

# 海州湾表层沉积物粒度的空间变异特征

刘付程<sup>1</sup>, 张存勇<sup>1</sup>, 彭俊<sup>2</sup>

(1. 淮海工学院, 江苏 连云港 222001; 2. 华东师范大学 河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062)

**摘要:** 在海州湾海域采集了表层沉积物 60 个, 经实验室分析获得了各采样点不同粒级组分的质量分数, 在此基础上运用地统计学方法分析了砂、粉砂和黏粒三组分的空间变异特征, 并利用 Kriging 插值方法绘制了相应的沉积物分布图。结果表明, 海州湾表层沉积物中砂和黏粒组分均具有较强的空间自相关性, 其空间自相关距离分别达到 15 km 和 28 km, 而粉砂则具有中等的空间自相关性, 自相关距离在 12 km 左右; 在大于 9 km 的尺度上, 3 种粒级沉积物的空间变异性表现出明显的各向异性特征。制图结果表明, 研究海域沉积物的总体组成状况是北部偏砂、南部偏黏、中部以粉沙为主。研究结果对连云港航道疏浚、整治及近海水产养殖规划等工作具有一定指导意义。

**关键词:** 沉积物; 空间变异性; 地统计学; 海州湾

中图分类号: P736.21

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)07-0054-05

近海表层沉积物的粒径大小及其组合状况是沉积物物源条件和水力搬运过程等综合作用的结果, 其空间分布特征反映了浅海底边界动力过程的能量分配、颗粒物输移等诸多的沉积环境信息, 同时也体现了近海沉积物-水界面交换类型的空间差异。研究不同粒级沉积物的空间变异性对于近海沉积过程分析和环境容量预测有着重要意义<sup>[1]</sup>。海州湾是中国重要的水产养殖基地, 同时也是连云港航道的必经海域, 探讨其沉积物粒度的空间变异特征对于开展海洋养殖环境评价和航道疏浚等工作有着十分重要的意义。

沉积物粒度参数的空间差异常被用来解释沉积物的空间变异性及其成因<sup>[2~5]</sup>, 但粒度参数是基于单个样本计算得到的, 因此它对沉积物粒度宏观尺度变异性的解释本质上仍带有定性的特点。Gao 等<sup>[6,7]</sup>所提出的二维粒径趋势分析方法考虑到了多个样本粒度参数的空间关系, 这使得该方法在解释沉积物的运移趋势和空间变异特征方面显得更为有效。事实上, 沉积物粒度的空间变异性是沉积环境条件长期作用的结果, 它是空间位置的函数, 属于区域化变量范畴, 在一定的条件下可通过地统计学方法加以揭示。地统计学方法是基于区域化变量理论基础上的—种空间统计分析方法, 该方法目前已在生态学、环境学和土壤学等领域都得到了广泛的应用<sup>[8~10]</sup>。作者尝试运用地统计学方法对海州湾沉积物粒度的空间变异性进行定量分析, 并据此进行沉积物粒度空间分布制图。

## 1 研究区概况

海州湾是一个濒临南黄海的开敞海湾。作者着重讨论山东日照市岚山头至连云港外东西连岛一线以西海域, 该海域水深较浅, 沉积物厚度达 10 m 以上, 且其粒度组成表现为东北粗西南细的总体分布特征(图 1)。海州湾水动力主要为潮汐和波浪<sup>[11]</sup>。潮汐类型为正规半日潮, 平均潮差约 3.4 m; 受黄海反时针潮波系统的影响, 涨潮流为 SW 向, 落潮流为 NE 向, 平均潮流速度 40 ~ 50 cm/s, 且涨潮流速大于落潮流速; 余流流向偏南, 流速一般小于 5 cm/s。该海域常浪为 SE 向, 强浪为 NE 向, 最大波高 3 ~ 5 m。

## 2 研究方法

### 2.1 样品采集与分析

2005 年 9 ~ 10 月间, 在岚山头与东西连岛东端连线以西海域, 利用抓斗式采样器进行海底表层沉积物取样, 共采集样品 60 个; 样点按垂直岸线的断面方式布设, 取样位置采用 GPS 定位, 并经墨卡托

