

# 悬浮体粒度特征反映的南黄海辐射 沙脊群泥沙扩散趋势\*

刘涛<sup>1,2</sup> 石学法<sup>2①</sup> 刘焱光<sup>2</sup> 刘升发<sup>2</sup> 王昆山<sup>2</sup>

(1. 广西红树林保护与利用重点实验室 北海 536007; 2. 海洋沉积与环境地质国家海洋局重点实验室  
国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

**提要** 基于大量的悬浮体现场粒度和浓度数据,借助细颗粒悬浮体作为示踪物,分析了潮流作用下南黄海辐射沙脊群海底沉积物的再悬浮和扩散特征,并探讨了辐射沙脊群以北泥质区的形成机制。研究表明:(1)在辐射沙脊群以北,近岸悬沙在离岸方向上的扩散受到限制,向南又被辐射沙脊群中心浅滩所阻挡,只能在辐射沙脊群与废黄河口之间形成沿岸分布的高浓度浑水团。(2)辐射沙脊群以北的往复潮流对海底沉积物有分选作用,倾向于把海底沉积物中的粗颗粒分选搬运至沙脊群,把细颗粒沉积物向北输送,从而在沙脊群以北形成泥质区。(3)在正常海况下,沙脊表层沉积物再悬浮作用十分微弱,沙脊上覆水体中的悬沙主要来自于临近沟槽海底沉积物的水平扩散。

**关键词** 南黄海;辐射沙脊群;悬浮体

**中图分类号** Q958 **doi:** 10.11693/hyhz20121129001

南黄海辐射沙脊群是我国江苏岸外南黄海南陆架上发育的大型潮成沉积体系,长期以来,其成因机制、现代动力过程、泥沙输运特征和地貌演化趋势一直是众多学者关注和研究的科学问题。辐射沙脊群以北为废黄河三角洲,自 1855 年黄河北归后,主要输沙来源丧失,而几条本地小型河流输沙量又很低,因而该区水体中的悬沙主要来自于海底沉积物在潮流、波浪作用下的再悬浮(Milliman *et al.*, 1986; 秦蕴珊等, 1989; 宋召军等, 2006; 吴德安等, 2007; 邢飞等, 2010)。废黄河口以南的江苏沿岸成为一个半封闭体系,体系内的泥沙输运导致侵蚀与淤积并存,海岸带和海底地貌变化十分剧烈(张忍顺等, 2002; 虞志英等, 2002),这对沿岸的土地利用、航行安全、港口航道建设都产生了较大影响,深入研究该区域海底沉积物的再悬浮和扩散输运特征,对于理解和预测其海底地貌演化有重要意义。本文依据大量站位的悬浮体浓度和粒度数据,对该区水体中各粒级悬浮颗粒浓度的空间分布特征进行了分析,结合研究区海底沉积物粒度数据和水动力

资料,对研究区内悬沙的扩散输运特征进行了讨论。

## 1 材料与方法

本文一共使用了 411 个站位的悬浮体现场粒度数据,数据采集时间为 2008 年 5 月至 6 月间,现场采样期间海况正常,最大波高不超过 2.5m(据随船海况记录)。所有站位使用 LISST-100X 型现场激光粒度仪(美国 SEQUOIA 公司生产)采集悬浮体粒度剖面数据,该仪器可探测海水中直径 2.73—462 $\mu\text{m}$  的悬浮颗粒体积浓度,共分 32 个粒级(图 1),使用时以匀速施放至距海底 0.5m 处,数据采集频率设定为 3Hz,这样可以保证 0.2m 左右的采样间距。考虑到 LISST-100X 探测范围有限(其激光束测定水柱长度为 6m),为排除偶然性,原始数据在使用前均需经预处理,将异常值剔除并按照一米深度间隔取平均值。同时采集的水样则以真空抽滤法将其中的悬浮体过滤到滤膜上(孔径 0.7 $\mu\text{m}$ ,经 Mettler AE163 型电子分析天平预先称重),将滤膜置于冷冻干燥器中连续干燥 48h,然后利

