

# 东海不同底质类型海域春季 悬浮体通量及影响因素\*

雷坤 杨作升 郭志刚 白虹<sup>†</sup>

(青岛海洋大学海洋地球科学学院 青岛 266003)

<sup>†</sup>(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

**摘要** 利用1994年4月在东海陆架不同底质类型海域即泥质区和砂质区的水文和泥沙观测资料,分析和计算了两个站的悬浮体含量的分布、余流分布和悬浮体通量,以代表两个局部海域悬浮体含量分布和输送的特征。结果表明,在底质类型、生物活动、水动力环境和悬浮体物源各因素的影响下,两个海域的悬浮体通量和悬浮体含量垂直分布各有其特征,是东海悬浮体输送和垂直分布的两种典型类型。111站周围海域的悬浮体通量较大,上、中层水体(0—40m)中的悬浮体向东南方向输送,下层和底层的悬浮体向东北方向输送,且下层和底层的通量大于中上层;砂质区的悬浮体通量相对较小,且从表层到底层均向东北方向运移。

**关键词** 悬浮体,通量,东海,底质

**中图分类号** P736.21

关于东海悬浮体的输送,已经有不少研究(Milliman *et al.*, 1985; Sternberg *et al.*, 1985; 秦蕴珊等, 1989; 杨作升等, 1992a、b; Yanagi *et al.*, 1995; 李凡等, 1996; 郭志刚等, 1997),但有关其通量的研究却较少。80年代初有中美合作期间的研究成果(Yang *et al.*, 1983; Xu *et al.*, 1983),90年代有由沉积物捕集器得到的垂直通量(詹滨秋等, 1993; Zhan, 1994, 1999)和采用数值模拟方法得到的悬浮沉积物输送通量(Peng *et al.*, 1999)。

悬浮体通量给出了海水中颗粒态物质输送的定量结果,它是了解海洋通量、评估碳和其它生源要素在海洋中循环的科学依据。1994年4月,“科学一号”考察船在陆架泥质区和砂质区进行了水文和悬浮体的同步调查,并在其中两个站进行了连续观测。本文利用这次观测结果,计算了两站的悬浮体通量,分析了影响悬浮体通量的各种因素,以期认识这两个站所代表的局部海域的悬浮体输送,深入了解东海陆架物质输送和交换过程。

## 1 研究方法

研究海域为东海陆架远端泥质区和中陆架砂质区(28°—31°N),111站和410站是分别位于泥质区和砂质区的两个连续观测站(图1)。111站位于126°E,32°N,410站位于124°59.58'E,29°19.2'N。111站的观测时间为1994年4月26日18:00—28日18:00共50h;410站的观测时间为1994年4月19日3:00—20日3:00共25h。

\* 国家自然科学基金重点资助项目,49136140、49676289号。雷坤,女,出生于1973年12月,博士生, E-mail: leikun@mail.ouqd.edu.cn

收稿日期: 1999-11-05; 收修改稿日期: 2000-09-12

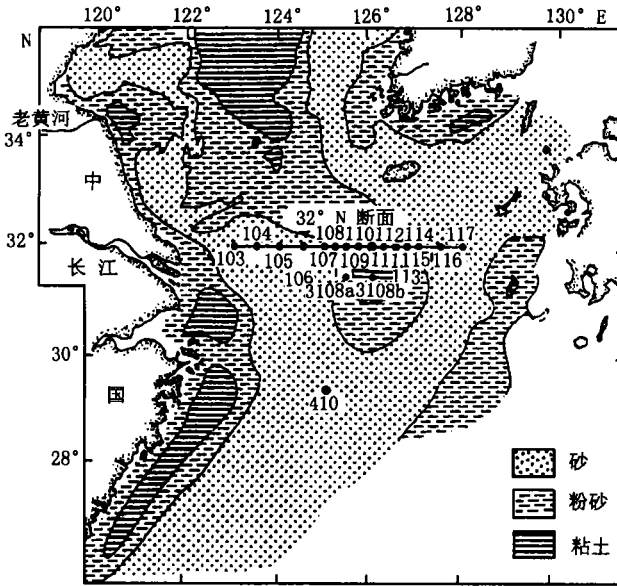


图 1 研究海域和站位(底质分布图据 Satio et al., 1994)

