

长江河口表层沉积物输移特征分析*

陈鼎豪¹, 任杰¹, 唐权辉², 文丽³

(1. 中山大学近岸海洋科学与技术研究中心, 广东 广州 510275;

2. 珠江水利综合技术中心, 广东 广州 510275;

3. 广东省水利电力勘测设计研究院, 广东 广州 510275)

摘要: 基于聚类分析和 Gao-Collins 粒径趋势分析模型对长江口 948 个表层沉积物样品的特征及输移进行研究, 结果表明: 长江口表层沉积物的变化可划分为 3 类: 第一类沉积物以粉砂为主, 主要分布在长江口外东南方向 10~40 m 等深线以浅区。第二类沉积物主要以粉砂质砂、砂质粉砂为主, 主要分布在长江口苏北沿岸以东海域 20~40 m 等深线之间。第三类沉积物以细砂、中细砂为主, 分布区域主要在苏北沿岸地区。长江口外沉积物整体的输移趋势大致可分为沿岸向南和朝口外偏东北两个方向。长江北支出口附近沉积物有向河口内输移的趋势, 北支出口外 20~40 m 等深线之间有来自苏北沿岸、外海陆架的来沙在此汇聚后转向东北方向输移。南、北港口外受径流、沿岸流的影响大部分沿岸向南输移, 另一部分向外海陆架输移, 并在 10 m 等深线处部分泥沙输移趋势逆时针偏向东北, 在研究区域东北角存在有陆架向河口的输移趋势。

关键词: 表层沉积物; 长江口; 模糊分析; 泥沙输移趋势

中图分类号: P736.21 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2016)03-0022-08

Transport characteristics of surface sediments at the Yangtze river estuary

CHEN Dinghao¹, REN Jie¹, TANG Quanhu², WEN Li³

(1. Research Center for Coastal Ocean Science and Technology, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Zhujiang River Commission Integrated Technology Center, Guangzhou 510611, China;

3. Guangdong Provincial Investigation Design and Research Institute of Water Conservancy and Electric Power, Guangzhou 510710, China)

Abstract: Cluster analysis and Gao-Collins particle size trend analysis model will be used in sediment characteristics and transport of Yangtze Delta 948 surface sediment samples. The results showed that: Changjiang Estuary sediments can be divided into three categories. The first class of sediments composed mainly of silt, these are mainly distributed in the Yangtze Delta southeast 10 m depth contour to 40 m isobath range. The second category mainly silty sediment sand, sandy silt, mainly distributed in the waters east of Qidong between 20 to 40 m bathymetric contour. Yangtze River estuary sediment transport in the overall trend can be broadly divided into two directions toward the estuary of northeast and the coast of south. North branch of the Yangtze River near the exit of the sediments have a tendency to transport within the estuary. North branch of estuary sediments isobath 20~40 m between the transport to the northeast. Southern branch outlet affected runoff, coastal streams south transport part, the other part shelf seaward transport and counterclockwise turn to the northeast in the 10 m isobath sediment transport trends

* 收稿日期: 2015-04-07

基金项目: 国家重点基础研究规划资助项目(2013CB956502)

作者简介: 陈鼎豪(1990年生),男;研究方向:河口动力沉积过程;通讯作者:任杰;E-mail: renjie@mail.sysu.edu.cn

section, in the northeast corner of the study area there is transport to the estuary of the trend shelf.

Key words: surface sediment; the Yangtze river estuary; fuzzy analysis; sediment transport trends

河口地区的径流、波浪、潮汐作用是导致悬浮泥沙沉积、搬运的主要动力。对沉积物分布特征、分类与输移趋势的研究是分析沉积物输移的几个基本问题。沉积物的分布特征、类别和输移趋势能在一定程度上反映出沉积物的成因、环境特征以及物源指示,这对于长江河口的综合整治及港口航道建设具有重要的现实意义^[1]。对于长江口表层沉积物前人已有较多的研究。闫虹等^[2]对长江口拦门沙河段潮滩表层沉积物粒度、参数、组成、类型以及分布特征进行分析,并探讨了影响沉积物分布的主要动力因子。刘红等^[3]分析了长江口表层沉积物时空分布特征,得到了长江口表层沉积物中值粒径和沉积物类型分布特征。孔亚珍等^[4]分析了长江口外及邻近海域含沙量时空变化特征,表明长江口近岸含沙量高于外海,且具有随潮和季节的变化特征。戴志军等^[5-7]研究表明长江口北支出口附近沉积物有向崇明东滩及北边滩汇聚的趋势,南汇边滩沉积物在东滩的净输运趋势是由北向南,在河流泥沙减少的情况下长江口水下三角洲仍然处于高淤积状态。本文以现场采集的948个表层沉积物的样本为基础,通过在粒径参数分布特征、聚类分析结果的基础上着重讨论了长江口外表层沉积物的输移趋势。

