

# 江苏近岸海域悬沙浓度的时空分布特征\*

邢飞 汪亚平<sup>①</sup> 高建华 邹欣庆

(南京大学海岸与海岛开发教育部重点实验室; 江苏省海岸与海岛开发重点实验室 南京 210093)

**提要** 2006—2007 年间的四个季节在江苏近岸海域 69 个站位采集水样, 获取悬沙浓度。通过对 TM 遥感数据反演, 获取该海域四季大面悬沙浓度, 并与调查的实测悬沙浓度进行对比。结果显示, 大面调查的非同步数据基本可正确反映大区域悬沙浓度的季节与空间分布趋势。悬沙浓度等值线由高至低、由陆向海分布, 底层浓度约为表层的 2—3 倍; 废黄河口和长江口外海域为悬沙浓度高值区, 而海州湾为低值分布区, 东南部陆架区受台湾暖流影响出现低值中心。冬季整个海域悬沙浓度均较高, 其次为春季, 夏季最低; 废黄河口海域的高值中心在不同季节分布位置有所移动。海底沉积物的再悬浮是苏北近岸悬沙最主要的来源, 河流输沙量的季节变化是影响长江口海域悬沙浓度变化的关键因子。相关分析结果表明, 潮流为影响悬沙浓度分布的主要控制因子; 季风、风暴潮和风浪虽对悬沙的分布具有一定的影响, 但冬季的低温环境是形成该季节整个海域悬沙浓度显著偏高的重要因素。

**关键词** 悬沙浓度, 潮流, TM 图像, 辐射沙洲, 长江口

**中图分类号** P731

江苏近岸海域由北至南包括海州湾、废黄河口、辐射沙洲与长江口北支口外海域, 具有形态独特、成因复杂的辐射沙脊群及河海交互作用的多种水动力因素, 其研究历来备受众多学者的重视(吴德安等, 2008; 黄海军等, 2008; 刘兴泉等, 2008; 高磊等, 2009; 郑琰明等, 2009)。悬沙浓度是海洋环境动力研究中的重要参数, 是深入了解海洋沉积过程的一个重要因子。江苏近岸海域由于潮差较大、且处于开敞陆架边缘, 物源丰富; 沿岸有着宽广和不断淤涨的潮滩。悬沙输运和堆积, 对海底沙脊和近岸潮滩的发育起着至关重要的作用, 研究这一区域悬沙的分布特征及其影响因素具有重要的理论和实践意义。自 20 世纪 50 年代开始, 已有国内外的相关学者对其进行调查研究, 如 1980—1984 年对海岸带和海涂资源进行了综合调查; 1983—1985 年中美联合调查了南黄海和长江口海域的沉积动力学特征; 中国科学院于 1988、1992、1993 年分别对南黄海组织了三次较大规模的调查, 并于 1996 年与韩国汉城大学开展了中

韩南黄海联合调查。近年来, 遥感手段以其覆盖范围广、数据同步性好的优点而得到了广泛的应用, 如孙效功等(2000)利用 NOAA 卫星分析了黄、东海陆架悬沙向深海输送的时空变化规律; 宋召军等利用 NOAA/AVHRR 2003 年的遥感数据对南黄海春秋两季悬沙的空间分布进行了反演(宋召军等, 2006)。

历史上由于受条件限制, 对江苏辐射沙洲海域还未开展过全年四季的悬沙浓度调查。2006—2007 年间, 南京大学在该区进行四季大面、多层次的水样采集, 获取悬沙浓度数据, 并结合同季节遥感数据反演分析的结果, 研究江苏近岸海域悬沙浓度的时空变化特征及其影响因素。

## 1 研究方法

### 1.1 野外观测和数据处理

南京大学分别在夏、冬、春、秋季(2006 年 7—8 月、2006 年 12 月至 2007 年 1 月、2007 年 4—5 月、2007 年 10—11 月), 使用“海监 59 号”在江苏近岸海

\* 国家自然科学基金资助项目, 40876043 号; 江苏省 908 专项, JS-908-01-01 号; 江苏省自然科学基金资助项目, BK2006131 号。邢飞, Email: xingfei319@163.com

通讯作者: 汪亚平, Email: ypwang@nju.edu.cn

收稿日期: 2009-03-16, 收修改稿日期: 2009-12-18

域(包括辐射沙洲区)69个站位进行野外大面调查,包括水样采集、海流和海浪观测、气象观测等(站位见图1),使用DGPS-MAX型差分GPS定位(加拿大CSI Wireless公司生产,平面精度:<1m)。水样采集按照GB/T13909-92海洋调查规范中有关海洋地质地球物理调查的标准,根据水深情况采集2—4层水样;春季航次共获取水样176个,夏季185个,秋季176个,冬季174个。

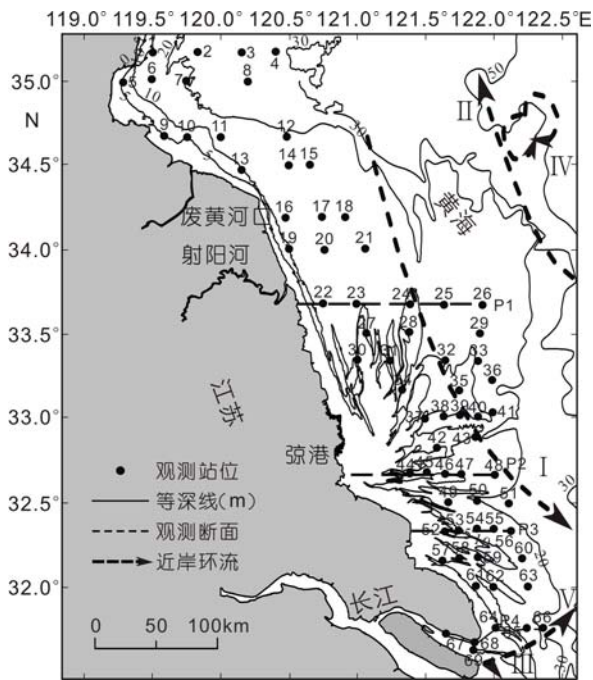


图1 研究区位置和调查站位及冬夏季节海流(I. 为冬夏季节苏北沿岸流; II. 冬季黄海暖流; III. 冬季长江冲淡水; IV. 夏季小涡旋; V. 夏季长江冲淡水。据林葵等2002年修改)