\* 我国近海海洋综合调查与评价专项,908-ZC-I-05 号。刘涛, E-mail: salanitana@sina.com

通讯作者: 石学法, 研究员, E-mail: xfshi@fio.org.cn

收稿日期: 2012-11-29, 收修改稿日期: 2013-04-03

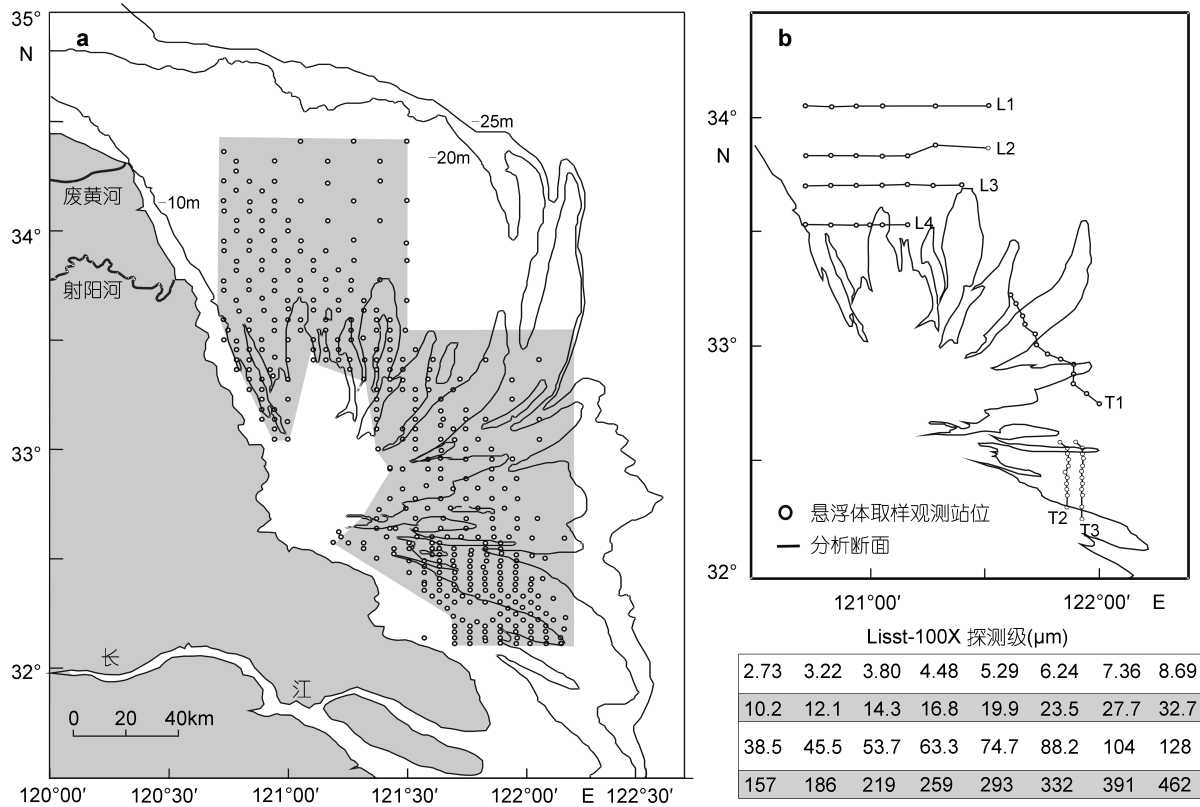


图 1 现场数据采集站位(a)及分析断面(b)分布

Fig.1 Spatial distribution of sampling sites and transects for analysis

用同一天平进行称重, 取得数据后即可计算悬浮体的质量浓度  $SSC=(W-W_0)/V$ , 其中  $W$  为干燥后的滤膜总重(单位 mg),  $W_0$  为滤膜原始重量(单位 mg),  $V$  为过滤水体积(单位 L)。

## 2 结果与分析

### 2.1 悬浮体浓度平面分布特征

**2.1.1 悬浮体质量浓度(SSC)** 如图 2 所示, 研究区底层 SSC 一般超过 50mg/L, 废黄河口外直至辐射沙脊群中心的沿岸浅水区域发育有十分明显的高浓度浑水团, 浑水团内底层 SSC 一般超过 300mg/L, 部分站位超过 400mg/L, 在沙脊群北部的深槽(如西洋)中, 底层 SSC 甚至可以超过 1000mg/L。在此浑水团外的其他区域, 底层 SSC 显著偏低, 在沙脊上覆水体中一般不超过 100mg/L, 部分甚至低于 50mg/L; 在脊间沟槽内则略高, 部分区域可超过 100mg/L, 应是潮流流速较高时较强的再悬浮作用所致。表层水中 SSC 的平面分布格局和底层基本一致, 浑水团内表层 SSC 可超过 100mg/L, 而浑水团外大片区域的表层 SSC 则介于 20—50mg/L 之间。

**2.1.2 各粒级悬浮体颗粒体积浓度** LISST-100X

型现场激光粒度仪可以探测 32 个粒级的悬沙体积浓度, 这使得我们可以分别研究各粒级沉积物的悬浮和扩散特征。本文将 32 个粒级划分为三个粒组: 细颗粒组分(粒径  $<20\mu\text{m}$ )、中等颗粒组分(粒径  $20\text{—}100\mu\text{m}$ )、以及粗颗粒组分(粒径  $>100\mu\text{m}$ )。这样划分的依据是: 该区域海底沉积物的粒径谱实际上是由 3 个“动力组分”(意即可视为具有相同的动力性质, Liu *et al.*, 2012)混合而成的, 上述三个粒组即分别对应三个“动力组分”的主要粒度区间。

图 3 展示了研究区表、底层水中各粒组悬浮颗粒的体积浓度平面分布特征: 细颗粒组分浓度的高值区(在底层水中大于  $100\mu\text{L/L}$ , 在表层水中大于  $20\mu\text{L/L}$ )与沿岸高浓度浑水团相对应, 浑水团中细颗粒组分的体积浓度一般超过  $200\mu\text{L/L}$ , 远高于研究区内的其他区域; 中等颗粒组分体积浓度的高值区分布范围较细颗粒组分要大的多, 基本上包括了浑水团分布区域和大部分沙脊; 粗颗粒组分浓度高值区则主要位于沙脊群以北的浑水区之内。细颗粒组分和中等颗粒组分浓度的平面分布显然受控于海底沉积物粒度组成: 细颗粒组分浓度高值区位于沙脊群以北的泥质区, 其海底沉积物中富含粒径小于  $20\mu\text{m}$  的组

