘土、粉砂为主, 砂含量较低, 且各成分含量相对稳定, 随水深的增加变化不大, 分布类型主要为粘土质粉砂和粉砂质粘土。

现行河口附近: 平均中值粒径为 0.0349 mm, 由岸向海沉积物粒径整体呈现粗—细—粗的变化特征。除新口门南侧的凹海湾内粒度较细外, 在河口区沿岸 -3 m 水深以浅, 沉积物粒度均较粗, 平均中值粒径达 0.0500 mm, 主要分布类型为砂、粉砂质细砂; 而 -3 m 水深以深, 随着水深的增加, 沉积物逐渐变细, 平均中值粒径为 0.0199 mm, 沉积类型演变为粘土质粉砂、粉砂质粘土及砂—粉砂—粘土; 到约 -15 m 水深以外, 底质又开始变粗, 平均中值粒径为 0.0352 mm, 沉积物类型为砂质粉砂和粉砂质细砂。

莱州湾海区: 该区平均中值粒径为 0.0351 mm, 沉积物粒度分布比较复杂, 大致以广利河为界, 在广利河以北, 粒径较细, 主要分布有粘土质粉砂, 中间夹有少量砂—粉砂—粘土和粉砂质粘土; 广利河以南粒径较粗, 主要分布有粉砂质细砂。

4 讨论

4.1 废弃三角洲沉积环境

(1) 湾湾沟附近海区

该岸段由于长时间不行河, 海洋动力占主导地位。在废弃初期, 在风浪和潮流的作用下, 海岸快速冲刷, 岸坡不断后退, 细颗粒泥沙被波浪掀起并随潮流冲走。随着时间的推移, 海岸剖面不断地进行调整。波浪传播到海岸附近, 能量已经大大减少, 顶坡段成为波能的主要削减带, 侵蚀作用主要集中在这一带, 使得水下岸坡的坡度进一步减小, 整个水下地形趋于稳定。其表层沉积物逐渐被分选、粗化、均匀化, 使表层沉积物变得较为单一, 如图 2 所示, 在 -15 m 以浅的海区内, 形成一层以砂质粉砂和细砂为主要成分的硬盖, 平均中值粒径为 0.0472 mm, 俗称“铁板砂”。

(2) 飞雁滩滨海区

飞雁滩是 1964—1976 年黄河刁口河流路时期形成的亚三角洲, 自 1976 年黄河改道清水沟流路后,

飞雁滩海区泥沙来源断绝,海洋动力相对增强,原有的沉积环境转化为侵蚀环境。由于海岸遭受强烈侵蚀,底部沉积物也明显粗化,粗化的程度主要取决于岸坡的水动力组合作用状况。

波浪作用:波浪对沉积物的强烈扰动主要在破浪带以内,表现为起动、搬运泥沙和波流结合输沙。由当地实测波浪资料(图6)可知^[19],飞雁滩海域常浪向为NE向,频率10.3%,次常浪向为SE向,频率为8%;强浪向为NE向,最大波高为5.2m。而飞雁滩海岸总体呈E-W走向,岸线走向均面对常浪和强浪向,因此,波浪对底部沉积物改造起着重要作用。根据《海港水文规范》^[20],当海底坡度 $\leq 2\%$ 时,波浪的破碎波高与破碎水深的最大比值为0.60,而飞雁滩海域水下岸坡介于1‰~2‰之间,据此,可通过计算得到该水域各级波浪的破碎深度和相应的频率(表2)。可见,破浪破碎频率随水深的增大而减小,在-5m水深以浅是波浪发生破碎的主要部位,破碎频率达到98.2%。这与岸坡上的粗化界限-5~-6m水深基本一致,揭示了波浪破碎对岸坡沉积物粗化的深刻影响。

潮流作用:据研究^[21],就潮流掀动滩底泥沙的可能性而言,黄河三角洲地区潮流流速大于0.17mm粒径泥沙所需的移动速度。而飞雁滩濒临三角洲东北部无潮点附近的大流速区(图7)^[22],且沉积物粒度大多在0.007~0.072mm之间,所以潮流既输沙也可能掀沙,进一步加剧了底部沉积物的粗化。在波流联合作用下底部泥沙发生再悬浮,细颗粒物质被强潮流带往它处,粗颗粒物质则大部分就地沉积。