收稿日期: 2009-01-05; 修回日期: 2010-05-06

基金项目: 江苏省高校自然科学基金项目(07KJD170012); 江苏省海洋资源开发研究院开放基金项目(JSIMR09B08); 淮海工学院自然科学基金项目(Z2008009)

作者简介: 刘付程(1971-), 男, 安徽安庆人, 副教授, 博士, 主要从事遥感与 GIS 应用研究, 电话: 0518-85895587, E-mail: lygliufucheng@163.com

投影转换,产生以 m 为单位的平面坐标系统中的坐标,最后生成相应的样点分布图(图 1)。所获样品在室内采用 SFY-A 型音波震动式全自动筛分仪和粒径计与消光法相结合的方式对所得的沉积物粒度结果进行统计,得到各采样点沉积物不同粒级范围的质量分数。考虑到沉积物不同组分的水力性能特点,作者着重讨论黏粒(<4 μm)、粉砂(4~63 μm)、砂粒(63~2 000 μm)三组分的空间变异特征。

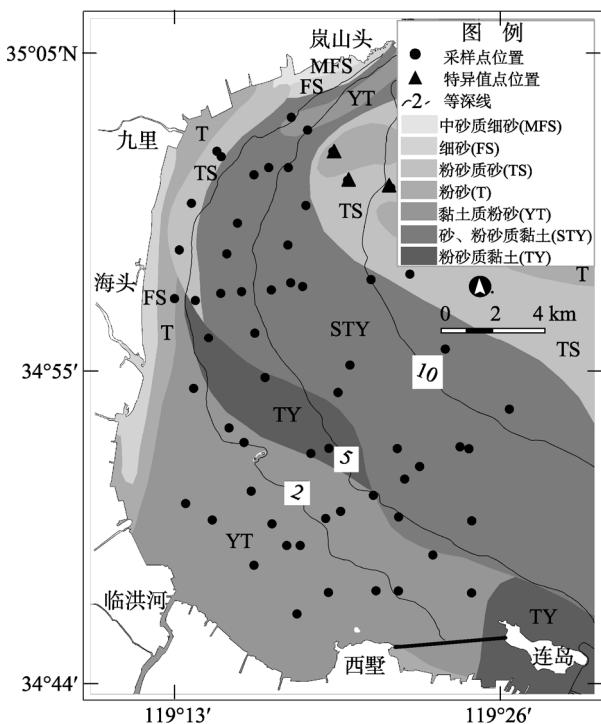


图 1 研究海域沉积环境与样点分布图

Fig. 1 Sketch of the sedimentary environment and the sampling sites

## 2.2 地统计学方法

地统计学方法是基于区域化变量理论基础上的—种空间统计分析方法,限于篇幅,作者只对其原理作—介绍,更详细的内容参见文献[12]和[13]。若假设区域化变量满足二阶平稳,则其实验半方差  $\gamma(h)$

可用下式表示:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (1)$$

式中  $h$  为分隔两采样点的矢量,称为步长,  $N(h)$  为相距为  $h$  的样点对数目,  $Z(x_i)$  和  $Z(x_i+h)$  分别表示区域化变量  $Z(x)$  在位置  $x_i$  和  $x_i+h$  处的实测值。实验半方差值相对于步长的散点图可用地统计学方法提供的球状、指数、高斯以及线性有基台等理论模型来拟合,从拟合的理论模型中可获得 3 个基本参数(块金值、基台值、变程),且这 3 个参数是描述和理解变量空间变异格局的重要量化指标<sup>[12,13]</sup>。

Kriging 插值是一种线性无偏最优插值方法,对变量在点  $x$  处的估计值  $Z^*(x)$ ,可用与该点相关的  $n$  个有效观测值  $Z(x_i)$  的线性组合得到,即:

$$Z^*(x) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

式中  $\lambda_i$  是赋予观测值  $Z(x_i)$  的权重,表示各观测值对估计值的贡献大小,可在满足线性最优无偏的条件下由实验半方差函数拟合理论模型求得<sup>[12]</sup>。