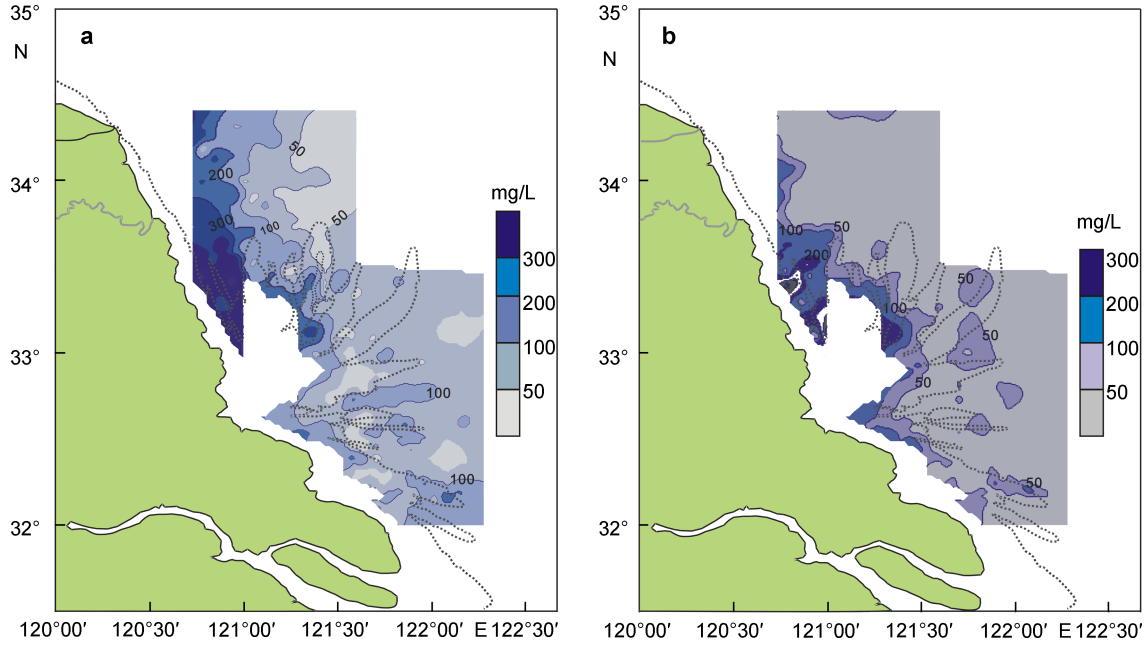


图 2 悬浮体质量浓度平面分布特征

Fig.2 SSC of bottom layer (a) and surface layer (b) in the study area  
a: 底层; b: 表层 单位: mg/L