表2 飞雁滩滨海区各级波浪的破碎深度及其相应的频率
Table 2 Wave breaking depth and their corresponding frequency near Feiyantan

波级 m	$0 \leq H < 0.5$	$0.5 \leq H < 1.5$	$1.5 \leq H < 3.0$	$3.0 \leq H < 5.0$
破碎深度 m	0~0.84	0.84~2.5	2.5~5.01	5.01~8.35
破碎频率 %	51.1	35.3	11.8	0.5

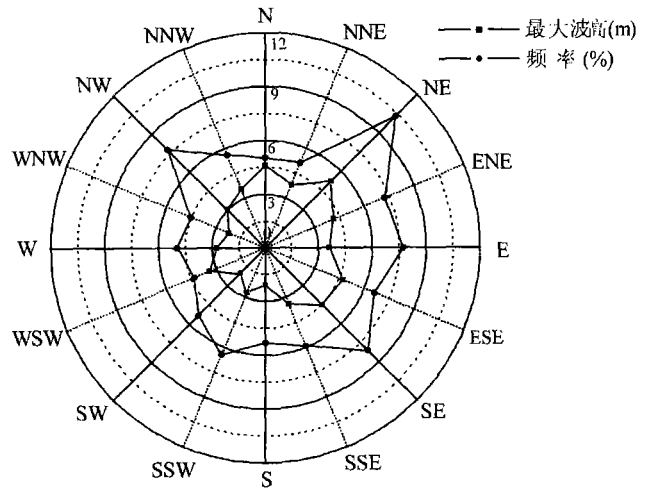


图6 飞雁滩附近海域波浪玫瑰图

Fig 6 Wave energy rose diagram near Feiyantan

4.2 现行河口区

(1) 浅水区(0~-3m)

口门附近:该区风浪强浪向为NE向和ENE向, $H_{1/10}$ 最大波高可达3.6m^[23]。在河口拦门沙区域,水深不足2m,风浪掀沙尤为强烈。到拦门沙顶部,是汛期盐水楔楔顶所在,水动力则变得较弱,被波浪掀起的细砂就在此处落淤,粉砂、粘土等细颗粒物质则

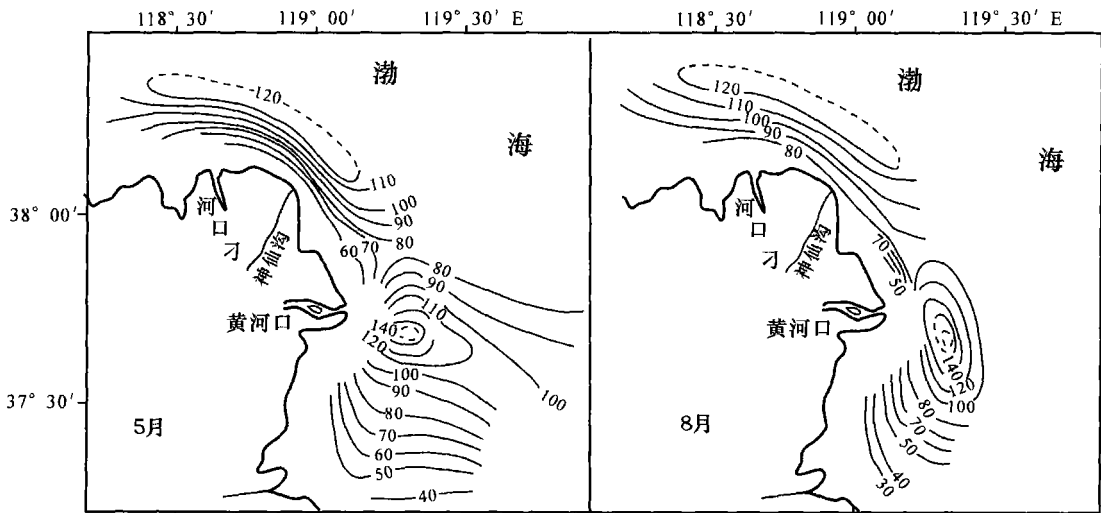


图7 黄河三角洲最大流速分布图

Fig 7 Distribution of tidal current velocity around the Yellow River delta

在潮流的作用下,向口门两侧及深水区运移。因此,在口门前方形成一个粒度较粗的细砂和粉砂质细砂沉积区。在新口门北部的湾内,由于半封闭地形的影响,潮流流速很小,细颗粒泥沙在此处大量沉积,形成了很厚的淤泥质层;而口门南侧由于没有地形的屏蔽作用,水动力较强,沉积物较北侧粗。