1 研究区域概况

长江是我国的第一大河,流量充沛,年平均流量约 $905.1 \times 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$,年平均输沙量达 $0.15 \times 10^9 \text{ t/a}$ ^[7]。长江口平面形态呈喇叭形河口,从徐六泾起被崇明岛分为南北两支:北支西起青龙港,东至连兴港,长约20 km;南支西起白茆口,行至吴淞口由长兴岛和横沙岛分为南、北两港,南港又被九段沙分为南、北两槽。整体呈现出三级分汊、四口如海的格局。

长江口河口沙坝以东主要为正规半日潮,潮流主要是顺时针方向的旋转流,落急和涨急方向主要为东南偏南-西北偏北向,在10 m等深线附近为东南-西北向,并主要为旋转流;河口沙坝以西为非正规半日浅海潮,潮流为往复流,流向与河轴方向一致^[8]。在复杂的径、潮流动力条件下河口浅滩发育广泛,从北支到南支依次发育有顾园沙、崇明东滩、横沙东滩、横沙浅滩、九段沙、南汇边滩等。

本文研究范围:长江口西起横沙岛中段,东至口外 122.83° E ,南起芦湖港,北至江苏以北 32.12° N (图1)。

2 材料与方法

2.1 数据采集与分析方法

本文资料为2004年12月用箱式采样器取自长江河口及外海陆架的948个浅表沉积物样品(图1)。在实验室具体处理流程如下:取沉积物样本5~10 g于5 mL烧杯中,用过量的体积分数为10%的 H_2O_2 溶液去除有机质,再加入0.25 mol/L盐酸去除钙质胶结物和生物壳体,之后加入蒸馏水洗盐直至中性为止,然后在烧杯中加入数滴0.5 mol/L的偏磷酸钠,将处理好的样品用玻璃棒搅拌或超声波振荡使样品充分分散。粒度分析使用英国Malvern公司生产的Mastersizer 2000型激光粒度仪,测量范围0.02~2 000 μm ,重复测量的相对误差小于3%。平均粒径、分选系数、偏度、峰度由发发Folk-Word(1957)图解法公式计算^[9],沉积物命名采用Shepard^[10]提出的三角图法命名。

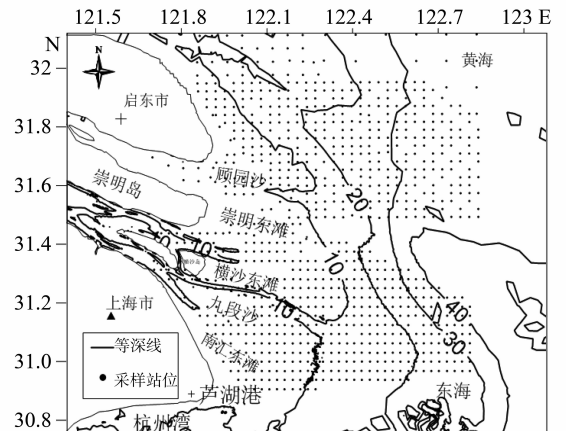


图1 长江口表层沉积物采样站分布
Fig. 1 Surface sediment sampling position in the Changjiang Estuary

2.2 模糊聚类

模糊聚类(FCM)^[11]是利用隶属度函数和迭代算法确定每个样本属于某一类程度的一种算法。其在海洋沉积物分类的应用上已显示出较好的结果^[12]。模糊聚类的目标函数为:

$$J = \sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b \|x_i - m_j\|^2 \quad (1)$$

其中, c 为给定的类别数, n 表示 n 个样本集 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $m_j, j = 1, 2, \dots, c$ 表示每一个聚类中心, $\mu_j(x_i)$ 表示第 i 个样本对于第 j 类的隶属度函数。

$$\sum_{j=1}^c \mu_j(x_i) = 1, i = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

其中要求在 (2) 式的条件下求得 (1) 式的最小值, 其必要条件为 (3)、(4) 两式。

$$m_j = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b x_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_j(x_i)]^b}, \quad j = 1, 2, \dots, c \quad (3)$$

$$\mu_j(x_i) = \frac{(1/\|x_i - m_j\|^2)^{1/b-1}}{\sum_{i=1}^n (1/\|x_i - m_j\|^2)^{1/b-1}}, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, c \quad (4)$$

模糊聚类算法的具体步骤为:

- 1) 设定常数 b , 聚类数 c 和最大误差 E_{\max} ;
- 2) 初始化聚类中心 m_j ;
- 3) 根据 (4) 式计算隶属度;
- 4) 根据 (3) 式修正所有聚类中心;
- 5) 计算误差 $e = \sum_{j=1}^c |m_j(k+1) - m_j(k)|^2$