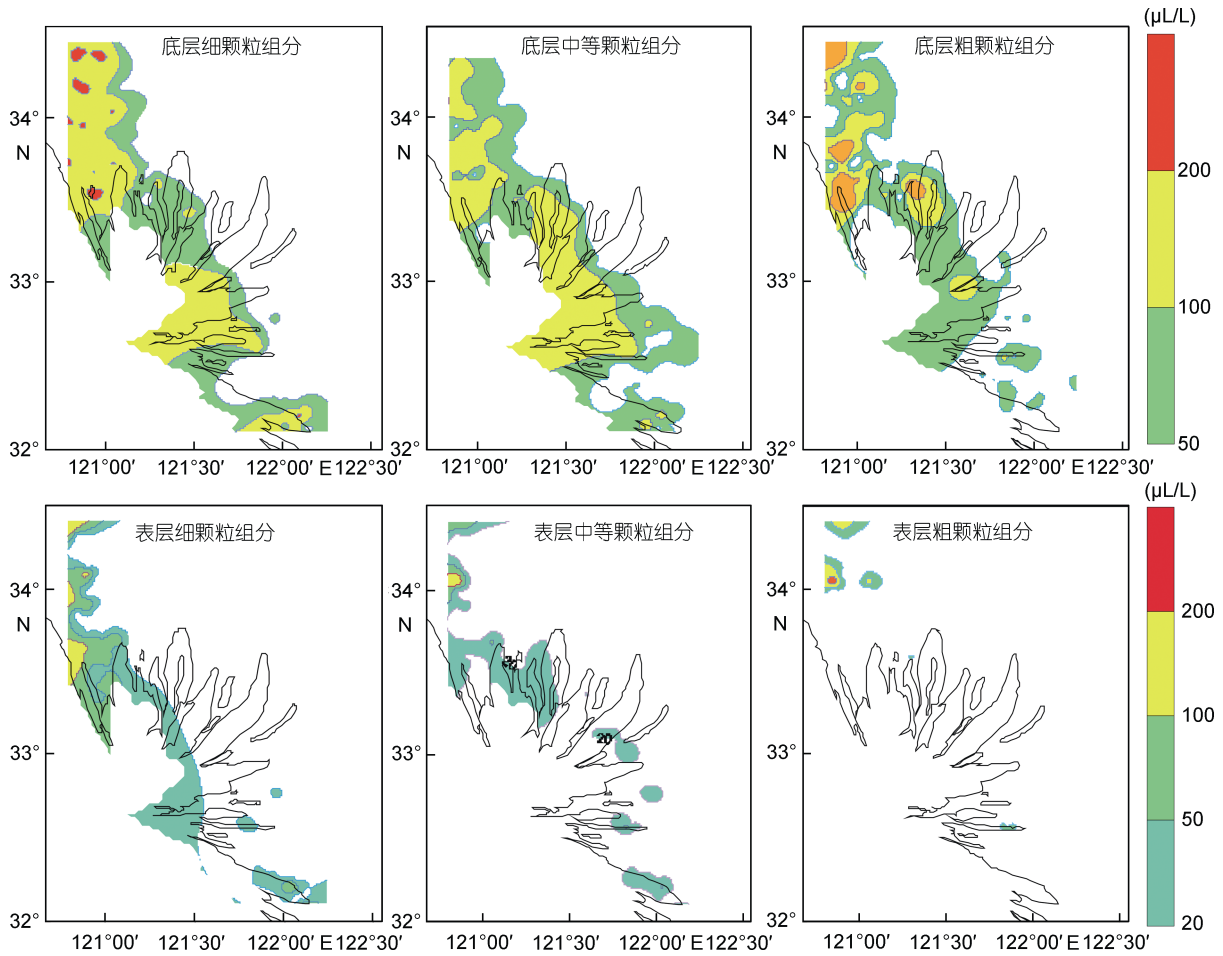


图 3 悬浮体各粒级聚类结果及体积浓度(μL/L)平面分布特征

Fig.3 Volumetric concentration of suspended particles in different sizes

分,而在沙脊区海底沉积物中这种组分的含量基本为零(图 4a)。中等颗粒组分在研究区海底沉积物中广泛分布(图 4b),这可以解释其浓度在大部分区域都达到较高水平的现象。有趣的是粒径大于  $100\mu\text{m}$  的粗颗粒组分在沙脊群北部浑水团内也大量出现,而当地海底沉积物中根本没有这种组分(图 4c),这反映了水动力强度较弱时细颗粒絮凝形成大直径团粒的现象。

细颗粒组分可以在水中长时间保持悬浮状态,因而十分易于扩散(尤其是在流速较高的表层水中),但是在研究区内,辐射沙脊群以北浑水团中浓度极高的细颗粒悬浮体却没有越过沙脊群中心区域继续向南扩散,这一现象在表层水细颗粒浓度平面中表现的尤其明显:  $15\mu\text{L/L}$  的浓度等值线被限制在辐射沙脊群中心区域。由此推断,辐射沙脊群中心部位的浅水区显然起到了限制北部高浓度悬沙向南扩散的作用。

## 2.2 细颗粒组分浓度断面特征

鉴于细颗粒组分可以在水体中长时间保持悬浮状态,因而可以将其作为指示悬浮体扩散的有效示踪物。为了进一步认识研究区悬浮体的来源和扩散特征,本文根据研究区海底地貌和悬沙浓度分布特征,分析了一系列断面中细颗粒组分的浓度特征,并对一些典型站位的悬浮体和海底沉积物的粒径谱进行了对比,以便分析其来源。

### 2.2.1 沙脊群以北断面

断面 L1—L4 呈东西走向,横切辐射沙脊群与废黄河口之间的浑水团。如图 4 所示,在浑水团中,细颗粒组分体积浓度一般大于  $100\mu\text{L/L}$  且上下混合十分均匀。值得注意的现象是,在浑水团边缘,细颗粒组分浓度在较短距离内迅速

减少至  $20\mu\text{L/L}$  以下,沿岸浑水团中的泥沙向外海扩散似乎受到了某种因素的限制作用。浑水团向南延伸直至沙脊群北部脊槽处,其表层水中的细颗粒组分浓度高于底层水,说明涨潮时表层水可由北部泥质区输送来大量的细颗粒沉积物。综合分析 L1—L4 断面中各站的细颗粒组分浓度剖面、悬浮体粒径谱和海底沉积物粒径谱特征,可以将这些站位分为两种情形:第一种情形以 S1 站和 S3 站为代表,这两站悬浮体浓度高、混合作用强烈,悬浮体粒径谱粗峰与海底沉积物主峰相一致,显示了强烈的本地再悬浮作用(图 5)。另一种情形则以 S2 站为代表,该站细颗粒悬浮体浓度剖面层化明显,且悬浮体粗峰要粗于海底沉积物的粗峰,甚至出现超出该区海底沉积物粒径范围的情况,这反映了涨急或落急之后流速减弱阶段悬浮颗粒沉降时(导致浓度剖面分层明显)细颗粒悬浮体大量絮凝(形成悬浮体粒径谱中的粗峰)的情形。

### 2.2.2 浑水团以外横切脊、槽的断面

断面 T1、T2 和 T3 横切沙脊群中部和南部的的主要脊槽,这些断面中细颗粒组分的体积浓度都远低于浑水区。在底层水中一般不超过  $80\mu\text{L/L}$ ,在中、表层水中一般低于  $20\mu\text{L/L}$ 。值得注意的是,沙脊上覆水体中细颗粒组分的浓度一般有高于临近沟槽的趋势(图 5)。分析 T1 和 T2 断面中典型站位的悬浮体粒径谱可以发现,在沙脊上覆水体中,悬浮体粒径谱的众数区间与海底沉积物粒径谱的众数区间相差很大(图 5)。而在沟槽中悬浮体粒径谱数区间与海底沉积物有较多重合部分,只是主峰位置更加偏细(如 S6 站和 S10 站),这反映了沟槽底部的沉积物可以在潮流过程中部分再悬浮进