孤东大堤附近:孤东海堤位于河口区南侧。大堤的修建代替了原本的自然岸线,波浪对海堤进行强烈冲击并形成反射波,在堤前海域对沉积物产生剧烈扰动,细颗粒泥沙随之被大量掀起,并在潮流的作用向外扩散。而近年来河口来沙量较少,该区域已不能得到河口泥沙的补给,使堤前不断刷深^[24],从而导致表层沉积物严重粗化。

(2)深水区(-3 m 以外)

从 1976 年 12 月和 2000 年 5 月的黄河三角洲的 LANDSAT TM 卫星遥感图像(图 8)可看出,黄河三角洲河口区的冲淤发生明显的变化:1976 年以前,现行河口尚是一个小海湾,面积约有 100 km²。1976 年黄河改道清水沟流路后,河口来沙不仅很快把这个凹海湾填平,还形成沙嘴并迅速向海推进。河口区的这种巨大变化,使得莱州湾的潮流场也随之发生了重大的变化。由于沙嘴迅速向海延伸,潮流受到挤压,使流线加密在沙嘴前方形成一个强潮流带(图 7)。位于该强潮流带的表层细颗粒泥沙被潮流掀起再悬浮并向深水区输运,沉积物发生明显粗化。然而,该强潮流带与河口之间始终保持一定的距离,它们之间存在一个弱流区,这是因为黄河出流后,受到外海潮流作

用的顶托,流速明显减小,使得细颗粒泥沙在此区域大量落淤,所以入海泥沙中的大部分在近河口区堆积。因此,由岸向海,河口区沉积物形成了粗—细—粗的分布格局。由于在深水区沉积物约在 -15 m 水深以外开始出现粗化,所以可以认为现行河口水下三角洲淤积厚度约为 15 m。

(3)清水沟老河口与清 8 河口附近的动力对比

根据黄河口水文水资源勘测局长期监测的滨海区断面地形资料,在清水沟老河口和现行清 8 河口附近各选取一条断面 A 和 B(具体位置见图 4a)。断面 A、B 的冲淤变化如图 9 所示,自 1996 年以来,清水沟老河口侵蚀比较严重,沙嘴迅速后退;而清 8 河口则表现为缓慢淤进。这是由于自黄河 1996 年人工改道清 8 出汊入海后,清水沟老河口径流作用丧失,海洋动力作用占优势,水动力条件大大增强。在沙嘴前端,由于地形效应,波浪发生折射,波能在沙嘴前端辐聚,波蚀力增强,导致沙嘴迅速后退(图 9a),造成老河口两侧浅水区底质明显粗化。而现行清 8 河口附近由于径流影响,河海作用相抗衡,水动力较老河口小,以缓慢淤积为主(图 9b),表层沉积物颗粒较细。

4.3 莱州湾海区

该区表层沉积物分布主要与莱州湾的潮流场输沙作用有关。1996 年黄河人工改道清 8 出汊入海,清水沟老河口废弃,因缺少泥沙补给而遭受剧烈冲刷,河口岸线后退。在潮流作用下,黄河口冲刷物质向外运移。莱州湾海域涨潮时,南岸潮流流向西,至西岸顺时针转向北,与黄河河口南侧的南西向涨潮流