若 $e < E_{\max}$, 则算法结束。否则, 令 $k = k + 1$, 转入第 3) 步重新计算。当算法终止时, 就可以得到每一个样本对于每一类的隶属度值。每个样本隶属度的最大值对应的那一类就是该样本所属类别。

2.3 自组织竞争神经网络

自组织竞争神经网络^[13]主要是基于生物神经元细胞“侧抑制”现象所提出的一种非线性数学模型。基本思想是竞争层竞争对输入模式的响应机会, 最后获胜的神经元仅有一个, 这个获胜的神经元就代表对于输入数据的分布模式。当一个神经元获胜后会加强与输入层的链接权值使之更有利于其竞争, 同时也会对周围的神经元产生支持和抑制。其具有的自学习、自适应、自组织能力通过对输入样本的学习可以达到一种可以识别的状态。目前自组织竞争神经网络在地质沉积物聚类上已有成功的应用^[14-15]。

自组织竞争神经网络不具有隐藏层, 仅有输入层和竞争层。在模型建立的过程中输入层的输入向量 \mathbf{P} 和输入层与竞争层的连接权值 W_{ij} 会在竞争层通过距离函数 negnist 计算出二者距离的复数, 之

后复数与一个阈值之和会作为竞争层中传输函数的输入, 其中最大的输入值及竞争获胜的值对应的传输函数会输出 1, 代表对应的类别, 其余竞争失败的会输出 0。

2.4 聚类有效性函数

本文引入统计学中的 F-统计量来确定最佳聚类数。对于 F-统计量确定最佳聚类数已做过较多的研究和应用^[15-16]。

F-统计量是统计学方差分析中, 为了检验同方差的多个正态总体均值是否相等所引入的, 其目的是检验多个同方差的正态总体均值是否有显著差异。F-统计量是一个综合描述组间差异和组内离散程度的一个统计量, 其值越大就说明组间差异越大, 组内离散度越小。通过 F-统计量引入的聚类有效性函数如下式。式中 x_i^j 表示第 j 类中的第 i 个样本, c 表示聚类数。

$$F(c) = \frac{\sum_{j=1}^s n_j \|V'_j - V_o\|^2 \cdot (n-c)}{\sum_{j=1}^c \sum_{i=1}^{n_j} \|x_i^j - V'_j\|^2 \cdot (c-1)} \quad (5)$$

V_o 表示聚类样本的平均中心, V'_j 表示总聚类数为 c 时第 j 类的平均中心, n_j 表示第 j 类的聚类个数。

$$V'_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i^j \quad (6)$$

$$V_o = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

2.5 粒径趋势分析

粒径趋势分析是指根据粒度特征的空间差异反演颗粒堆积前的搬运过程^[17]。根据沉积物的 3 种粒度参数平均粒径, 分选系数和偏态, 对比任意两个采样点 A 和 B, 可获得 8 种粒径趋势。根据经验验证^[18], 只有两种粒径趋势在沉积物的搬运方向上出现的概率较高: ① 沉积物在搬运方向上分选变好、粒径变粗且更加正偏; ② 沉积物在搬运方向上分选变好粒径变细且更加负偏。如对比中出现上述两种情况之一, 就可以定义出一个由 A 指向 B 的矢量。因此将每个采样点的粒径参数与周围相邻点 (特征距离之内) 的粒径参数进行比对, 之后矢量合成便得到整个平面上的粒径趋势矢量。由于粒径趋势分析与采样点的空间尺度有关^[19], 趋势矢量会在采样空间上产生高频变化, 即所谓的“噪声”, 去噪的方法是将得到的粒径趋势矢量与相邻采样点的趋势矢量取平均, 所得的趋势矢量即表示沉积物的搬运方向。

3 结果

3.1 粒径参数分布

3.1.1 平均粒径 平均粒径代表沉积物粒度分布的集中趋势，它能够在一定程度上反映源区物质的粒径分布、搬运介质的平均动能和沉积环境的变化。如图2(a)所示研究区域的平均粒径 φ 值介于1.63~7.66之间，均值约为 $\varphi = 5.28$ ，就整体来看泥沙较细以粉砂为主。长江口外的顾园沙、崇明东滩、横沙东滩、九段沙、南汇东滩等沉积区粒

度值均在 $\varphi = 7$ 左右，可以看出长江口外的浅滩沉积区多为粉砂。在横沙东滩外沿存在一个较为明显的粗砂区，这可能是由于枯季风浪掀沙作用使口外表层沉积物中细颗粒物质再悬浮，留下较粗粒径的沉积物所形成的^[3]。在10 m等深线向海的东南方主要分布 $\varphi = 7$ 的粉砂。在启东沿海表层沉积物粒径介于 $\varphi = 2 \sim 3$ 之间，且一直延伸到等深线为10 m的区域。在10 m等深线以东到20 m等深线的位置存在一个 $\varphi = 7$ 的粉砂分布区，这一区域向东面延伸沉积物粒径逐渐变粗。