Fig. 1 Study area and station locations (Distribution of surface sediment is from Satio et al., 1994)

1.1 野外观测

1.1.1 悬浮体含量观测 悬浮体样品用 2500ml 的塑料采水器分层采取,表层采样用塑料水桶。取样后直接在船上用抽滤法抽滤水样。采用直径为 47mm、孔径小于等于 0.45μm 的微孔滤膜,分为上下两片,事先在十万分之一的天平上称重,抽滤并低温干燥后在同一天平上称重,并用下面的空白滤膜进行校正,最后经计算得到悬浮体含量。

1.1.2 水文观测 采用声学 Doppler 剖面海流计进行海流观测;采用 SBE911 型 CTD 仪进行温度、盐度、密度和深度的观测。

1.1.3 底质样品的采集 由蚌式挖泥斗取得。

1.2 粒度分析

对底质样品进行了粒度分析,粒径间隔为 1φ。粒径大于 0.063mm 的采用筛析法,小于 0.063mm 的采用沉降法。

1.3 悬浮体通量的计算方法

悬浮体输送通量是指单位时间通过单位宽度为 1m,高度为水深的垂直断面的颗粒态悬浮物质(包括生物和非生物物质)的质量,其大小可表示为:

$$Q = \int_a^h u \cdot cdz$$

其中 Q 为悬浮体输送通量, h 为水深, a 为海底临界层厚度, u 为流速大小, c 为悬浮体含量。上式可离散为:

$$Q \approx \sum_k u_k \cdot c_k \cdot \Delta h_k$$

其中  $u_k$ 、 $c_k$ 、 $\Delta h_k$  为单宽断面上各水层的平均流速大小、悬浮体含量和层厚, k 为水层的序

号。据上式,可得到各水层及整个单宽断面上的悬浮体通量。悬浮体的输送方向即余流的方向。

## 2 研究结果

### 2.1 泥质区

**2.1.1 余流垂直分布特征** 在 111 站,上层水体(0—20m)的余流较大,可达 4—6cm/s(图 2);而中下层相对较小,一般小于 5cm/s,其中 30—45m 间的余流最小,在 0—2cm/s 间,最小不足 1cm/s;65m 以下的余流也较小,在 1—2cm/s 间。从图 2 中还可看出,20m 以上的余流方向指向东,20—40m 间的余流指向东南,但方位角不超过 150°,40m 以下的余流一致指向东北方向。可见 111 站不同深度处的余流方向不同。

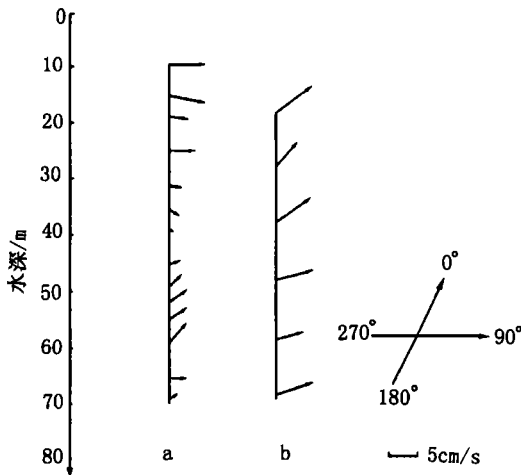


图 2 1994 年 4 月 111 站(a)和 410 站(b)余流(cm/s)的垂直分布

Fig. 2 Vertical distribution of residuals (cm/s) at station 111 (a) and station 410(b) in April, 1994

### 2.1.2 悬浮体含量垂直分布特征

自表层至 40m,111 站的悬浮体含量基本上保持恒定,为 1—2mg/L。在 40m 处发生跃变,随水深线性增加,到底层可达上层的十几倍(图 3)。在位于 111 站西、西南和南方的 109 站(125° 29.94' E, 32° 1.2' N)、3108a 站(125° 39.91' E, 31° 29.98' N)和 3108b 站(125° 59.99' E, 31° 29.56' N),悬浮体含量从 20m 处开始随水深急剧增大。在 111 站东侧的 113 站(126° 29.77' E, 32° 0.2' N),悬浮体含量在 50m 以下随水深而不断增大。可见在泥质区,从表层到一定深度处的水体内的悬浮体含量保持垂直均匀分布,在该深度以下,悬浮体含量则随深度的增大而增大,但悬浮体含量开始增加的深度从西至东有逐渐增大的趋势。