本文中,实验半方差的计算及其理论模型的拟合均采用地统计学软件 GS+5.3 进行。由于采样为非规则取样,为保证实验半方差的计算具有足够的点对(不少于 12 对),步长选取距离组方法<sup>[14]</sup>,步长划分以 1.5 km 为间距;各向异性半方差计算的角度容差(tolerance)定为  $\pm 22.5^\circ$ 。变量半方差理论模型拟合一般要求拟合模型的决定系数( $R^2$ )要较大,然后再用交叉验证法来修正模型参数,以便获得最优的模型参数<sup>[15]</sup>。Kriging 插值和制图分别由 GS+5.3 和 ArcGIS9 完成。

## 3 结果与分析

### 3.1 沉积物不同组分质量组成的描述性统计

由表 1 可知,海州湾沉积物组分中以粉砂的平均质量分数最高,砂粒和黏粒的平均质量分数居其次,反映了古黄河三角洲沉积物的粉砂质特性。3 种

表 1 表层沉积物不同组分质量组成的描述性统计

Tab. 1 Descriptive statistics of different surficial sediment components

沉积物组分	样本数	质量分数(%)				变异系数	偏度值	峰度值
		最小值	最大值	平均值	标准差			
黏土(<4 μm)	60	0	31.4	14.4	7.97	0.55	0.09	-0.32
粉砂(4~63 μm)	60	4.2	77.2	54.7	18.78	0.34	-1.46	1.46
砂(63~2 000 μm)	60	0.2	95.2	30.4	24.51	0.81	1.22	0.96

组分的变异系数差别较大,砂粒和黏粒的变异系数分别为 0.81 和 0.55,表明其在空间分布上的总体差异显著;而粉砂的变异系数为 0.34,说明其空间分布的均匀性更为明显。

偏度和峰度反映了沉积物样本数据的统计分布形态,即 3 种组分全部采样点数据各自偏离正态分布的程度(其物理含义别于单个沉积物样品的粒度参数—偏度和峰度的含义)。半方差函数分析要求样本数据的统计分布接近正态,否则会影响到区域化变量的二阶平稳性,进而会影响到半方差函数的稳健性<sup>[14]</sup>。从实测数据的统计分布来看,黏粒组分基本上呈现正态分布,而粉砂和砂粒组分则表现为偏态分布,这是因为受潮流等分选搬运等作用的影响,部分采样点的粉砂和砂粒组分含量明显区别于其他样点,从而使得样本数据中存在着少量特异值。考虑到本研究中特异值均出现在采样区北部离岸一侧的边界位置(图 1),因此本文采用平均值加减二倍标准差

的域值法对特异值进行处理,处理后的偏度值显著降低,统计分布更趋向正态。后续实验半方差的计算采用域值法处理后的数据。

### 3.2 沉积物不同组分空间变异的各向同性特征

表 2 是沉积物 3 种组分各向同性半方差函数的拟合理论模型及其参数,其中黏粒的最佳拟合模型为高斯模型,而粉砂和砂粒均为球状模型。参数  $C_0$  为块金方差,表示由最小采样尺度(<1.5 km)以下的随机因素所引起的空间变异性,在不增加采样密度的情况下,这种变异性难以预测; $C_0+C$  为基台值,反映了研究区域沉积物各组分总的变异性,通常与各组分的样本方差较为相近。块金值与基台值之比  $C_0/(C_0+C)$  可以揭示变量空间自相关程度,若比值 < 0.25,表明变量具有强烈的空间自相关性,若比值 > 0.75,则空间自相关性很弱<sup>[12]</sup>。

表 2 表层沉积物不同组分的理论半方差模型及其参数

Tab. 2 Theoretical semivariogram models and their corresponding parameters of different surficial sediment components

沉积物组分	理论模型	$C_0$	$C_0+C$	$C_0/(C_0+C)$	$a(\text{km})$	$R^2$
黏粒	高斯模型	16.3	83.6	0.195	28.2	0.972
粉砂	球状模型	112.0	278.0	0.403	12.2	0.835
砂粒	球状模型	122.0	479.0	0.255	15.4	0.868