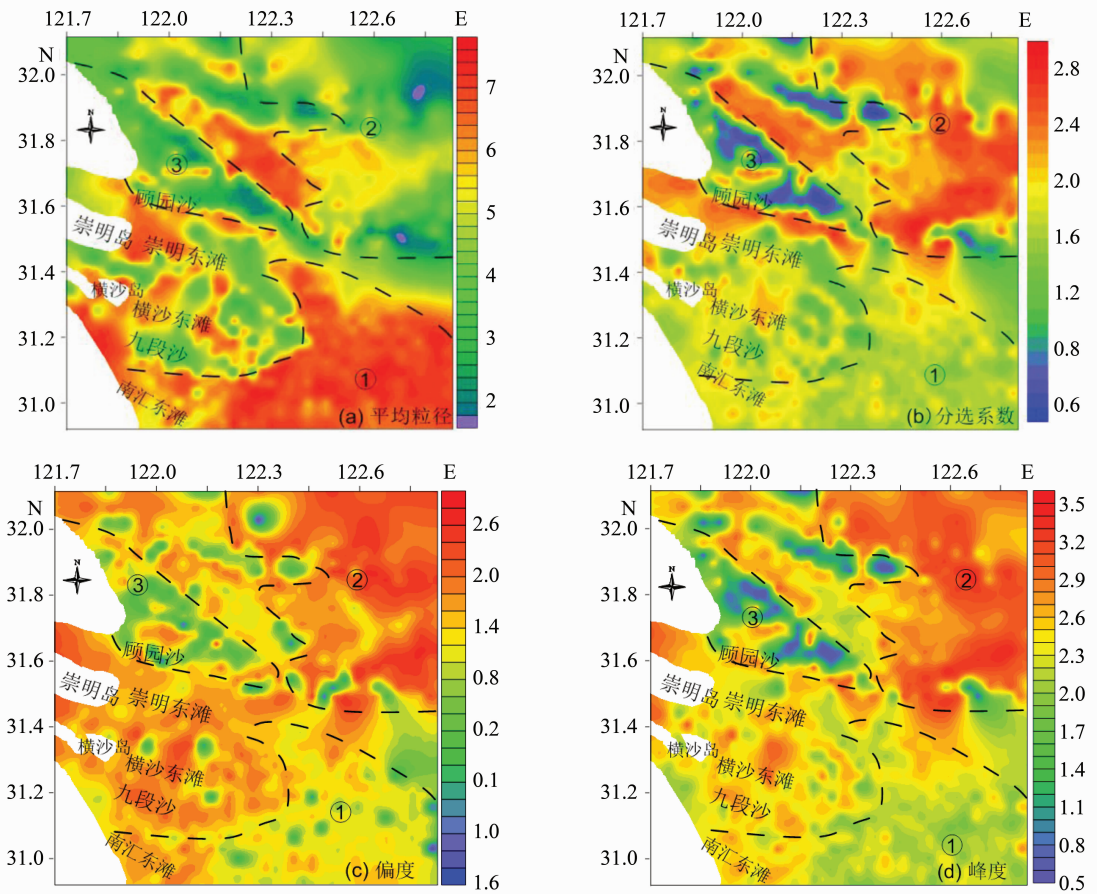


图2 长江口表层沉积物粒度参数分布图

Fig. 2 The grain size distribution parameters of surface sediments at Yangtze estuary

3.1.2 分选系数 分选系数表示沉积物的分选程度，即颗粒大小的均匀性。沉积物的分选程度与沉积环境密切相关。长江口由于受径流、潮汐、波浪等多种动力条件的相互作用，沉积物的分选、沉积过程非常复杂。就图2(b)可以看出研究区域分选系数介于0.43~2.88之间，分选系数平均约为1.8，整体看分选性较差。长江口北支出口比口外南翼区域整体分选性差，是由于南区径流作用占主

导，粒度分布相对来说比较集中，而北支径、潮流相互作用较为强烈使得其沉积物的分选性相对较差^[20]。由崇明岛东滩向东南方向延伸的整个区域分选性都大致相当，均值约为1.5。就启东以东的整个研究海域来看，与岸线平行的10 m等深线之间的区域分选性较好，从10 m等深线向东分选性开始急剧变差。