**2.1.3 悬浮体输送通量** 在 111 站处,40m 以上的悬浮体通量较小,为 2.31g/s,方向为东或东北;40m 以下的通量明显增大,40m 至海底的通量为 8.094g/s,方向为东南。

### 2.2 砂质区

**2.2.1 余流垂直分布特征** 410 站从表层到底层余流大小变化较小,均在 5—7.5cm/s 间,表层余流略大于中下层(图 2)。余流方向一致,均指向东北方向。

**2.2.2 悬浮体含量垂直分布特征** 410 站上层水体的悬浮体含量较高,大于 3mg/L,而中层和下层较低且基本上保持恒定,约为 1—2mg/L,到近底层又稍有增加(图 3)。

**2.2.3 悬浮体输送通量** 从海面至海底,410 站处的悬浮体输送总通量为 7.9g/s,方向为东北。

### 2.3 影响悬浮体输送通量的因素

**2.3.1 底质类型** 泥质区的底质为粉砂质粘土,砂质区的底质为分选良好的细砂,粒径集中在 2—3 $\phi$  间(图 4)。据 Miller 等(1977)的公式:

$$U_{100(CR)} = 122.6d^{0.29}$$

其中  $U_{100(CR)}$  是距底 100cm 处的临界起动流速,  $d$  是底质的中值粒径。泥质区和砂质区底质的临界起动流速分别为 14.2cm/s 和 37.0cm/s。因此在潮流的作用下泥质区的底质较砂质区更易发生再悬浮,从而增大近底悬浮体含量。而随着悬浮体含量的增加,海水的密度和粘滞性系数也会相应增大,增强对海底的侵蚀,进一步增大近底悬浮体含量和输送通量。可见泥质区底质对悬浮体通量的贡献高于砂质区。底质类型的差异也是造成泥质区下层悬浮体含量高、砂质区与中上层水体无明显差别(图 3)的原因之一。

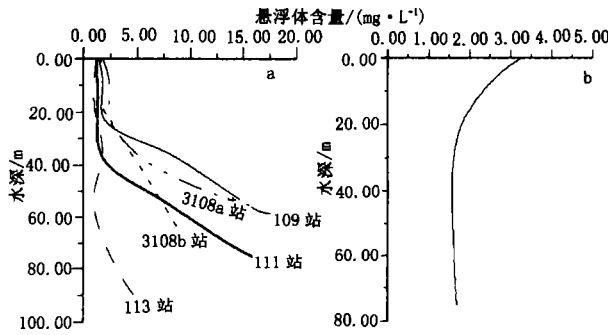


图 3 1994 年 4 月 111 站(a)和 410 站(b)悬浮体含量/(mg·L<sup>-1</sup>)的垂直分布

Fig.3 Vertical distribution of TSM/(mg·L<sup>-1</sup>) at station 111(a) and station 410(b) in April, 1994