研究区域的砂粒和黏粒的该项比值均显著小于粉砂,表明前两者有着比后者更强的空间自相关性。这种差异与控制三者空间变异主导因素的不同有关,因为砂粒的粒径较大,水力远距离搬运困难,其空间变异性主要受研究区域的地质背景条件和潮流对细颗粒的分选搬运作用控制;黏粒质量较轻,水力搬运多以悬移为主,因此控制其空间变异的主导因素主要是潮流。由于地质条件和潮流作用具有相对的稳定性,它们均以一种持续性或周期性的作用方式来控制砂粒和黏粒的空间变异性,从而使其表现为显著的空间自相关性。相反,由于粉砂的大小介于砂粒和黏粒之间,易于起动且多以底移跃迁的搬运方式为主,这使得其空间变异性的主导控制因素不仅有潮流、波浪等周期性因素,而且还有航运、养殖扰动等人为因素。由于人为因素具有很强的随机性,它对潮流波浪周期性作用结果的规律性有扰动,从而增加了不确定性,表现为粉砂空间自相关性强度的削弱。

变程  $a$  反映了沉积物颗粒空间自相关范围的大小,在变程以内,样点越靠近,同一组分沉积物的含量就越相似<sup>[12,13]</sup>。表 2 表明,黏粒组分的空间自相似范围最大,达到了 28.2 km,这与海州湾海域底层水质点的潮流搬运距离 25 km 比较接近<sup>[16]</sup>,这进一步说明了潮流在控制黏粒组分空间变异性中的主导作用。粉砂和砂粒含量的空间自相似性范围比较接近,分别为 12.2 km 和 15.4 km。粉砂可能是受人为活动等随机因素的扰动影响才使其表现为相对较小的自相似范围,砂粒则可能与其物源供应单一(主要是岚山头和西墅、东西连岛等基岩海岸的风化物)、远距离搬运困难及黏粒、粉砂搬运而导致砂粒相对含量的消长等因素有关,因为这些因素往往使得砂粒含量呈现出局部斑块状的分布模式。

### 3.3 沉积物不同组分空间变异的各向异性特征

在较大的尺度上,自然过程往往在不同的方向上控制着变量的空间变异性,使得其空间变异表现

出明显的方向性特征<sup>[12,13]</sup>。为了解研究区域不同粒径沉积物空间变异的各向异性特征,本文分别计算了NE40°、SE130°和NEE85°、SSE175°两组相互垂直方向上的半方差,并分别计算了它们的各向异性比 $K(h)$ (图2)。

从图2可以看出,在小于9 km的尺度上,沉积物3种组分的各向异性比 $K(h)$ 均在1.0附近变化,表明三者的空间变异性是各向同性的。当步长 $h$ 大于9 km时,三者的各向异性比 $K(h)_{40°/130°}$ 显著上升,而 $K(h)_{85°/175°}$ 则变化不大。这表明在大于9 km的尺度上,研究区域沉积物3种组分的空间变异表现出明显的各向异性特征,且在NE40°和SE130°两个相互垂直的方向上表现最为明显。这是因为海州湾海域的涨落潮方向基本上是SW-NE向,潮流在该方向上对不同粒径沉积物进行着分选搬运,使得沉积物不同粒径组分的组成情况沿潮流流向出现分异;而在垂直于潮流流向(NW-SE)上主要是受波浪的周期性影响,一般来说,这种影响主要表现在相对较小的尺度上,并对小尺度上潮流的分异结果有抵消作用,这也正是为什么小尺度上(<9 km)沉积物的各向异性特征不明显的原因。但在较大的尺度上,潮流对沉积物的分选作用更为突出,不同粒径沉积物沿垂直于潮流流

向的带状分布更明显,从而导致在较大的尺度上沉积物的空间变异性存在着方向差异。

### 3.4 沉积物不同组分的空间分布格局

为了更直观地反映研究区域不同粒径沉积物的空间变异特征,采用Block Kriging方法绘制了不同粒径沉积物的空间分布图,考虑到沉积物空间变异的各向异性特征,插值样点搜索的最大半径不超过9 km。