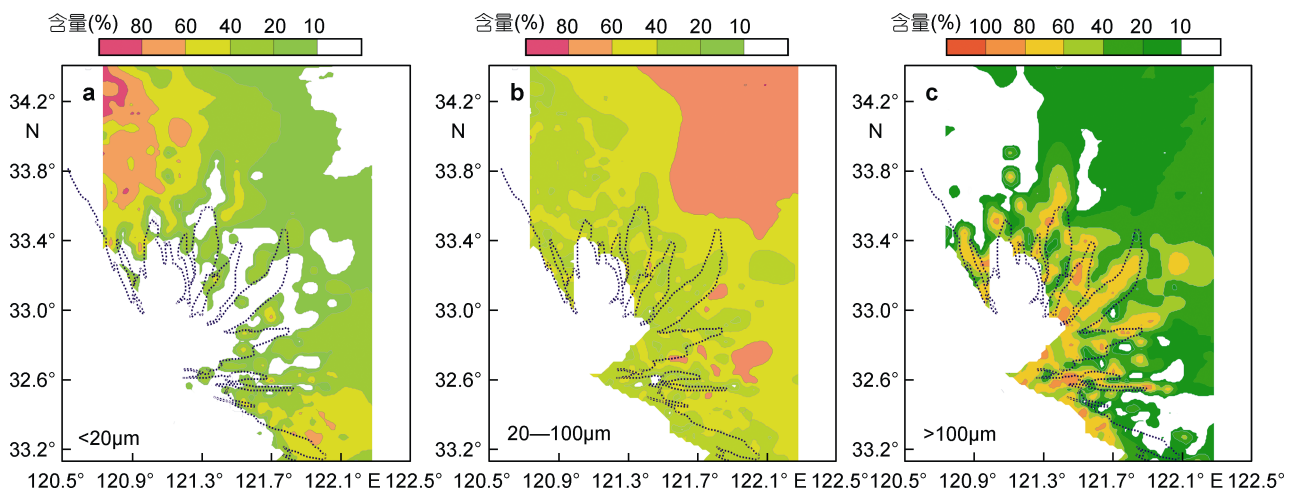


图 4 研究区海底沉积物中各粒径组分含量

Fig.4 Concentration of different size groups of sediments

a: 细颗粒组分; b: 中等颗粒组分; c: 粗颗粒组分

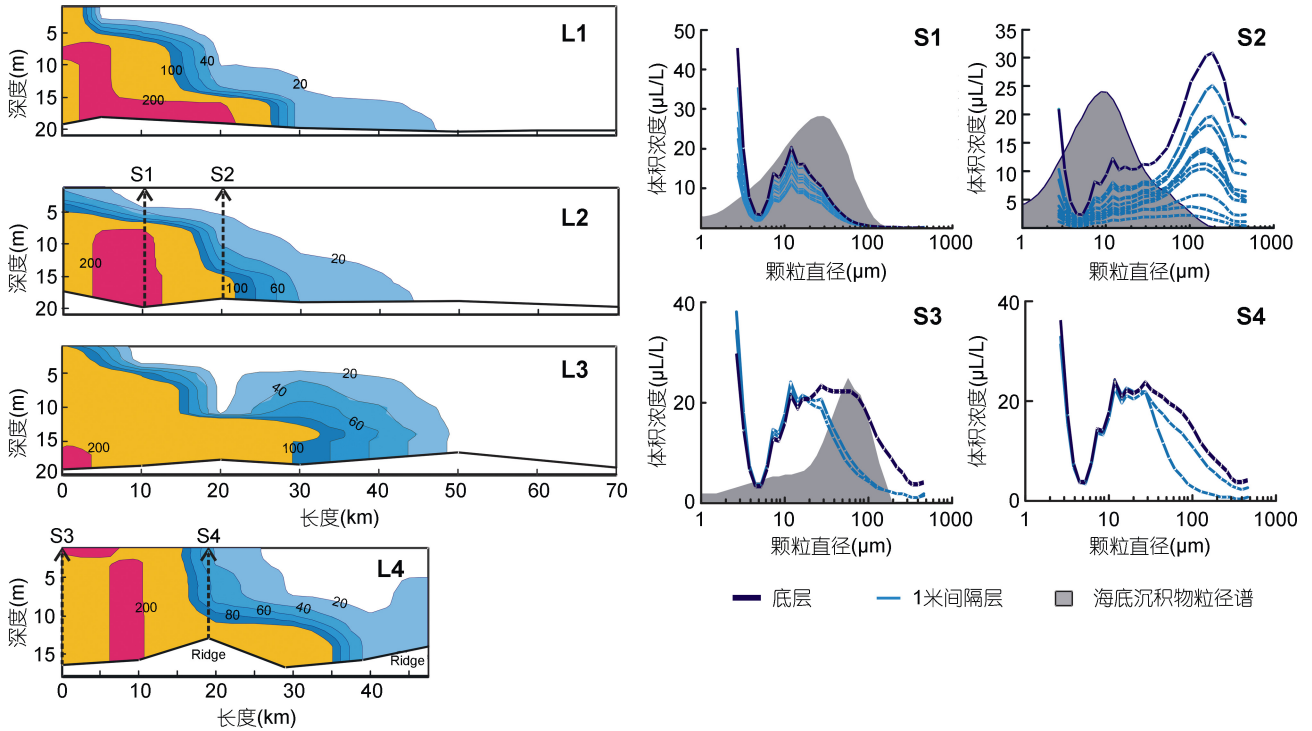


图5 断面 L1—L4 细颗粒组分体积浓度剖面及典型站位悬沙粒径谱

Fig.5 Fine-grained particle volumetric concentration along transects L1—L4 and the spectra of grain size distribution of suspended particles