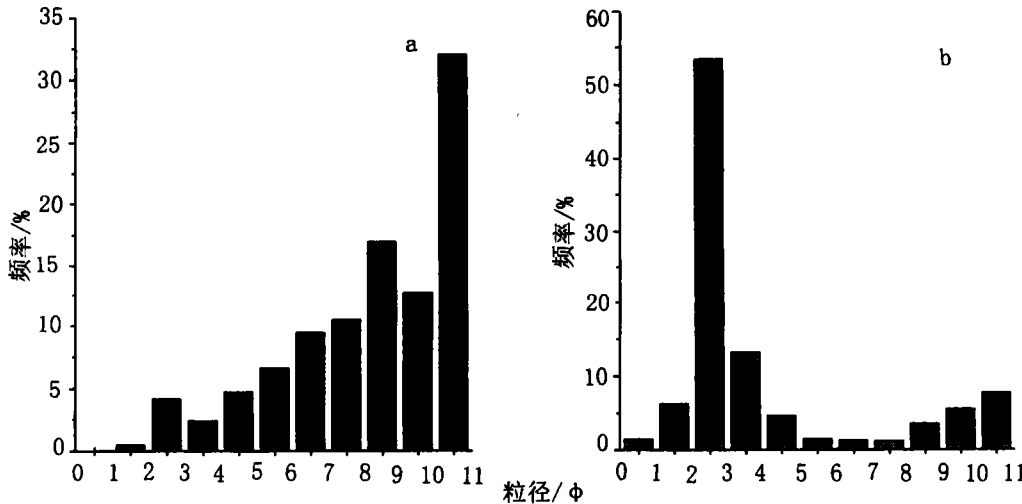


图 4 111 站(a)和 410 站(b)底质的粒径频率

Fig.4 Grain size distribution of surface sediment at station 111(a) and station 410(b)

**2.3.2 生物活动** 砂质区上层水体的悬浮体含量高于中下层(图 3),与通常的悬浮体含量下层高于上层的规律相反,这主要是生物作用影响的结果。在春季,东海中部海水温度高于北部,引起上层水体中浮游生物大量繁殖(Wu *et al*, 1999),使上层水体中生物含量明显高于中下层,形成了悬浮体含量上层高,中下层基本上保持恒定的分布格局(图 3)。对悬浮体样品的扫描电镜观察也证实了这一结果。由于砂质区的余流在铅直方向上变化不大(图 2),故上层水体的悬浮体通量高于其下伏水体。

**2.3.3 水动力环境** 春季 111 站周围海域的水文和动力条件较复杂,所以仅以 111 站代表局部海域(125°45′—126°15′E, 31°45′—32°15′N)内水动力及悬浮体的输送。为认识

该局部海域的动力环境,故对东北部的水体结构稍作分析。以 32°N 断面为例,水体可分为 3 类:沿岸水、黑潮水、和两者间的过渡带。125°30'E 以西的水体可大致归为沿岸水。黑潮水占据了断面的东端(127°E 以东)。125°45'—127°E(110—115 站)处于沿岸水与黑

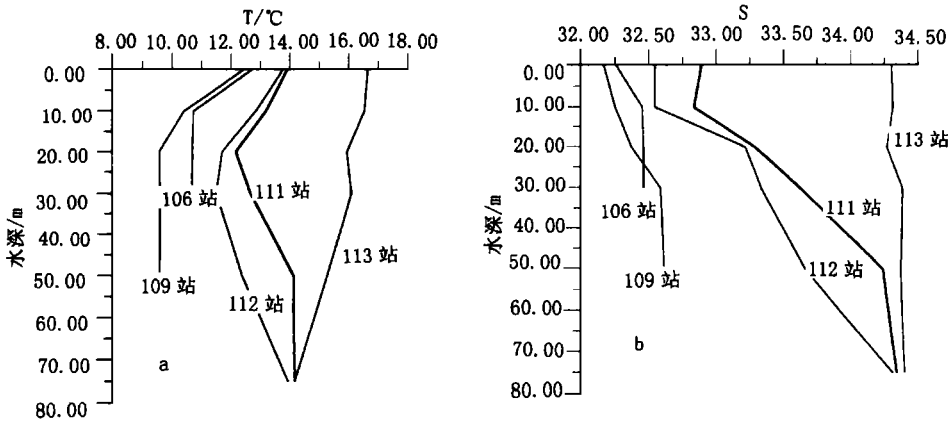


图 5 泥质区内各站的温度(°C)(a)和盐度(b)的垂直分布

Fig. 5 Vertical distribution of temperature/°C (a) and salinity (b) at stations in the mud area

潮水间的过渡带内。各站都在 10—30m 形成温盐跃层(图 5),且有温盐逆转的现象。跃层以上为低温低盐水,跃层以下为相对高温高盐水,温盐都随深度的增加而增大。值得注意的是,111 站和 112 站跃层上下水体的性质似乎相差较大。对各站温度( $T$ ),盐度( $S$ )和同步观测的溶解氧(DO)作统计(表 1),发现上层上水体的性质与其东侧的 113、114 和