3.1.3 偏度 偏度是描述颗粒频率分布的不对称

程度, 即指沉积物组成成分中偏粗还是偏细, 如以粗粒为主则为正偏态, 反之则为负偏态。如图 2 (c) 显示研究区域的偏度在 $-1.6 \sim 2.7$ 之间, 但除极少量的样本为负偏外大都成正偏, 表明整个研究区域沉积物的组成均偏向粗颗粒。在长江口外东南方向 10 m 等深线之内偏度均值约为 1.8, 属于极正偏。从 10 m 等深线向东南方向延伸的区域, 偏度较 10 m 等深线以内有所减小, 但也基本保持在 $0.8 \sim 1.2$ 之间。启东以东海域偏度很小, 大都处于 0.2 左右, 基本为对称分布, 这可能是由于受潮汐和波浪综合作用的结果。在 10 m 等深线以东多为极正偏。在 10 ~ 20 m 等深线之间存在一个偏度约为 1.0 的区域, 在其以东的区域偏度均值约为 2.2。

3.1.4 峰度 峰度是用来测量频率曲线两尾端的分选与曲线中央部分分选比率, 即曲线尖锐或钝圆的程度。研究区域表层沉积物峰度约在 $0.5 \sim 3.5$ 之间, 均值约为 2.4, 表明沉积物的粒度频率曲线程尖顶峰状。从图 2 (d) 可以看出除启东以东沿岸区域沉积物频率曲线平顶峰状外其余均为尖顶峰。长江口外 10 m 等深线以东沉积物峰度介于 $1.7 \sim 2.3$ 之间, 启东海域 20 m 等深线之外沉积物峰度约在 $2.9 \sim 3.4$ 之间。

3.2 最佳聚类数与最佳聚类的确定

为确定沉积物的最佳聚类数, 分别计算了模糊聚类和自组织竞争神经网络两种方法将沉积物分为 2 ~ 8 类时的 F - 统计量, 结果如图 3 所示。

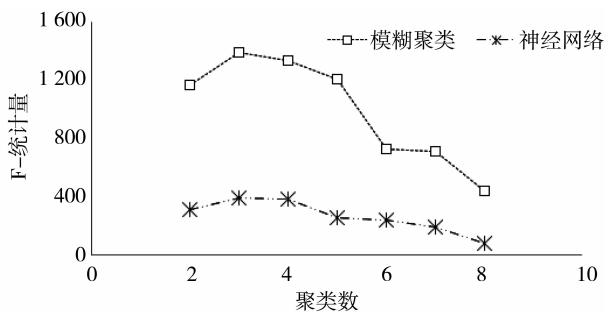


图 3 F 统计量对比

Fig. 3 F-statistic comparison

由图 (3) 可以看出两种方法的 F - 统计量在样本分为 2 - 3 类时呈增长趋势, 当超过 3 类时, F - 统计量则随聚类数增大逐渐减小, 表明这两种方法在不同聚类数所对应的 F - 统计量呈现出相同的变化趋势。聚类数为 3 时取得最大值, 说明样本分为 3 类时其统计意义显著。

对比两种方法的聚类结果, 如表 1 所示各类的样本数和粒径参数 (平均粒径、分选系数及偏度、峰度) 的均值均相差不大。

表 1 粒径参数均值对比¹⁾

Table 1 The mean particle size parameter comparison

项目	t	n	M	σ	S	K
\bar{S}_1	1	433	6.33	1.71	1.09	2.17
	2	419	6.65	1.85	1.11	2.29
\bar{S}_2	1	353	4.89	2.15	1.85	2.76
	2	394	4.79	2.16	1.94	2.81
\bar{S}_3	1	162	3.17	1.13	1.16	1.86
	2	135	2.69	0.97	1.10	1.66

1) \bar{S}_i 表示第 i 类均值, $t = 1, 2$ 分别表示模糊聚类、神经网络两种方法, M 表示平均粒径, σ 表示分选系数, S 表示偏度, K 表示峰度, n 为对应的聚类样本数

仅从聚类结果的各类样本数和粒径参数的对比可以看出模糊聚类和自组织神经网络在结果上是非常相似的。但在进一步对聚类结果的标准差统计分析中发现两种方法所得结果还是存在着一定差异, 结果如表 2 所示。

表 2 粒径参数标准差对比¹⁾

Table 2 Particle size parameters of the standard deviation comparison

项目	t	SD_M	SD_σ	SD_S	SD_K
I	1	0.45	0.28	0.59	0.23
	2	1.20	0.40	0.57	0.41
II	1	0.76	0.35	0.30	0.26
	2	1.07	0.36	0.41	0.30
III	1	0.44	0.38	0.74	0.74
	2	1.01	0.47	0.83	0.74

1) I、II、III 分别表示第一、二、三类, $t = 1, 2$ 分别表示模糊聚类、神经网络两种方法, SD_x 表示粒径参数 X 的标准差

由表 2 可以看出神经网络所得结果的标准差基本都大于模糊聚类, 这表明神经网络分类结果组内的离散程度大于模糊聚类, 也就是说模糊聚类的聚类结果每一类的紧密程度要优于神经网络。由此可见模糊聚类比之于自组织竞争神经网络更加适用于对沉积物的聚类分析。