Fig.1 Location of the study area, showing sampling stations and general circulation during summer and winter (I. coastal current along north of Jiangsu Province during summer and winter; II. Yellow sea warm current during winter; III. the Changjiang river diluted water during winter; IV. small vortices during summer; V. the Changjiang river diluted water during summer) (revision of a similar map published in 2002 by Lin *et al*)

在获取水样的同时,同步采用WH600型600kHz ADCP(美国RDI公司生产,含底跟踪功能)进行海流和水深观测,风向风速采用Vantage Pro2自动气象站在船上现场测量,波高根据《海洋水文气象调查技术规程》进行目测,流速、波浪与风速统计数据见表1。

在室内使用抽滤法测定水样的悬沙浓度:使水样通过孔径为0.45 μm的滤膜(杭州火炬西斗门膜工业公司生产),再将附着沉积物的滤膜烘干、称重;为了消除滤膜溶解的影响,约20%的水样采用双膜过滤,进行滤膜校正,最后通过计算获取悬沙浓度。部分水样采用Mastersizer2000型激光粒度仪(英国生产,粒径范围为0.01 - 2000 μm)进行分析,获取悬沙的粒度分布。

1.2 遥感图像的悬沙浓度反演算法

为了弥补实测数据不同步的缺陷,利用相同季节的遥感数据进行反演,获取该区域表层悬沙浓度分布。本文作者采用TM遥感数据,获取图像(卫星过境)的时间分别为2006年5月11日、2006年9月18日、2007年6月7日和2008年2月28日,可代表春、秋、夏、冬四个季节的状况。根据李炎等(1999)的遥感光谱反射斜率公式(李炎等,1999),当悬沙浓度不高于120 mg/L时,采用公式:

$$S = 62.59 \times d(Ra2)/d(Ra1) - 4.6772 \quad (1)$$

对于悬沙浓度高于120mg/L时,采用公式:

$$S = 55.257 \exp(0.4038 \times [d(Ra2)/d(Ra1)]) \quad (2)$$

来获取悬沙浓度 S(mg/L), Ra1, Ra2 分别为 NOAA/AVHRR 的 Ch1、Ch2 波段海面光谱反射率。

据 Stumpf(1987)的研究结果, NOAA/AVHRR 的 Ch1、Ch2 波段与 TM 的 Ch3、Ch4 波段的光谱反射率存在如下关系:

$$d(Ra2)/d(Ra1) = A \times d(R4)/d(R3) \quad (3)$$

其中 R3、R4 分别为 TM/Ch3、Ch4 波段的光谱反射率, A 为经验系数,与太阳辐照度和增益相关,计算公式为:

$$A = 0.76(E3/E4) \times (Gain4/Gain3) \quad (4)$$

表1 江苏近岸海域流速、波浪与风速观测统计值

Tab.1 Statistics of depth-averaged current velocity, significant wave height and sea surface wind

季节	垂线平均流速 (m/s)			有效波高 (m)			海面风速(m/s)		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
春	1.78	0.08	0.50	1.56	0.10	0.63	8.90	0.90	4.37
夏	1.32	0.09	0.51	1.70	0.10	0.62	8.00	0.00	2.76
秋	1.29	0.02	0.44	2.85	0.25	0.97	6.00	0.80	2.83
冬	1.62	0.04	0.48	1.74	0.14	0.58	10.30	0.00	4.19

其中  $E_3$ 、 $E_4$  分别为 TM 第三、四波段太阳辐照度(冯钟葵, 2001),  $Gain_3$ 、 $Gain_4$  为 TM 第三、四波段的增益, 可从 TM 原始数据的头文件中获取。

## 2 研究结果

### 2.1 表层悬沙浓度的平面分布特征

根据水样实测数据, 春季江苏近岸海域表层悬沙浓度(距海面 0.5 m 处水样获得)等值线由高至低从陆向海延伸, 区域内 100 mg/L 等值线以岸线为基线以波浪状从北向南伸展, 中间分布着几个悬沙浓度的高值中心(图 2a)。最高值中心位于长江口北支附近海域, 悬沙浓度大于 500 mg/L; 射阳河口以北和以南各有一个大于 200 mg/L 的次高值中心, 并以岸线为中心向海扩展, 呈现马鞍状形态。弶港以北辐射沙洲东部有一高值中心, 以舌状形态向东北方向延伸; 在长江口北支附近也出现等值线向东北方向延伸的现象。在近岸高值区的外围悬沙浓度迅速降低, 并有多多个低值中心分布, 反映出春季表层流场较复杂。区域悬沙浓度普遍在 50 mg/L 以上, 均值为 110.79 mg/L。

夏季悬沙浓度普遍较低, 高值中心位于长江口北支附近, 最大值大于 180 mg/L; 辐射沙洲地区为次高值中心, 等值线向北和东北方向延伸, 10 mg/L 等值线可延伸到 122°E 以东地区(图 2b)。长江口北支外海域等值线与春季相比转为东、东北向, 可能与长江冲淡水的主体扩散方向有关。研究区北部悬沙浓度等值线基本与岸线平行, 并由岸向海降低, 表明悬沙主要来源于近岸地区。南部海域等值线沿南北方向延伸, 与岸线成一定夹角向海突出, 表明该区影响因素较多, 水动力条件较为复杂。研究区外缘悬沙浓度较低, 迅速降至 5 mg/L, 表明夏季近岸悬沙浓度向海的影响范围较小, 高悬沙浓度分布范围不超过 121.5°E。