从图3中可以看出,海州湾近海海域黏粒和粉砂的空间分布表现出北低南高的现象,与图1中的沉积物质地类型所反映的3组分的空间分布格局基本一致,但粉砂空间分布的均匀性要好于黏粒。这是因为研究区域的涨潮流(SW向)要大于落潮流(NE向),较细的沉积物总体上有向西南向搬运的趋势,加之南部连接东西连岛与西墅的西大堤阻挡作用,黏粒和粉砂因潮流流速的降低而在南部沉积;由于潮流对黏粒的搬运比粉砂更显著,使得黏粒的搬运距离更远,因此其空间分布不及粉砂均匀。砂粒的空间分布格局与粉砂和黏粒具有消长性特点,表现为北低南高,显然是潮流分选搬运的结果。

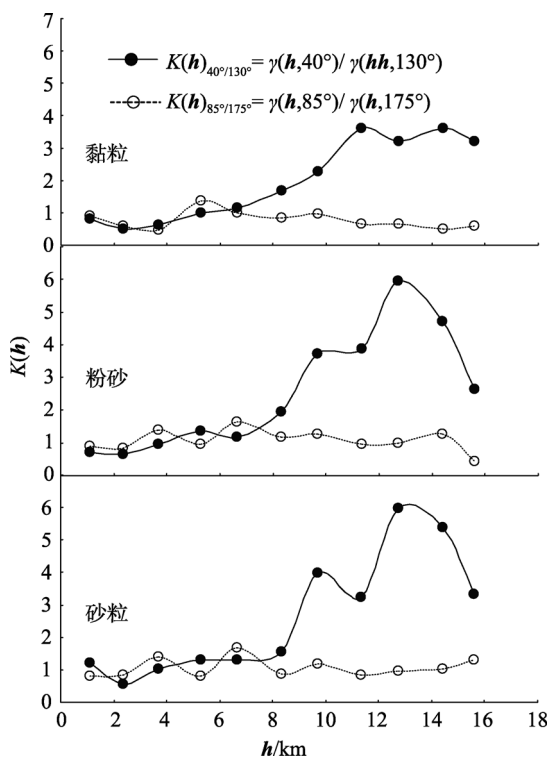


图2 沉积物不同组分空间变异的各向异性比

Fig. 2 Ratios of anisotropic semivariogram of different surficial sediment components

## 4 结论

半方差函数分析表明,受地质背景条件及潮流等结构性因素的影响,海州湾表层沉积物中的黏粒和砂粒均具有较强的空间自相关性,其自相关距离分别达到28 km和15 km;而由于受养殖、航运等随机性人为因素扰动的影响,粉砂则表现出中等的空间自相关性,自相关距离在12 km左右。3种组分的水力特性差异及其空间变异的主控因素的不同,使得三者各向同性变异尺度大约在9 km左右,超出这个范围,其空间变异的各向异性显著增强,且以NE40°和SE130°两组相互垂直的方向上差异最为明显。制图结果表明,海州湾表层沉积物的总体分布格局是北部偏砂,南部偏黏,中部以粉砂为主。

地统计学方法作为一种以区域化变量理论为基础的空间分析方法,它不但能从宏观上定量地分析近海沉积物的空间变异特征,而且还能有效地在沉积物空间变异格局与沉积环境条件之间建立起联系,从而有助于从不同的尺度上来理解和分析近海沉积动力过程。