导致这种差异的原因主要是对于河口沉积物的分类来说各个粒级指标之间通常具有相容关系, 分类的模糊性较强, 数据之间并无十分典型的差别。而竞争网络适用于具有典型聚类特性的大量数据的辨识, 并且聚类结果与前期网络的训练样本和训练

次数有关。对于模糊聚类来说,这类方法属于软划分,对于一个样本他可以同时属于所有类,但是可以通过隶属度的大小来区分其差异,这样聚类结果类内相似度高,类间相似度低。因此在沉积物的聚类问题上模糊聚类要优于自组织竞争神经网络。

具体分类结果如图4所示,除长江口各浅滩和拦门沙区域分类较为无序外其余研究区域各类别都较为集中。第一类沉积物以粉砂为主,主要分布在南北港出口东南方向10 m等深线到40 m的等深线范围内,这一区域为长江口泥质区所在地,经长

江口运输的泥沙主要在此沉积,之后随着潮汐、沿岸流向东海陆架搬运。在启东市以东海域10 m等深线到20 m等深线之间有一个平行于岸线的分布区。第二类沉积物以粉砂质砂、砂质粉砂为主,主要分布在启东市以东海域20 m等深线到40 m等深线之间,崇明浅滩和横沙东滩外至10 m等深线处有部分分布。第三类沉积物以细砂、中细砂为主,在整个研究区域分布较少,分布区域主要在启东市沿岸地区。

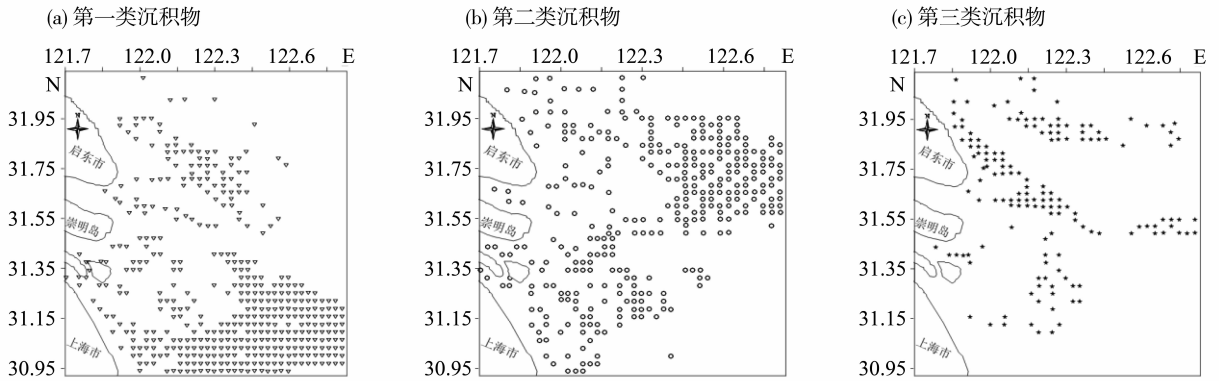


图4 长江口表层沉积物聚类结果

Fig. 4 Clustering results of surface sediments at the Yangtze estuary

4 粒径趋势及成因分析

采用 Gao-Collins 模型计算沉积物的搬运趋势,特征距离参考文献 [8] 取值 0.09° 。由图5可以看出在长江口外沉积物整体的输移趋势大致可分为沿岸向南和朝口外偏东北两个方向。研究表明长江冲淡水在向外扩展时,受口外雨状锋阻挡,分两股扩展,一股朝东南,一股朝东北偏北,两股流的相对强弱受径流量控制,径流大时向东南扩展的一股强,反之则东北偏北的一股强^[21]。由此可以看出长江口沉积物的输移趋势与该区域的流态基本相符。在研究区域 122.15°E 以西整体输移趋势规律性并不强,原因在于在河口10 m等深线内动力结构复杂,受径流、潮汐、波浪、沿岸流等综合作用,这一动力结构决定了这一区域的沉积物组成较为复杂,从聚类结果也可以验证这一结论。在 122.15°E 以东整体有逐渐偏北的输移趋势,这可能是由于口外径流作用减弱,在浙闽沿岸的外侧终年存在北向的高温高盐的台湾暖流,夏季台湾暖流势力很强(流速 $20 \sim 40 \text{ cm/s}$),表、底层都存在;冬季台湾暖流只存于底层,且流速较弱($10 \sim 20$