秋季悬沙浓度的高值中心仍分布于长江口附近地区, 最高值在 500 mg/L 以上(图 2c)。辐射沙洲海域为次高值分布区, 表层悬沙浓度可达 300 mg/L 以上, 100 mg/L 等值线呈现向东、东北延伸的波浪状分布形态。在射阳河口表层悬沙

浓度可达 200 mg/L 以上。与夏季相比, 整个海域高悬沙浓度范围向海扩展。长江口附近海区悬沙浓度等值线密集, 悬沙浓度向海迅速降低。

冬季悬沙浓度在整个海域均处于较高水平, 高值中心位于射阳河口附近(达 800 mg/L 以上), 向南、北两侧递减(图 2d)。在长江口北支口门处分布有悬沙浓度的次高值中心(大于 500 mg/L)。研究区北部等值线分布密集, 并在海州湾外降低至 5 mg/L。研究区南部悬沙浓度均在 50 mg/L 以上, 尤其是辐射沙洲海域其值均在 200 mg/L 以上, 并向东南方向延伸。

四个季节表层悬沙浓度存在以下共同特征:

- (1) 悬沙浓度等值线由高至低从陆向海延伸, 显示出与大陆岸线基本平行的特征(高值中心区除外)。
- (2) 在观测区域始终存在苏北近海废黄河口-辐

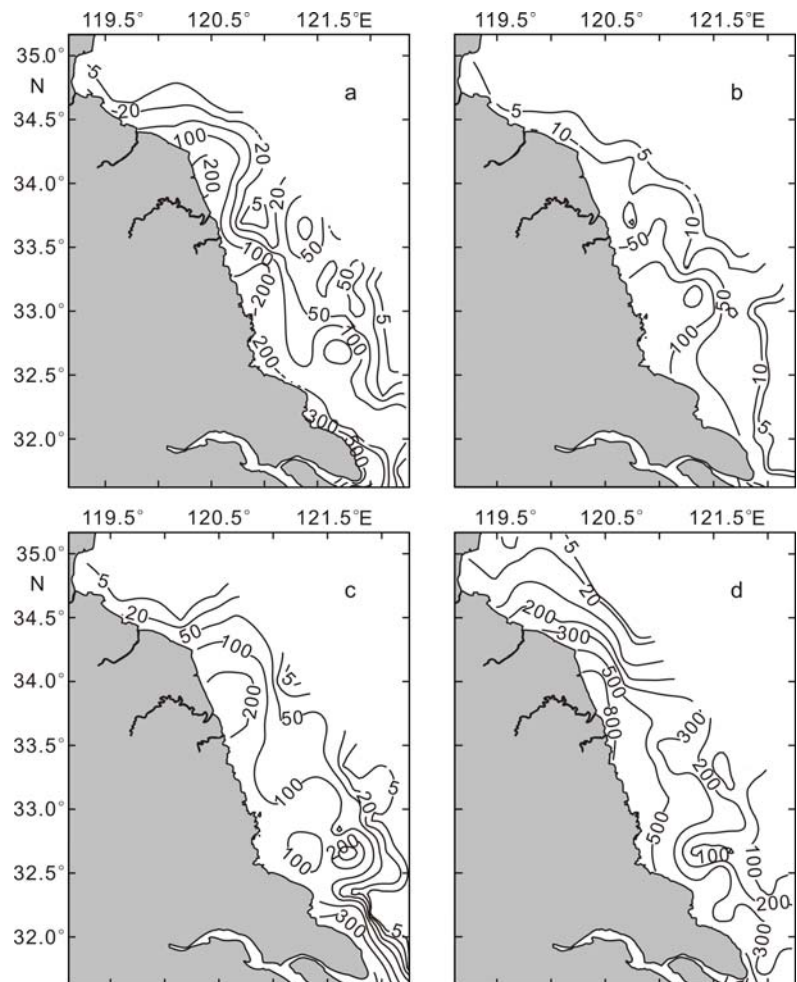


图 2 江苏近岸海域的表层悬沙浓度分布(单位: mg/L)

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季

Fig.2 The horizontal distributions of suspended sediment in surface water (mg/L, 0.5 m below the surface) during a. spring, b. summer, c. autumn and d. winter

射沙洲和长江口附近海域两个表层悬沙浓度的高值区。

(3) 辐射沙洲地区的高值中心尽管位置存在季节变动,但始终位于弇港以北地区。

(4) 研究区北部等值线基本与岸线走向一致,海州湾附近海域始终为最低值分布区。南部海域悬沙浓度值较高,辐射沙洲东部海域悬沙浓度分布季节变化显著。

表层悬沙浓度的季节变化主要表现在:

(1) 悬沙浓度以冬季最高,其次为春季,夏季最低。

(2) 最高值中心在春、夏、秋均分布于长江口附近海域,而在冬季分布在苏北射阳河口附近。

(3) 高悬沙浓度向海的分布范围冬季最大,夏季最小。

(4) 近岸悬沙浓度高值中心向海的延伸趋势存在季节变动,尤其是在夏季向东北方向延伸,而在冬季向东南方向延伸。

对四个季节覆盖辐射沙洲的遥感数据进行悬沙浓度的反演,结果表明,与调查结果(图2)相比,采用遥感方法反演获得的表层悬沙浓度(图3)与对应季节实测结果基本一致。悬沙浓度由陆向海逐渐降低,弇港以北悬沙浓度高于以南地区;悬沙浓度的季节变化特征明显,冬季浓度值最高且分布均匀,其次为春季,夏季最低;四个季节的平均值与观测的平均值基本相同。但实测数据中的一些高低值中心在遥感图像中未显现出来,可能与实测数据采集时间与遥感图像过境时间不一致有关。遥感数据与实测数据的对比分析表明,实测悬沙浓度与遥感数据反演所得悬沙