表 1 111 站周围海域平均温度( $T$ ),盐度( $S$ )和溶解氧(DO)

Tab. 1 Averaged temperature ( $T$ ), salinity ( $S$ ) and dissolved oxygen (DO) around station 111

站位和层位	$T$ (°C)	$S$	DO(ml·L <sup>-1</sup> )
111 和 112 站上层水体 (10m—30m)	11.5—13.2	<33.3	6.315
111 和 112 站下层水体 (>40m)	12.4—14.2	>34.2	5.655
126°15'E 以东各站 (113—115 站)	9.6—12.4	32.0—32.9	5.545
126°00'E 以西各站 (108—110 站)	14.2—16.5	>34.2	6.382

115 站相差较大,而更接近西侧 106—109 各站,下层水体的性质与其东侧水体较一致。据此本文认为在 1994 年 4 月,126°—126°15'E(111 和 112 站)处的上层水体主要由黄海沿岸水变性和东海北部冷水增温而来,在水团上应属黄海表层水(Y),111 站下层水体属于东海次表层水(EU)(李凤歧等,1989a)。这一结果与余流方向也是相吻合的(图 2)。由此可见,111 站周围海域上层水体中的悬浮体是在已发生变性的黄海沿岸水的携带下,向东南方向运移;40m 以下的水体将悬浮物质向东北方向输送。

砂质区的水体结构较简单,故以 410 站代表中陆架砂质区。据李凤歧等(1989a)中的温盐和溶解氧指针,砂质区的上层水体属于东海表层水(E),下层水体属于东海次表层水(EU)。EU 和 E 是外海水的变性水,系黑潮水、台湾暖流和黄海暖流进入东海陆架后的混合变性水(李凤歧等,1989b)。在此处,砂质区的水体是由台湾暖流而来,原因是,台湾暖流具有内侧和外侧两个分支,外侧分支在浙南外海分离出来,向东北方向流动并归入坡折带(苏纪兰等,1989)。而砂质区的余流方向为东北向,与变性的台湾暖流水外侧分支的运动一致。所以,410 站及其附近海域的悬浮体在变性的台湾暖流水的携带下,向东北方向运移。

**2.3.4 悬浮体物源** 在泥质区除了有生源的浮游生物及其残骸、分泌物、排泄物等外,还有稳定的陆源物质供应,即黄海沿岸流源源不断地将近岸的陆源物质输送到东海北部(Milliman *et al.*, 1985)。输送来的悬浮物质在 32°N 断面上形成以 124°30'E(106 站)为中心的高悬浮体含量区(图 6)。可以看出,悬浮体含量自 124°30'E(106 站)向东逐渐降低,而其东侧又没有其它的陆源物质补充,故泥质区特别是上层水体中的陆源悬浮体应来自西侧水体中悬浮体的侧向混合扩散。此外,本海区存在一个气旋型涡旋,主要由向西南方向流动的黄海沿岸流和偏北向流动的黄海暖流构成(胡敦欣等,1980;赵保仁,1985)。

由 2.3.3 知,111 站附近海域的下层水体已受到黄海暖流(东海次表层水)的影响,亦即已受到涡旋东侧北向流的影响。因此,111 站附近海域下层水体的高悬浮体含量除是侧向扩散外的结果外,可能还有涡旋水平输送的贡献。也就是说,泥质区下层水体同时接受到由侧向混合扩散和涡旋平流输送而来的悬浮体,在主要受黑潮水影响的水体下层出现较高的悬浮体含量和输送通量。

对于砂质区,在扫描电子显微镜下观察该区的悬浮体样品,发现悬浮物质主要为比重较小的浮游生物及其残骸、分泌物和排泄物等,陆源碎屑物质较少,故砂质区悬浮体含量较小,且在水深 20m 以下基本上呈垂直均匀分布,到近底层悬浮体含量又有所增加,这可能是悬浮体在重力作用下沉降和底质中的细粒物质再悬浮的结果。

### 3 结语

泥质区和砂质区是东海的两个典型海域。在春季,两个海域的悬浮体含量垂直分布和悬浮体输送通量有很大差异,代表着两种典型类型。在泥质区 111 站周围海域,悬浮体输送通量较大,且上层水体(0—40m)中的悬浮体向东南方向输送,下层水体中的悬浮体向东北方向输送。砂质区的悬浮体通量小于泥质区,从表层到底层均向东北方向输送。