cm/s)^[22],苏北沿岸流与台湾暖流在苏北启东嘴外汇合向东北扩散,最远可到韩国济州岛附近海域^[23]。采用窦国仁^[24]粘性泥沙启动流速公式估算了此区域泥沙粒径为 $\varphi = 4, 7$ 两种情况的最小启动流速,分别为 7.4 、 19.5 cm/s ,流速区间均在台湾暖流流速范围之内,可见台湾暖流对此区域泥沙输移确实存在一定影响,另外地形对于台湾暖流的限制作用也可能导致这一输移趋势。由于北支为潮流作用占主导,南翼区域为径流作用占主导,南、北流向口外的径流强度有所差异,因而在口外二者相对应的区域向北偏程度有所差异。这两区域的泥沙来源也有所不同,北支 122.15°E 以东的来沙主要是苏北沿岸和外海陆架搬运的泥沙占主导,口外南翼区域则主要以径流输沙为主,这两区域也分别对应第二类、第一类沉积物所在位置。

长江口西北有偏东南向岸的输移趋势,此区域受长江径流影响较小,可能主要受沿岸流作用控制。泥沙来源较为单一,就图5来看主要是苏北沿岸的输沙,这与聚类结果第3类沉积物的分布区域较为吻合。在长江北支出口附近沉积物有向崇明东滩及北边滩汇聚的趋势,原因在于,目前北支的

分流比已降至 2% 以下, 径流对输沙的影响有限, 而河口进潮量可达 10^7 m^3 以上^[25]; 涨潮流速大于落潮流速, 使得北港落潮流出来的泥沙进而被张潮流向内带入。在长江口南北港口由于受径流的影响泥沙向东、东南向输移。在研究区域东北区可以明显看到来自西北、东南两个方向的泥沙在此汇聚后偏向东北, 此处可能是由于苏北沿岸流和台湾暖流在此与长江口的冲淡水相遇而形成的一种趋势。研究表明, 在洪季长江径流作用加强后, 长江冲淡水在 122.5°E 后会有一部分转流向东北, 另一部分向西南进入杭州湾^[22], 而在相应区域的泥沙输移趋势与之较为吻合。在枯季长江径流量较小, 在口外与黄海沿岸流汇合之后也会向南输移。在研究区域东南角存在有陆架向河口的输移趋势, 这反映了涨潮优势流区域沉积物的输移趋势, 这为河口水下三角洲在河流泥沙减少后仍处于高淤积提供了机理上的解释^[7]。

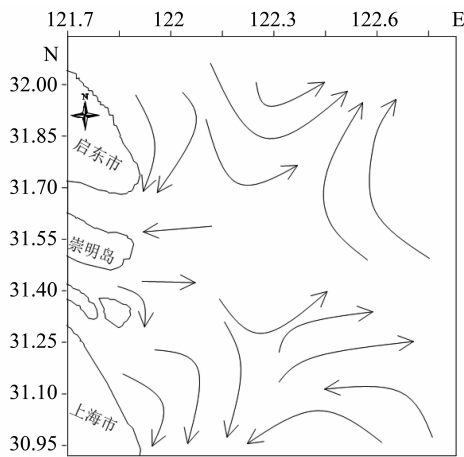


图 5 长江口泥沙输移趋势

Fig. 5 Trend of Yangtze estuary sediment transport

5 结论

本文基于模糊聚类、自组织竞争神经网络两种方法对长江口表层沉积物做了聚类分析, 采用 F-统计量确定样本的最佳聚类数, 且基于 Gao-Collins 矢量输运模型探讨了沉积物的粒径运移趋势, 结果表明:

1) 长江口的浅表层沉积物分为 3 类最具统计意义。根据聚类结果来看, 三类沉积物分别都有一个主要存在区域, 第一类集中在南北港出口东南方向 10 m 等深线到 40 m 的等深线范围内, 第二类主要分布于启东市以东海域 20 ~ 40 m 等深线之间, 第三类主要在启东市沿岸地区。在口外 10 m 等深

线以内各类沉积物均有存在, 主要由第一、二类沉积物组成。造成这种分布模式的原因可能主要跟水动力有关, 口外 10 m 等深线以内水动力结构复杂, 受径流、潮汐、波浪等综合作用影响导致沉积物组成较为复杂。长江冲淡水在向外扩展时, 一股朝东南, 一股转向东北, 这两股冲淡水携带泥沙分别沉积在研究区域的东南、东北区也正好对应第一、二类沉积物的沉积区域。启东沿岸海域受长江径流影响较小, 沉积物也有别于前两类。

2) 第一类沉积物以粉砂为主, 平均粒径均值约 $\varphi = 6.6$, 分选系数均值约为 1.84, 分选较差。偏度和峰态均值约为 1.1、2.3, 频率曲线呈极正偏和尖顶峰。第二类沉积物主要以粉砂质砂、砂质粉砂为主, 平均粒径均值约为 $\varphi = 4$, 分选系数均值约为 2.2, 分选性差, 偏度和峰态平均值分别为 1.9、2.8, 频率曲线呈极正偏和尖顶峰。第三类沉积物在整个研究区域分布较少, 以细砂、中细砂为主, 平均粒径约为 $\varphi = 2.7$, 在其主要分布区域分选性均值约为 0.6, 分选性较好, 偏度属于正偏, 频率曲线呈平顶状。