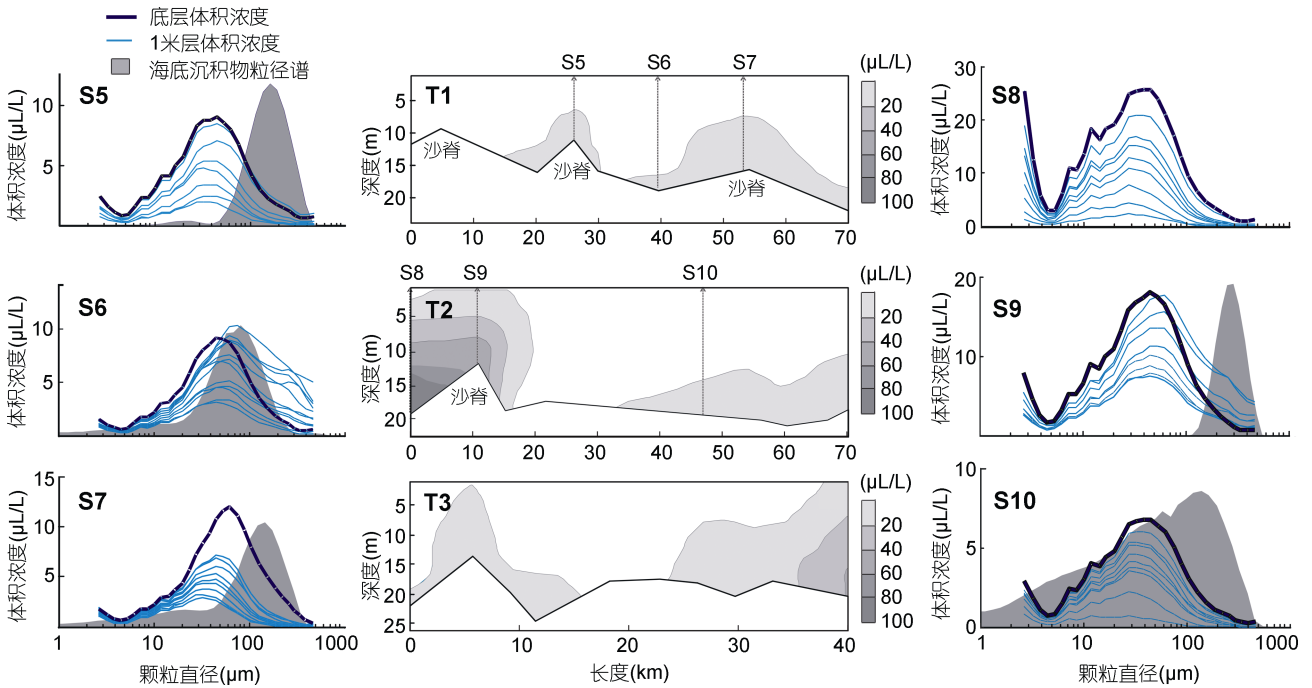


图6 断面 T1—T3 细颗粒组分体积浓度剖面及典型站位悬沙粒径谱

Fig.6 Fine-grained particle volumetric concentration along transects T1—T3 and the spectra of grain size distribution of suspended particles

入水体。沙脊上水体中悬浮体粒径谱的形状和主峰位置几乎与临近沟槽中的完全相同，这说明沙脊上覆水体中的悬浮体并非来自于沙脊表层沉积物，而是来自于临近沟槽水体中悬浮体的水平扩散作用。