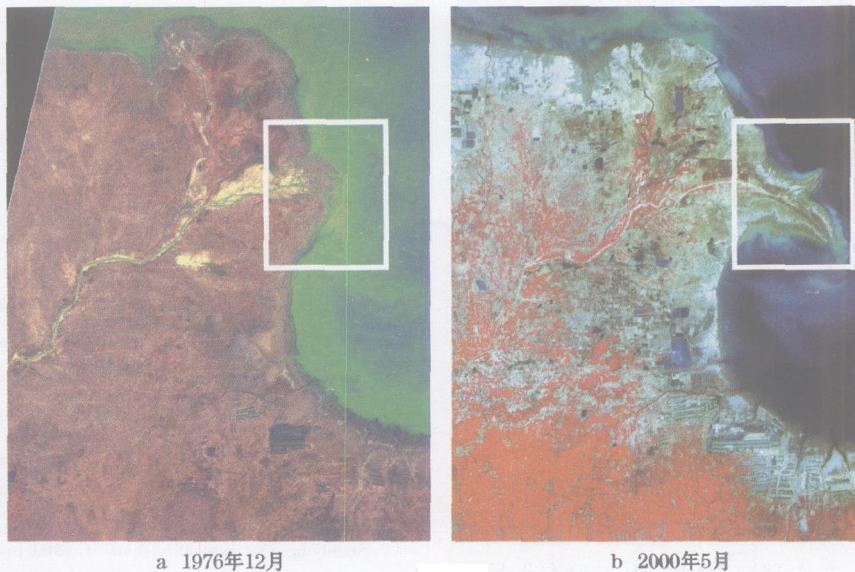


图 8 黄河 1976 清水沟流路改道前后河口区冲淤对比

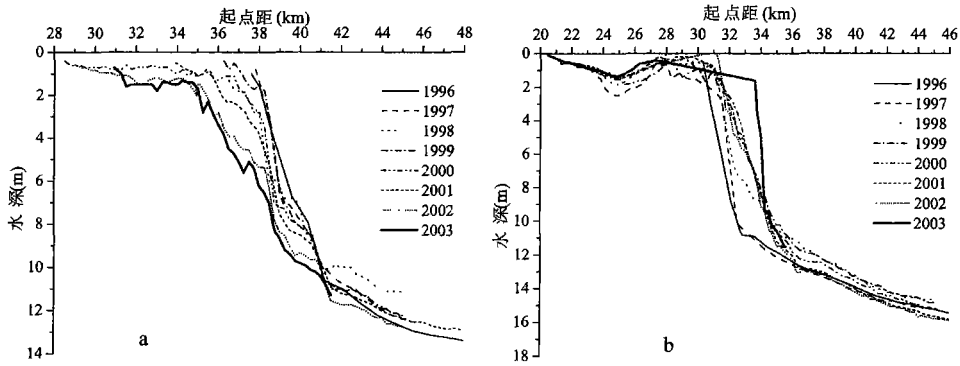


图9 清水沟新老河口自1996年水下岸坡的冲淤变化
(a 清水沟老河口附近; b 清8河口附近)

Fig 9 Erosion and deposition at the underwater slope near Qing 8 and Qingshuigou estuary

相顶托,流速减小,使得一部分细颗粒泥沙在河口南侧落淤;落潮时,潮流流向都向东北方向,大部分泥沙都被转向东北方向运移。细颗粒泥沙向南落淤范围大致在广利河以北,向东落淤范围可达到 -15 m 水深。而广利河以南的滨海区,黄河口泥沙不能到达,海洋动力作用占优势,底部沉积物明显粗化。

5 结论

(1)黄河水下三角洲范围宽广,沉积物分布类型复杂。其滨海区沉积作用主要受地形、水动力和泥沙来源的制约。通过 Fleming(2000)的三角图式,按水动力强度,结合泥沙来源及水动力特征,将滨海区分为三个沉积环境:废弃三角洲滨海区,现行河口区,莱州湾滨海区。

(2)废弃三角洲滨海区,水动力作用强,沉积物粗粒径分布范围广。在早期废弃的湾湾沟海域,主要受风浪作用,岸坡经历了长期的冲刷分选,底部沉积物显著粗化和均匀化。废弃不久的飞雁滩海域,在波浪联合作用下,沉积物粒径由岸向海变细,在 $-5\sim-6\text{ m}$ 水深以浅存在一明显粗化带,该区内砂含量较高;而 $-5\sim-6\text{ m}$ 以深的水域,沉积物砂含量显著降低,以粉砂和粘土为主。