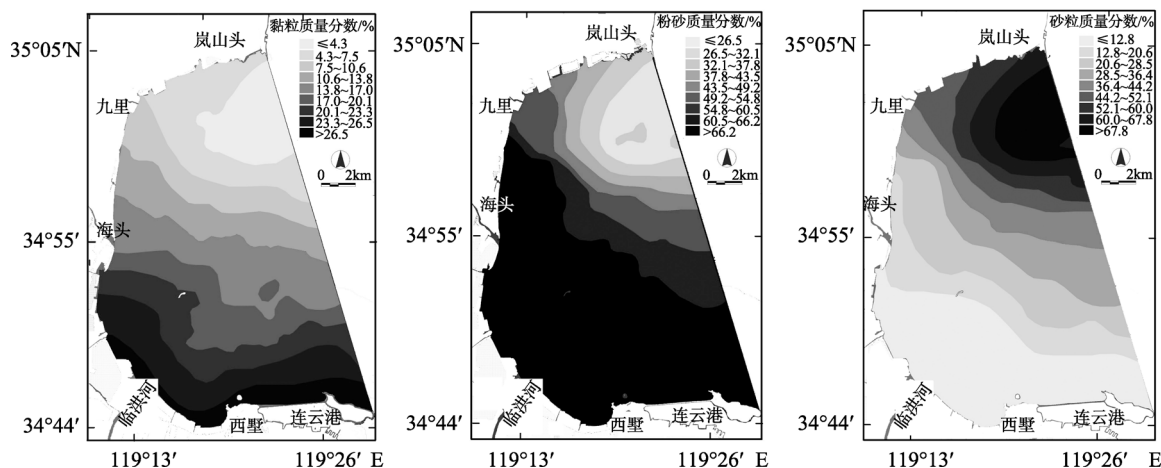


图3 海州湾沉积物不同组分的空间分布格局

Fig. 3 Distribution patterns of different surficial sediment components in Haizhou Bay

致谢：华东师范大学河口海岸学国家重点实验室陈沈良教授对本文提出了许多启发性的建议，长江下游水文水资源局提供了宝贵的分析数据，谨致谢忱！

参考文献：

[1] 肖晨曦, 李志忠. 粒度分析及其在沉积学中应用研究[J]. 新疆师范大学学报(自然科学版), 2006, 25(3): 118-123.

[2] 张杰, 张富元, 章伟艳, 等. 苏鲁交界海域表层沉积物类型和分布特征[J]. 海洋学研究, 2006, 24(3): 41-52.

[3] 马志强, 周遵春, 杨爽. 辽东湾北部近海海域表层沉积物类型及分布特征[J]. 水产科学, 2008, 27(2): 95-97.

[4] 刘运令, 汪亚平, 高建华, 等. 胶州湾沉积物的时空分异特征及运移趋势[J]. 海洋通报, 2008, 27(3): 57-66.

[5] 陈祥锋, 贾海林, 刘苍宇. 连云港南部近岸带沉积特征与沉积环境[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2000, 1: 74-81.

[6] Gao Shu, Collins M. A critique of the "McLaren Method" for defining sediment transport paths [J]. *Journal of Sedimentary Petrology*, 1991, 61: 143-146.

[7] Gao Shu, Collins M. Net sediment transport patterns

inferred from grain-size trends, based upon definition of "transport vectors"[J]. *Sedimentary Geology*, 1992, 81(3/4): 47-60.

[8] 马宁远, 王惠卿, 张伟, 等. 基于地统计学的新疆棉田烟粉虱(*Bemisia tabaci* (Gennadius)) 危害动态与时空分布[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2 654-2 662.

[9] 潘颜霞, 王新平, 苏廷桂, 等. 荒漠人工固沙植被区土壤性状的空间分布特征[J]. 土壤学报, 2007, 44(5): 943-948.

[10] 王天阳, 王国祥. 昆承湖水水质参数空间分布特征研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(8): 1384-1390.

[11] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志(第四分册)[M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 362-372.

[12] 王政权. 地统计学及其在生态学中的应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999. 59-149.

[13] Goovaerts P. Geostatistics in soil science: state of the art and perspectives[J]. *Geoderma*, 1999, 89: 1-45.

[14] 刘付程, 史学正, 于东升. 基于地统计学和 GIS 的太湖典型地区土壤属性制图研究——以土壤全氮制图为例[J]. 土壤学报, 2004, 41(1): 20-27.

[15] 胡克林, 李保国, 林启美, 等. 农田土壤养分的空间变异特征[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 33-38.

[16] 张存勇. 连云港近岸海域海洋工程对生态环境的影响及其研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.

(下转第 76 页)