### 3 讨论

#### 3.1 辐射沙脊群与废黄河口之间的泥沙扩散特征

如前所述，调查期间在废黄河口至辐射沙脊群

中心区域发育有沿岸线伸展的条带状高浓度浑水团, 浑水团中的悬浮体主要来自沙脊群以北泥质区。以细颗粒悬浮体(粒径 $<20\mu\text{m}$ )作为泥沙输运扩散的示踪物, 其浓度平面分布表明, 辐射沙脊群以北泥沙向南输运的趋势被辐射沙脊群中心区域的浅滩所阻挡, 难以进入辐射沙脊群东南部海域。而细颗粒组分浓度在浑水团边缘迅速降低, 显示其向外海“洁净”水体中的扩散量有限, 说明近岸高浓度泥沙在离岸方向上的扩散受到了限制。在海洋环境中, 悬浮体正常扩散受阻通常是由于水团物理性质突变造成的, 这种突变既可能是密度的差异, 如高温高盐的黑潮水对长江泥沙向深海扩散的阻隔作用(郭志刚等, 2002); 也可能是动力性质的差异, 如黄河口外潮流切变峰对黄河泥沙向渤海深水区扩散的阻隔作用(Li *et al.*, 2001; Wang *et al.*, 2007)。本文研究区域内没有大型河流入海, 且水深很浅( $<20\text{m}$ ), 潮流作用很强, 混合作用强烈导致水体温盐结构均一, 因而可以排除海水密度差异成因, 潮周期内沿岸水与外海水之间的动力性质差异才是关键因素。已有的数值模拟结果和现场观测数据表明, 在废黄河口以南的浅水区, 潮周期内沿岸水以顺岸往复流为主, 流速高、流向集中, 基本没有垂直于岸线方向的流速矢量。而随着外海水深迅速增加, 潮流流速降低且旋转流性质加强(诸裕良等, 1998; 周良勇等, 2009; Xing *et al.*, 2012), 导致近岸悬沙缺乏向外海扩散的动力, 只能顺岸输送, 从而造成沙脊群以北的浑水团呈带状沿岸分布。

综合本研究的现场调查结果和前人的一些遥感和数值模拟结果(宋召军等, 2006; Xing *et al.*, 2012)可知, 单纯潮流作用下, 在沙脊群以北形成高浓度沿岸浑水团是研究区悬沙浓度空间分布的一个典型特征。但是较强的波浪作用可以改变这一模式, 较强的风浪可以使得研究区大片浅水区域的悬沙浓度剧增, 这一趋势在盛行偏北大风的冬季尤其明显。

### 3.2 沙脊与沟槽之间的泥沙扩散特征

在浑水团之外的海域, 由于辐射沙脊群中心浅滩的淤高使得其北部浅水区的高浓度悬沙更加难以输送至沙脊群的东部和南部, 水体中悬浮体浓度显著偏低。在以潮流作用为主的正常水动力情况下, 沙脊表面较粗砂质沉积物再悬浮作用十分微弱, 沙脊上覆水体中的悬浮体主要来自于临近沟槽的水平扩散, 细颗粒泥沙浓度总有高于临近沟槽的趋势, 这可能缘自于沟槽中的横向环流效应(刘振夏等, 2004)。横向环流产生自潮流过程中因脊槽水深变化而导致

的横向流速差和水位差, 其流向在上层水体中指向沟槽, 在下层水体中指向沙脊, 因而有利于沟槽底部悬浮体向沙脊顶部输送。但是从研究区沙脊沉积物的粒径谱来看, 这些被横向环流输送的悬浮颗粒很难在沙脊顶部沉积下来(可能由于沙脊顶部波浪扰动较强), 因而对沙脊的维持发育贡献甚微, 沙脊的发育和维持可能主要靠推移质向其顶部输送(以沙波、沙纹等形式)。

### 3.3 辐射沙脊群以北泥质区的成因

自 1855 年黄河北归之后, 辐射沙脊群以北海底因主要泥沙来源断绝而遭受侵蚀, 导致废黄河口外的大沙、五条沙等沙体消失, 海底等深线迅速后退(张忍顺等, 2002; 刘振夏等, 2004), 按照常理, 侵蚀应导致海底沉积物粗化, 但是在废黄河口和沙脊群之间遭受侵蚀的海底却出现了泥质区。本文细颗粒悬浮体浓度的空间分布特征可以对此作出解释: 在废黄河口与沙脊群之间, 近岸高浓度泥沙缺少向外海扩散的动力, 只能在潮汐过程中顺岸往复运动, 这种往复运动对侵蚀区沉积物起到了分选的作用, 较粗颗粒组分可以在水动力较强的沙脊群浅水区沉积下来, 较细的颗粒组分则更趋向于沉积在沙脊群以北水动力相对较弱的区域, 长此以往就在沙脊群和废黄河三角洲之间的近岸形成了泥质区(图 7)。

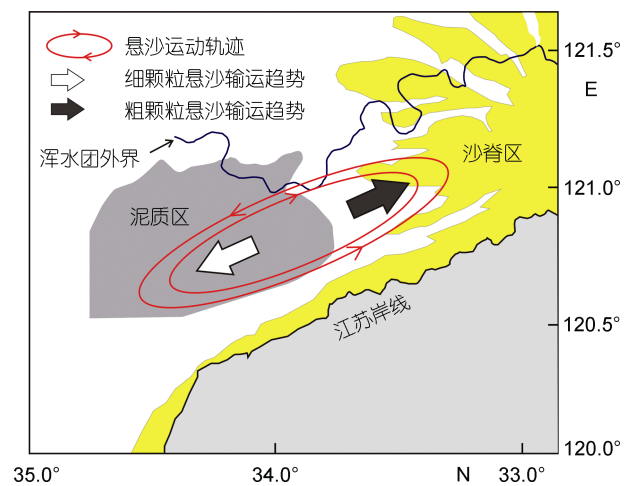


图 7 沙脊群以北泥质区成因示意图

Fig.7 The forming mechanism of a mud patch north to the sand ridges  
浑水团及泥质区仅标出研究区内部分