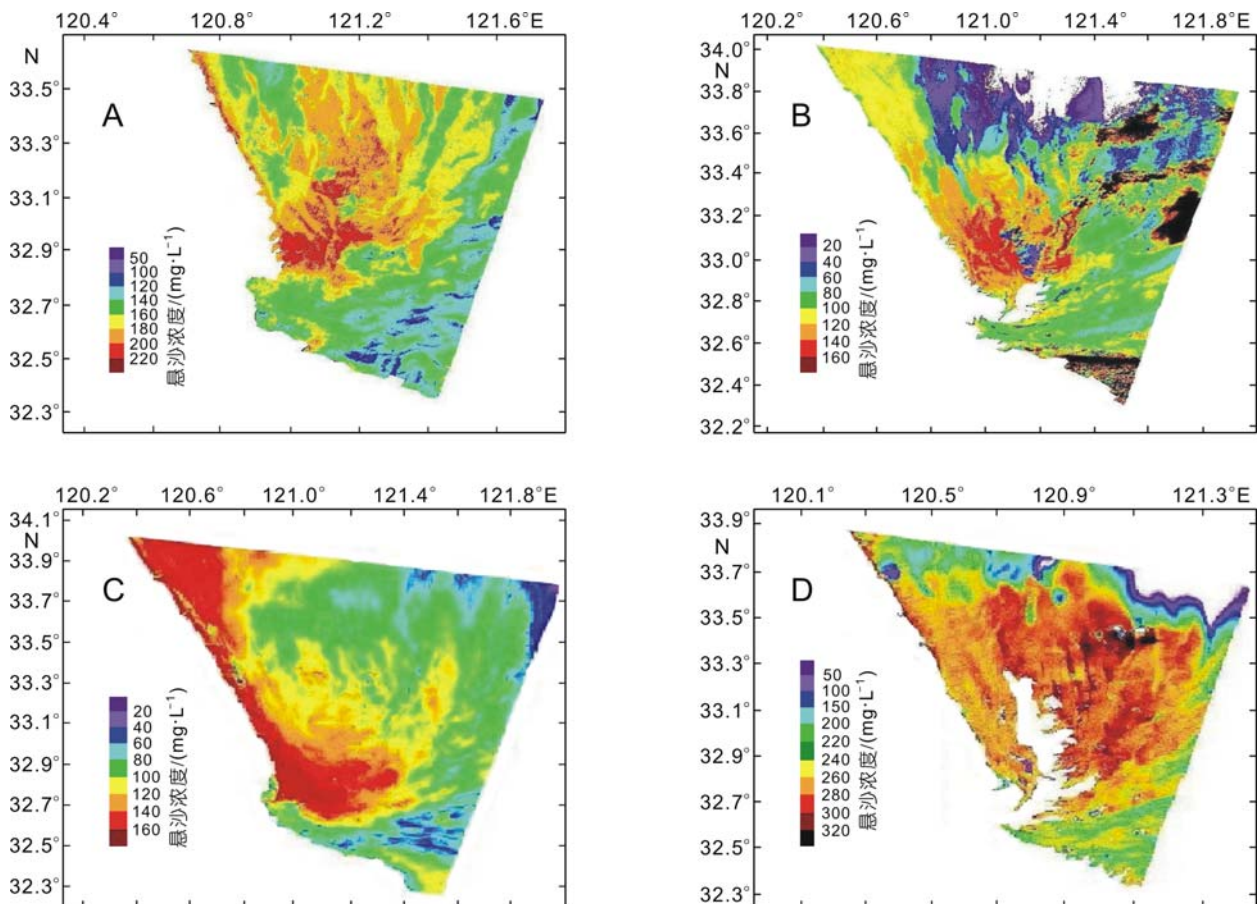


图3 遥感反演的江苏近岸辐射沙洲海域悬沙浓度

A. 春季; B. 夏季; C. 秋季; D. 冬季

(白色为陆地或沙洲露出水面的地区,黑色为云所覆盖的地区)

Fig.3 Concentrations of the suspended sediment in the Jiangsu coastal area derived from remote sensing TM data during A. spring, B. summer, C. autumn and D. winter

表 2 春、夏、秋、冬四季遥感图像悬沙浓度反演公式

季节	采样点个数	R3、R4 的相关系数	悬沙浓度 S 的计算公式
春	10740	0.93	$S=55.257 \times \exp(0.028 \times b3 - 0.792) (S > 120); S=4.33 \times b3 - 127.46 (S \leq 120)$
夏	11015	0.94	$S=55.257 \times \exp(0.019 \times b3 - 0.715) (S > 120); S=2.99 \times b3 - 115.45 (S \leq 120)$
秋	14407	0.96	$S=55.257 \times \exp(0.028 \times b3 - 0.902) (S > 120); S=4.28 \times b3 - 144.49 (S \leq 120)$
冬	8252	0.94	$S=55.257 \times \exp(0.095 \times b3 - 5.150) (S > 120); S=14.74 \times b3 - 802.90 (S \leq 120)$

浓度分布趋势大体相同。

2.2 悬沙浓度的垂向分布特征

悬沙浓度自岸向海的垂向分布特征可通过 P1、P2、P3、P4 四个剖面(位置见图 1)来具体说明。这些剖面各个季节均表现出悬沙浓度从底至表递减的现象, 底层浓度约为表层的 1/3(图 4,图 5)。

P1 剖面位于江苏中部射阳河口附近海域, 介于废黄河口和弶港之间, 悬沙浓度值终年较高, 底部通常维持在 200 mg/L 以上(图 4 P1)。高值中心出现于水

深大于 15 m 的坡折处附近, 并在不同季节发生位置变动, 可能与物源、水动力状况有关。冬季悬沙浓度最高, 底部可达 1500 mg/L, 近岸区域表层可达 800 mg/L; 春、夏季节较低。