(3)现行河口区,由于沙嘴前方强潮流带的影响,沉积物粒径由岸向海表现为粗—细—粗的分布特征,且河口三角洲向海最大淤积范围大致为 -15 m 水深。

(4)莱州湾海区,由于潮流场的影响,阻止了河口泥沙大量向南运移,细颗粒泥沙主要淤积在广利河口以北的滨海区,在广利河口以南由于没有大量的泥沙供应,滨海区海洋动力占优势,表层沉积物粗化。

致谢 黄河水利委员会山东水文水资源勘测局对本文提供了水深以及沉积物粒度相关数据,李为华、付桂以及审稿人对本文提出宝贵意见,特此谢忱!

参考文献 (References)

- Gao S, Collins M. Net sediment transport patterns inferred from grain size trends based upon definition of "transport vectors"—reply. *Sedimentary Geology* 1994, 90: 157~159
- Pedersen R, Howarth R W, Mikkelsen D C. Application of grain size trend analysis for the determination of sediment transport pathways in intertidal area. *Marine Geology* 1996, 135: 35~39
- Li G X, Wei H L, Yue S H, *et al*. Sedimentation in the Yellow River delta Part I. Suspended sediment dispersal and deposition on the subaqueous delta. *Marine Geology* 1998, 149: 113~131
- Balsam W L, Beeson J P. Sea floor sediment distribution in the Gulf of Mexico. *Deep Sea Research J* 2003, 50: 1421~1444
- Xue C. Historical changes in the Yellow River delta. *China Marine Geology* 1993, 113: 321~329
- 高文永, 张广泉, 姜明星, 等. 黄河口清水沟流路演变分析. 泥沙研究, 1997, (3): 1~7 [Gao Wen Yong, Zhang Guang Quan, Jiang Ming Xian, *et al*. Fluvial process for the Qingshuigou river course of the Yellow River estuary. *Journal of Sediment Research* 1997, 3: 1~7]
- Yu L S. The Huanghe (Yellow) River: a review of its development characteristics and future management issues. *Continental Shelf Research* 2002, 22: 389~403
- 陈沈良, 张国安, 谷国传. 黄河三角洲海岸强侵蚀机理及治理对策. 水利学报, 2004, 7: 1~6 [Chen Shen Liang, Zhang Guo An, Gu Guo Chuan. Mechanism of heavy coastal erosion on Yellow River delta and its countermeasures. *Journal of Hydraulic Engineering* 2004, 7: 1~6]
- 陈小英, 陈沈良, 于洪军, 等. 黄河三角洲海岸剖面类型与演变规律. 海洋科学进展, 2005, 23(4): 438~445 [Chen Xiao Ying, Chen Shen Liang, Yu Hong Jun, *et al*. Coastal profile types and evolution of the Yellow River delta. *Advances in Marine Science* 2005, 23(4): 438~445]