## 4 结论

(1) 在潮流作用下, 在辐射沙脊群以北, 泥质区细颗粒沉积物可以被潮流大量悬浮进入水体, 但是

由于潮汐过程中近岸水和远岸水动力性质的差异,近岸悬沙在离岸方向上的扩散受到限制,向南又被辐射沙脊群中心浅滩所阻挡,倾向于在沙脊群与废黄河口之间形成沿岸分布的高浓度浑水团。

(2) 辐射沙脊群以北的顺岸往复潮流对海底沉积物有分选作用,倾向于把海底沉积物中的粗颗粒分选搬运至沙脊群,把细颗粒沉积物向北输送,从而在沙脊群以北形成泥质区。

(3) 在调查期间的正常海况下(潮流作用为主),沙脊表层沉积物再悬浮作用十分微弱,沙脊上覆水体中的悬沙主要来自于临近沟槽海底沉积物的水平扩散作用。

### 参 考 文 献

- 邢飞,汪亚平,高建华等,2010.江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征.海洋与湖沼,41(3):459—468
- 刘振夏,夏东兴,2004.中国近海潮流沉积沙体.北京:海洋出版社,90—92
- 吴德安,张忍顺,2007.江苏辐射沙洲陈家坞槽悬沙变化过程及垂线分布资料分析.泥沙研究,4(2):42—48
- 宋召军,黄海军,杜延芹等,2006.南黄海辐射沙洲附近海域悬浮体的研究.海洋地质与第四纪地质,26(6):19—26
- 张忍顺,陆丽云,王艳红,2002.江苏海岸侵蚀过程及其趋势.地理研究,21(4):469—478
- 周良勇,陈斌,2009.江苏废黄河口外夏季悬浮泥沙运动.海洋地质与第四纪地质,29(6):17—24
- 秦蕴珊,李凡,徐善民等,1989.南黄海海水中悬浮体的研究.海洋与湖沼,20(2):101—111
- 郭志刚,杨作升,张东奇等,2002.冬、夏季东海北部悬浮体分布及海流对悬浮体运输的阻隔作用.海洋学报,24(5):71—79
- 诸裕良,严以新,薛鸿超,1998.黄海辐射沙洲形成发育水动力机制研究—I.潮流运动平面特征.中国科学(D辑),28(5):403—410
- 虞志英,张国安,金镠等,2002.波流共同作用下废黄河口水下三角洲地形演变预测模式.海洋与湖沼,33(6):583—590
- Xing F, Wang Y P, Wang H V, 2012. Tidal hydrodynamics and fine-grained sediment transport on the radial sand ridge System in the southern Yellow Sea. Marine Geology, 291—294(1): 192—210
- Li G, Tang Z, Yue S *et al*, 2001. Sedimentation in the shear front off the Yellow River mouth. Continental Shelf Research, 21(6—7): 607—625
- Milliman J D, Li F, Zhao Y Y *et al*, 1986. Suspended matter regime in the Yellow Sea. Progress in Oceanography, 17(3—4): 215—227
- Wang H, Yang Z, Li Y *et al*, 2007. Dispersal pattern of suspended sediment in the shear frontal zone off the Huanghe (Yellow River) mouth. Continental Shelf Research, 27(6): 854—871
- Liu T, Shi X F, Li C X *et al*, 2012. The reverse sediment transport trend between abandoned yellow river delta and radial sand ridges in Jiangsu coastline of China—An evidence from grain size analysis. Acta Oceanologica Sinica, 31(6): 83—91

## DIFFUSION OF SEDIMENT IN RADIAL SAND RIDGES IN SOUTHERN YELLOW SEA

LIU Tao<sup>1</sup>, SHI Xue-Fa<sup>2</sup>, LIU Yan-Guang<sup>2</sup>, LIU Sheng-Fa<sup>2</sup>, WANG Kun-Shan<sup>2</sup>

(1. Guangxi Mangrove Research Center, Guangxi Key Lab of Mangrove Observation and Utilization, Beihai 266071, China; 2. Key Lab of Marine Resources and Environmental Geology, State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

**Abstract** Using large amount of in-situ data of the grain size and concentration of suspended particles in the radial sand ridges of Southern Yellow Sea, the sediment resuspension and diffusion were studied. In total, 411 sites were deployed and sample collected in May to June, 2008 during which local maritime weather was normal. An LISST-100X in-situ laser particle size analyzer (SEQUOIA, USA) was used to profile suspended particle-size distribution in water column; the instrument could cover size ranges 2.73—462 $\mu$ m in 32 grades. Results show that between the radial sand ridges and the abandoned Yellow River delta, suspended sediments were restricted within shallow water and could be transported only along coast by rectilinear tidal current. In addition, rectilinear tidal current in the northern radial sand ridges played a role in sorting sediment, which trended to transport coarse particles onto the sand ridges and fine particles northward (seaward). Moreover, in the area outside local turbid plume, surface sediment on sand ridges was too coarse to be resuspended by normal tidal current. Therefore, the suspend matters in water column above these sand ridges were mainly come from adjacent channels by horizontal movement.

**Key words** South Yellow Sea; radial sand ridges; suspended sediment