P2 剖面位于弶港南部辐射沙洲的中心区, 由于受该区强烈水动力作用的影响, 断面中部即辐射沙洲中心区域(距岸线约 50—60 km)悬沙浓度最高(图 4 P2), 基本上未发生季节变动。悬沙浓度的季节变化不明显, 除夏季均值在 100 mg/L 以下之外, 其他季节

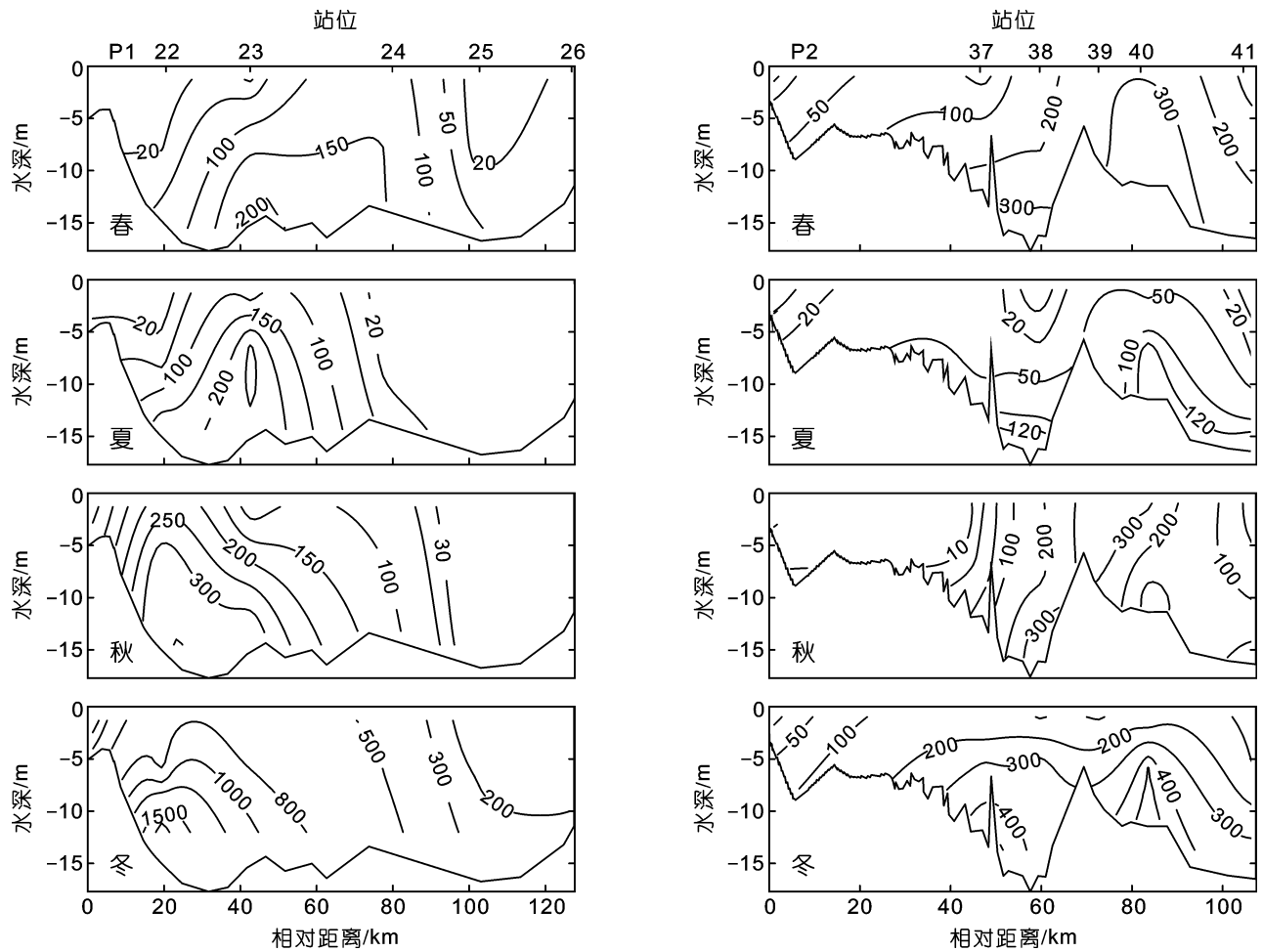


图 4 江苏近岸海域两条纵向剖面(P1,P2)的悬沙浓度垂向分布(单位: mg/L)(站位见图 1)  
Fig.4 Concentrations of the suspended sediment along the profiles of P1, P2(Stations showing in Fig.1)

剖面平均悬沙浓度均高于 150 mg/L, 其中冬季最高, 平均值约为 233 mg/L, 春季和秋季分别为 219 mg/L 和 171 mg/L。

图 5 P3 剖面位于辐射沙洲南部边缘地区, 处于两个悬沙浓度高值区之间, 其值相对较低。冬季悬沙浓度最高, 整个区域悬沙浓度均在 50 mg/L 以上; 夏季最低, 近岸地区在 5 mg/L 以下。就底层悬沙浓度而言, 秋季最低, 整个区域内最高值仅达 20 mg/L, 可能是采样期间水动力作用比较弱造成的; 底层悬沙浓度的最高值始终位于坡折处地区, 季节变动不明显。

图 5 P4 剖面位于长江口附近, 与长江口的水动力与悬沙输运密切相关。与其他剖面相比, 悬沙浓度的最高值出现在夏季, 而非冬季, 观察到的悬沙浓度最高值达 7371.28 mg/L(图 5 P4, 取自 67 站位的底层), 主要是夏季长江冲淡水量大, 携带泥沙多造成的。