- 10 Li G X, Zhuang K L, Wei H L. Sedimentation in the Yellow River delta Part III: Seabed erosion and diapirism in the abandoned subaqueous delta lobe. *Marine Geology*, 2000, 168: 129~144
- 11 程鹏, 高抒. 北黄海西部海底沉积物的粒度特征和净输移趋势. *海洋与湖沼*, 2000, 31(6): 604~615 [Cheng Peng, Gao Shu. Net sediment transport patterns over the north western Yellow Sea based upon grain size trend analysis. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2000, 31(6): 604~615]
- 12 汪亚平, 高抒, 贾建军. 胶州湾及其邻近海域沉积物分布特征和运移趋势. *地理学报*, 2000, 55(4): 449~458 [Wang Yaping, Gao Shu, Jia Jianjun. Sediment distribution and transport patterns in Jiaozhou Bay and adjoining areas. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55(4): 449~458]
- 13 Saito Y, Wei H L, Zhou Y Q, *et al*. Delta progradation and chenier formation in the Huanghe (Yellow River) delta. *China Journal of Asian Earth Sciences*, 2000, 18: 489~497
- 14 尹学良. 黄河口的河床演变. *泥沙研究*, 1986, 4: 13~26 [Yin Xueliang. The fluvial processes of the Yellow River mouth. *Journal of Sediment Research*, 1986, 4: 13~26]
- 15 Shepard F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1954, 24: 151~158
- 16 Flemming B W. A revised textural classification of gravel-free muddy sediments on the basis of ternary diagrams. *Continental Shelf Research*, 2000, 20: 1125~1137
- 17 Folk R L, Andrews P B, Lewis D W. Detrital sedimentary rock classification and nomenclature for use in New Zealand. *New Zealand Journal of Geology and Geophysics*, 1970, 13: 937~968
- 18 Pejrup M. The triangular diagram used for classification of estuarine sediments: a new approach. In: de Boer P L, van Gelder A, Nio S, Deds. *Tide Influenced Sedimentary Environments and Facies*. Dordrecht: Reidel, 1988: 289~300
- 19 臧启运, 等. 黄河三角洲近岸泥沙. 北京: 海洋出版社, 1996: 40~42 [Zang Qiyun, *et al*. *Sediment Along the Yellow River Delta*. Beijing: Ocean Press, 1996: 40~42]
- 20 交通部第一航务工程勘察设计院. 海港水文规范. 北京: 人民交通出版社, 1998: 29~34 [China Communication First Design Institute of Navigation Engineering. *Code of Hydrology for Sea Harbour*. Beijing: China Communications Press, 1998: 29~34]
- 21 陈吉余, 王宝灿, 虞志英, 等. 中国海岸发育过程和演变规律. 上海: 上海科学技术出版社, 1989: 221~237 [Chen Jiyu, Wang Baocan, Yu Zhiying, *et al*. *Developments and Evolution of China's Coast*. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1989: 221~237]
- 22 中国海岸带水文编写组. 中国海岸带水文. 北京: 海洋出版社, 1995: 178~181 [Chinese Editorial Group of Coastal Zone Hydrology. *Coastal Zone Hydrology of China*. Beijing: Ocean Press, 1995: 178~181]
- 23 曹文洪, 张启舜, 胡春宏. 黄河河口海岸近岸带水体含沙量的横向分布. *水利学报*, 2001, 2: 54~58 [Cao Wenhong, Zhang Qishun, Hu Chunhong. Transversal distribution of suspended sediment concentration in estuary of Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2001, 2: 54~58]
- 24 陈小英, 陈沈良, 李九发, 等. 黄河三角洲孤东及新滩海岸侵蚀机制研究. *海岸工程*, 2005, 24(4): 1~10 [Chen Xiaoying, Chen Shenliang, Li Jufu, *et al*. Coastal erosion mechanism along Gudong and Xintan coasts of the Yellow River delta. *Coastal Engineering*, 2005, 24(4): 1~10]

Sediment Differentiation Along Nearshore Zone of the Yellow River Delta

CHEN Xiaoying, CHEN Shenliang, LIU Yongsheng

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

Abstract Based on the measured data of bottom sediment samples, combined with sediment texture, topography and hydrodynamics, a new triangular diagram advanced by Flemming is applied to reveal the sedimentary environments and their hydrodynamic processes. The results indicate that the nearshore zone of the Yellow River delta is divided into three sedimentary environments: the area near abandoned delta, estuarine area and Laizhou Bay. In nearshore zone of the abandoned delta, there are two parts: Wan'an-gou and Feiyantan, which were abandoned in 1953 and 1976, respectively. Due to long-term scouring of wind wave, the grain composition of the majority bottom sediment near Wan'an-gou is coarse, showing the strong erosion-resisting characteristics. For Feiyantan, because of combined effect of wave and tidal current, there is a large percentage of the sand at the underwater slope, which is shallower than -5 ~ -6m, however, silt and clay predominate at the underwater slope, which is deeper than -5 ~ -6m. For the area near the current estuarine, the grain size has a changing tendency of coarse-fine-coarse that results from the effect of strong tidal current zone in front of sand spit. For the area near Laizhou Bay, because of the influence of tidal current field, grain size of the bottom sediment particles is coarser in the area south of Guangli River estuary than the area north of that.

Key words Yellow River delta, grain size, sedimentary environments, hydrodynamic conditions