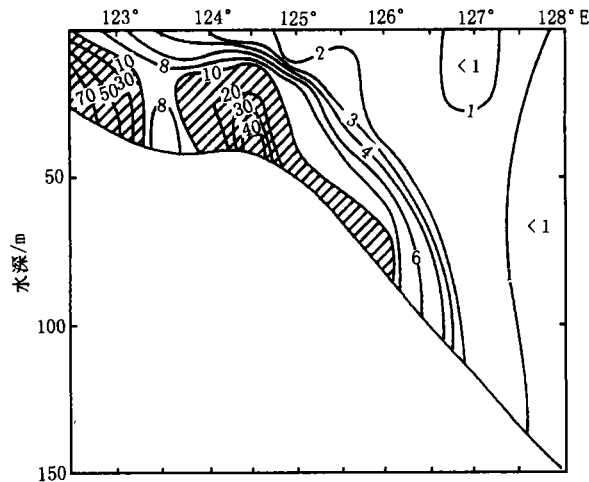


图 6 1994 年 4 月 32°N 断面悬浮体含量/( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ )分布  
Fig. 6 Distribution of TSM ( $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ) along 32°N section in April, 1994

这种差异是由4种影响因素在两区的不同效应引起的。这4种因素分别是,底质类型、生物活动、动力环境和物源。

本文主要阐述了平静海况下的悬浮体输送通量。在风暴海况下,两区的悬浮体输送通量和悬浮体含量分布可能会有很大不同。在111站附近海域,多股海流交汇,动力条件复杂,所以本文仅以111站代表其周围的小范围海域。关于泥质区的悬浮体输送及其对整个东海陆架输送的贡献,有待于进一步讨论。

### 参 考 文 献

- 申顺喜,陈丽蓉,袁 巍,1996. 南黄海中部的低能沉积环境. 海洋与湖沼,27(5):518—522
- 李 凡,丁宗信,1996. 南黄海海水中悬浮体垂向分布类型及跃层. 海洋科学集刊,37:33—41
- 李凤歧,王凤钦,苏育嵩等,1989a. 黄、东海域春季水团的划分、判别与分析. 青岛海洋大学学报,19(1):22—33
- 李凤歧,王凤钦,苏育嵩等,1989b. 黄、东海域春季水团的模糊分析. 青岛海洋大学学报,19(1):35—45
- 杨作升,郭志刚,王兆祥等,1992a. 黄东海陆架悬浮体向其东部深海输送的宏观格局. 海洋学报,14(2):55—68
- 杨作升,郭志刚,王兆祥等,1992b. 黄东海悬浮体中的有机包膜. 海洋与湖沼,23(2):217—227
- 苏纪兰,潘玉球,1989. 台湾以北陆架环流动力学初步研究. 海洋学报,11(1):1—14
- 胡敦欣,丁宗信,熊庆成,1980. 东海北部一个气旋型涡旋的初步分析. 科学通报,25(1):29—31
- 赵保仁,1985. 东海北部气旋型涡旋存在的近期观测证据. 海洋与湖沼,16(3):240—248
- 秦蕴珊,李 凡,徐善民等,1989. 南黄海海域水体中悬浮体的研究. 海洋与湖沼,20(2):101—111
- 郭志刚,杨作升,胡敦欣等,1997. 春季东海北部海域悬浮体的分布结构与沉积效应. 海洋与湖沼,28(增刊):66—72
- 詹滨秋,黄华瑞,庞学忠等,1993. 颗粒物质和微量金属在东海北部的沉积通量. 海洋与湖沼,24(1):34—41
- Miller M C, McCave I N, Komar P D, 1977. Threshold of sediment motion under unidirectional currents, *Sedimentology*, 24: 507—527
- Milliman J D, Beardsley R C, Yang Z S *et al*, 1985. Modern Huanghe derived mud on the outer shelf of the East China Sea: Identification and potential transport mechanism. *Contin Shelf Res*, 4:175—188
- Milliman J D, Qin Y S, Park Y A, 1989. Sediment and Sedimentary Processes in the Yellow and East China Seas. In: Taira A, Masuda F ed. *Sedimentary Faces in the Active Plate Margin*. Tokyo: Terra Scientific Publishing Company, 233—249
- Peng M C, Hu D X, 1999. Preliminary Study on Suspended Sediment Material Flux in the East China Sea. In: Hu D X, Tsunogai S ed. *Margin flux in the East China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 49—55
- Saito Y, Yang Z S, 1994. Historical Change of the Huanghe (Yellow River) and Its Impact on the Sediment Budget of the East China Sea. In: Iseki K, Koike I, Tsunogai S *et al* ed. *Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal-Ocean-Atmosphere System*. Japan: Hokkaido University (Sapporo), 7—12
- Sternberg R W, Larsen L H, Miao Y T, 1985. Tidally driven sediment transport on the East China Sea. *Contin shelf res*, 4:105—120
- Wu Y L, Zhang Y S, Zhou C X, 1999. Phytoplankton Distribution Characteristics and Community Analysis in the Continental Shelf area of the East China Sea. In: Hu D X, Tsunogai S ed. *Margin Flux in the East China Sea*. Beijing: China Ocean Press, 132—140
- Xu D Y, 1983. Mud Sedimentation on the East China Sea Shelf. In: *Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea, Voll.* Beijing: China Ocean Press, 544—556
- Yanagi T, Inoue K, 1995. A Numerical experiment on the sedimentation processes in the Yellow Sea and the East China Sea. *Journal of Oceanography*, 51:537—552
- Yang Z S, Milliman J D, 1983. Fine Grained Sediment of Changjiang and Huanghe River and Sediment Sources of the East