春、夏季节悬沙浓度的分布相似, 河口地区远高于向海一侧, 而秋、冬季节在剖面两侧均观测到悬沙浓度的高值分布, 并且河口地区高值中心不如春、夏明显, 这反映了秋、冬季节长江入海水量及泥沙输量的减小, 同时其他水动力因素在秋、冬季节的加强造成了剖面向海一侧的另一悬沙浓度高值中心。

### 3 讨论

#### 3.1 沉积物来源对悬沙浓度时空分布的影响

苏北近岸海域的沉积物主要来自废黄河三角洲、辐射沙洲海域的海底侵蚀与长江物质输入。前人通过对悬浮物质无机物与有机物组分含量的测量证明, 南黄海近岸浅水区的悬沙主要为陆源物质, 其输入主要来自河流泥沙和近岸地区海底沉积物侵蚀(蔡德陵等, 2001)。根据本文实测数据(图 2), 春、夏、秋季悬沙浓度在辐射沙洲外缘向海侧迅速降至 5 mg/L 左

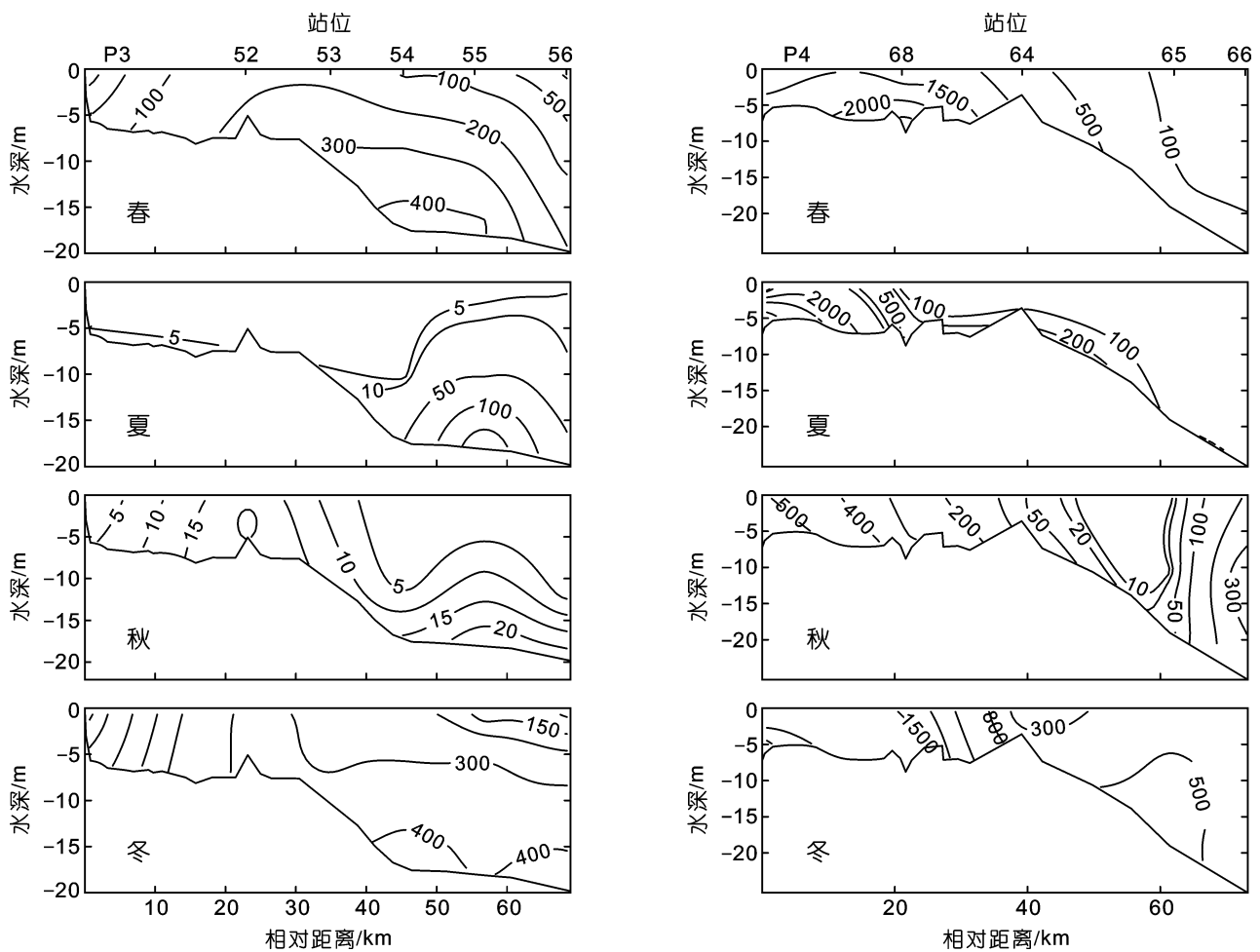


图 5 江苏近岸海域两条纵向剖面(P3,P4)的悬沙浓度垂向分布(单位: mg/L)(站位见图 1)  
Fig.5 Concentrations of the suspended sediment along the profiles of P3 and P4(Stations showing in Fig.1)