3) Gao-Collins 粒径趋势模型反映出长江口沉积物整体的输移趋势可分为沿岸向南和朝口外东北向两个方向。口外南翼区域受径流、沿岸流的影响一部分向南输移, 另一部分向外海陆架输移, 并在 10 m 等深线部分泥沙输移趋势逆时针转向东北, 在 30 m 等深线处存在有陆架向河口的输移趋势。北支出口附近沉积物有向河口内输移的趋势, 北支口外 20 ~ 40 m 等深线之间有来自苏北沿岸、外海陆架的来沙在此汇聚后输移方向转向东北。

参考文献:

- [1] 刘红. 长江口表层沉积物分布特性研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2006.
- [2] 闫虹, 戴志军, 李九发, 等. 长江口拦门沙河段潮滩表层沉积物分布特征[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 629 - 637
- [3] 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.
- [4] 孔亚珍, 丁平兴, 贺松林, 等. 长江口外及其邻近海域含沙量时空变化特征分析[J]. 海洋科学进展, 2006, 24(4): 446 - 454.
- [5] DAI Z J, DU J Z, CHU A, et al. Sediment characteristics in the North Branch of the Yangtze Estuary based on radioisotope tracers [J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62: 1629 - 1634.
- [6] 戴志军, 陈吉余, 程和琴, 等. 南汇边滩的沉积特征和

- 沉积物输运趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(6): 735 - 739.
- [7] DAI Z J, LIU J T, WEI W, et al. Detection of the three Gorges Dam influence on the Changjiang (Yangtze River) submerged delta [J]. Sci Rep, 2014, 4(6600). DOI: 10.1038/srep06600.
- [8] 王国庆, 石学法, 刘焱光, 等. 粒径趋势分析对长江南支口外沉积物输运的指示意义[J]. 海洋学报, 2008, 29(6): 161 - 166.
- [9] FOLK R L, WARD W C. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters [J]. Journal of Sedimentary Research, 1957, 27(1): 3 - 26.
- [10] SHEPARD F P. Nomenclature based on sand-silt-clay ratios [J]. Journal of Sedimentary Research, 1954, 24(3): 151 - 158.
- [11] BEZDEK J C. A physical interpretation of fuzzy ISODATA [J]. IEEE Trans Syst Man Cybern, 1976(5): 387 - 389.
- [12] 王硕儒, 林振宏. 模糊迭代自动聚类法及其在海洋沉积物分类上的初步应用 [J]. 海洋科学进展, 1986(2): 33 - 37.
- [13] HAYKIN S. Neural networks and learning machines [J]. Neural Networks & Learning Machines, 2009, 5(5): 32 - 41.
- [14] 王硕儒, 赵举孝. 自组织神经网络用于地质样品分类 [J]. 物探与化探, 1997, 21(2): 139 - 144.
- [15] 孙才志, 王敬东, 潘俊. 模糊聚类分析最佳聚类数的确定方法研究 [J]. 模糊系统与数学, 2001, 15(1): 89 - 92.
- [16] 安中华, 安琼. 模糊聚类的有效性研究 [J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2006, 28(3): 222 - 226.
- [17] 高抒. 沉积物粒径趋势与海洋沉积动力学 [J]. 中国科学基金, 1998, 12(4): 241 - 246.
- [18] GAO S. A Fortran program for grain-size trend analysis to define net sediment transport pathways [J]. Computers & Geosciences, 1996(22): 449 - 452.
- [19] GAO S, COLLINS M. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors" [J]. Sedimentary Geology, 1992, 81(1): 47 - 60.
- [20] 刘红, 何青, 孟翔, 等. 长江口表层沉积物分布特征及动力响应 [J]. 地理学报, 2007, 62(1): 81 - 92.
- [21] 朱建荣, 丁平兴, 胡敦欣. 2000年8月长江口外海区冲淡水及羽状锋的观测 [J]. 海洋与湖沼, 2003, 34(3): 249 - 255.
- [22] 边昌伟. 中国近岸泥沙在渤海, 黄海和东海的运输 [D]. 青岛: 中国海洋大学, 2012.
- [23] 刘红, 何青, GERT 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.
- [24] 窦国仁. 论泥沙起动流速 [J]. 水利学报, 1960(4): 44 - 60.
- [25] 闵凤阳, 汪亚平, 高建华, 等. 长江口北支的沉积物输运趋势 [J]. 海洋通报, 2010, 29(3): 264 - 270.