- China Sea. In: Voll. Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, With Special Reference to the East China Sea. Beijing: China Ocean Press, 436—446
- Yang Z S, Saito Y, Guo Z G *et al*, 1994. Distal Mud Area as a Material Sink in the East China Sea. In: Iseki K, Koike I, Tsunogai S *et al* ed. Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal-Ocean-Atmosphere System. Japan: Hokkaido University, 1—6
- Zhan B Q, 1994. The Study on Vertical Flux Processes in the East China Sea. In: Iseki K, Koike I, Tsunogai S *et al* ed. Proceedings of International Symposium on Global Fluxes of Carbon and Its Related Substances in the Coastal-Ocean-Atmosphere System. Japan: Hokkaido University, 177—182
- Zhan B Q, Zhu S L, 1999. Preliminary Study on Resuspension Rate in the East China Sea. In: Hu D X, Tsunogai S ed. Margin Flux in the East China Sea. Beijing: China Ocean Press, 56—60

## SUSPENDED SEDIMENT FLUX IN SPRING ON THE EAST CHINA SEA SHELF WITH DIFFERENT SURFACE SEDIMENT TYPES

LEI Kun, YANG Zuo-Sheng, GUO Zhi-Gang, BAI Hong<sup>†</sup>

(College of Marine Geosciences, Ocean University of Qingdao, Qingdao, 266003)

<sup>†</sup>(Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071)

**Abstract** Observations of suspended sediment and hydrographic investigation are carried out in two representative areas, nominally the mud area southwest of Cheju Island and the sand area on the middle shelf of the East China Sea in April 1994. Vertical distribution of residual and suspended sediment flux in two areas are calculated and compared to represent transport of suspended sediment in two areas. The results show that suspended sediment flux and vertical distribution of TSM in the mud area and in the sand area have markedly different characteristics. The differences can be explained by the effect of four factors: surface sediment type, hydrodynamics, sediment source, productivity and associated biogeochemical process. These factors affect the two areas differently and cause the difference of suspended sediment flux in two areas. The mud area has relatively large flux and suspended sediment in upper water column (above 40m in depth) is transported southeastward; lower water column (deeper than 40m in depth) in the area have a larger suspended sediment flux than the upper water column, and suspended sediment are transported northeastward. Suspended sediment flux in the sand area is less than that in the mud area, and suspended sediment in whole water column is transported northeastward.

**Key words** Suspended sediment, Flux, the East China Sea, Surface sediment