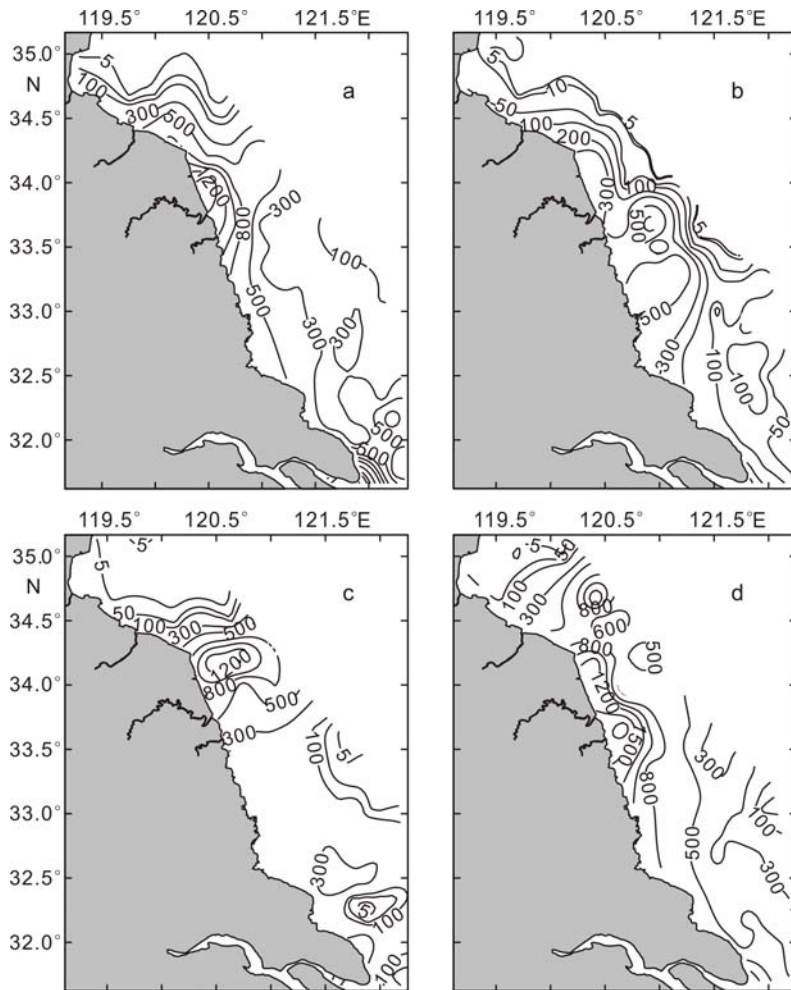


图 6 江苏近岸海域的底层悬沙浓度分布(单位: mg/L)

a. 春季; b. 夏季; c. 秋季; d. 冬季

Fig.6 The horizontal distributions of suspended sediment in bottom water (mg/L, 0.5m above seabed) during, a. spring, b. summer, c. autumn and d. winter

右; 在冬季, 辐射沙洲外缘悬沙虽可达 50—100 mg/L, 但此时黄海暖流向北输运, 表明苏北近岸海域的悬沙不可能来源于黄海中部甚至韩国半岛。此外, 夏季长江冲淡水有向东北输运的趋势(图 1), 可能携带部分江苏南部海域的悬沙向黄海中部陆架甚至更远处输运。

四个季节的悬沙浓度分布均呈现等值线从陆向海降低的态势, 可能与沉积物主要来源于近岸地区有关。此外, 研究区存在的两个悬沙浓度高值中心, 分别位于长江口和废黄河口附近。长江大通站年径流量达 9000 亿  $m^3$ , 年均输沙量达 4 亿 t 以上(中华人民共和国水利部, 2007)。长江挟带的物质进入河口区后, 由于多种因素形成最大浑浊带, 造成河口区及临近海域悬沙浓度较高(高建华等, 2005; Dyer K R, 1979;

田向平, 1994)。夏季实测长江口北支口外底层悬沙浓度最高可达 7000 mg/L。根据任美镔(1986)和万新宁等(2004)的研究结果, 通过长江口北支北侧断面向北进入江苏海域的悬沙通量约为 0.35 亿—0.36 亿 t/a, 虽不足长江年入海通量的 10%, 但仍可在北支口外海域形成高悬沙浓度分布区。

海底沉积物的侵蚀是海水中悬沙的主要来源之一, 并在物质输运过程中占有重要地位(Souza *et al*, 2007; Holt *et al*, 1999)。在废黄河口存在的悬沙浓度高值中心(图 6a、c、d)最高值可达 2549.5 mg/L(冬季); 冬季辐射沙洲海域悬沙浓度整体较高, 普遍在 500 mg/L 以上, 这主要与废黄河口水下三角洲及辐射沙洲的海底侵蚀相关。该区沉积物质主要为细粉砂和粘土, 粒径大多小于 16  $\mu m$ , 63  $\mu m$  以上的颗粒含量不足 10%(秦蕴珊等, 1989)。细粉砂易被侵蚀、搬运, 是主要的物质来源, 加之细颗粒物悬浮后不易沉降, 为高悬沙浓度的维持提供了必要条件。海州湾海岸主要为基岩和砂质海岸, 细颗粒物来源有限, 故全年都是区域最低值分布区。

### 3.2 潮流作用对悬沙浓度时空分布的影响

江苏近岸海域为强潮区, 东南方向传来的东海前进潮波与南黄海旋转潮波在琼港外海辐聚, 形成了以琼港为中心的辐射状潮流场。该潮流场潮能集中, 潮差大, 潮流强(最大涨潮流速可达 2 m/s 以上), 使辐射沙洲海域成为南黄海流速最大的地区(丁文兰, 1985)。强潮流可侵蚀和冲刷海底沉积物, 造成细颗粒物再悬浮、搬运和堆积。对同步观测的悬沙浓度与海流流速进行相关分析, 结果表明流速与悬沙浓度在各个季节均具有一定的相关性(表 3)。以辐射沙洲为例, 通过沉积物平衡法估算, 由废黄河三角洲、东侧黄海断面、南侧长江口断面向辐射沙洲区的净输沙量为 2 亿 t/a(任美镔, 1986), 根据海底地形数据估算的辐射沙洲区面积为  $1.877 \times 10^4 km^2$ , 水体体积为 1462 亿  $m^3$ ; 又根据在辐射沙洲区岩芯的  $^{14}C$  测年结果, 平均沉积速率约为 4 mm/a(张忍顺等, 1992), 故除去沉积量后

表 3 四季垂线平均悬沙浓度 ( $S$ ) 与流速、风速和水深的相关性

Tab.3 Correlations between concentrations of suspended sediment and current speed, wind speed, depth and significant wave height

相关系数	$S$ 与流速	$S$ 与风速	$S$ 与水深	$S$ 与有效波高	样品数
春	0.609	-0.033	-0.269	-0.269	69
夏	0.465	0.104	-0.218	-0.218	64
秋	0.579	-0.002	-0.188	-0.188	67
冬	0.348	0.361	-0.26	-0.26	68

可估算出输入辐射沙洲区的沉积物在水体中的浓度仅为 100 mg/L 量级, 这与实测数据相比显著偏小。若考虑短期内的沉积速率, 则其沉积量会高于此估算值; 且近年长江入海泥沙显著减少, 输入到苏北海域也相应减少, 估算的水柱中的悬沙浓度将会更低。这表明, 高悬沙浓度不是通过平流作用由外海输入, 而主要是由于强烈的水动力造成的再悬浮作用, 使得江苏近岸海域悬沙浓度终年偏高。

### 3.3 区域环流系统对悬沙浓度时空分布的影响

影响苏北近岸海域的主要环流系统为苏北沿岸流、黄海暖流与长江冲淡水(图 1)。长周期、大尺度环流对悬沙浓度的时空分布具有一定的控制作用。苏北沿岸流携带高悬沙水体由北向东南方向扩张, 其所经海域相应形成高悬沙含量区。从图 2 与图 6 的对比可以看出, 在秋季和冬季, 表层高值分布范围均比底层广, 并沿近岸地区向南延伸, 这主要与苏北沿岸流的运动有关。在辐射沙洲外缘为由南向北高温、低悬沙浓度的黄海暖流, 它对于苏北沿岸流向东扩展起到阻碍作用。长江冲淡水主要影响长江口外海域的悬沙浓度分布。

研究表明, 南黄海的环流系统存在着较显著的季节变化。夏半年在南黄海存在一个逆时针环流系统, 在江苏近岸表现为由北向南的沿岸流, 并在研究区南部向东弯曲, 在表层气旋式环流的内部还存在小的气旋和反气旋环流, 造成图 2 中夏、秋季节, 尤其是秋季, 悬沙浓度近岸高值中心向海影响的范围较小, 并在辐射沙洲东部地区形成多个低值中心(图 2)。冬半年南黄海环流系统主要由其中部北上的黄海暖流和两侧南下的沿岸流组成, 在研究区内表现为近岸地区的苏北沿岸流和中部的黄海暖流, 环流系统较夏半年简单, 因此图 2 中冬、春季节, 尤其是冬季, 等值线分布比较规则, 基本与岸线走向一致, 表层悬沙向南扩散; 底层悬沙在季风生成的底层环流作用下向外海扩散, 经北上的黄海暖流作用, 可转向东北输入其他黄海海域(图 6d, 图 1)。

长江口冲淡水的季节变化表现为夏季流量大, 向东北方向输送, 而在冬季则主要随浙闽沿岸流向南输送(林葵等, 2002), 对悬沙分布的影响表现为夏季表、底层分布图(图 2b, 图 6b)中等值线均呈现向东延伸的态势; 而其他季节长江口附近等值线均沿南北向延伸, 长江冲淡水对本区的影响较小。

### 3.4 其他物理海洋因素对悬沙浓度时空分布的影响

重要的物理海洋因素, 如风、浪、水体温、盐度对悬沙的分布和输运也有影响。中国东部海区地处东北季风带, 冬季盛行偏北风, 夏季盛行偏南风。风向的变化可直接影响表层悬沙分布状况, 与底层相比, 冬季表层悬沙等值线向东南方向延伸, 对应于冬季风的影响作用; 夏季由于风力相对较弱, 等值线变化趋势不明显, 但仍然可以看出其等值线向东北方向延伸的态势(图 2, 图 6)。此外, 季风在科氏力作用下, 形成冬季表层海水向陆运动, 而相应的底层海水则向海运动, 夏季则正好相反(Iseki *et al*, 1994; 高抒等, 1998)。由于底层海水的悬沙浓度通常大于表层, 因此冬季悬沙浓度向海扩展的范围和程度均远大于夏季(图 2、图 3、图 6)。

春、夏季节底层悬沙浓度的分布十分相似, 而表层则差异较大(图 2、图 6)。从四个季节数据的对比也可看出, 整个研究区底层悬沙浓度值都较高, 而夏季表层则明显低于其他季节, 可能与夏季风形成底部向岸的环流(高抒等, 1998)不利于底部悬沙扩散有关, 因此, 高浓度的悬沙水团被压缩在近岸浅水海域。

同步的气象观测结果表明, 冬季平均风速约为 4.31 m/s, 是夏季的 1.6 倍。风通过波浪把能量传递给海水, 在浅海区域对海底沉积物的起动和再悬浮有重要作用。相关分析显示, 冬季风速与悬沙浓度的相关系数最高, 为 0.361, 而其他季节基本没有相关性(表 3)。1983 年中美联合调查船在南黄海辐射沙洲区测量时, 突然刮起 10 级持续 24h 的大风, 表层悬沙浓度随后增加了 1 倍, 而底层则增加了 6 倍之多(宋召军等, 2006), 反映了风力对悬沙浓度的重要影响。



潮流是影响研究区悬沙浓度的关键因素(表 3),但潮流的季节变化并不显著,不是形成悬沙浓度季节变化的主要原因。风、波浪或风暴潮对悬沙浓度可以造成一定影响,但它们都是短暂、小范围的,不足以造成冬季整个海域悬沙浓度持续维持较高水平。观测数据表明,冬季气温和水温极低,较其他季节约低 10℃以上。而海水的粘滞性与温度呈负相关关系,随着温度的降低,海水粘滞性显著增加,不但可降低悬浮颗粒的沉降速度,使悬浮的细颗粒物难于沉降,还使得同样流速的海水对海底的切应力显著增大,导致底床泥沙易于起动、再悬浮,最终造成整个海域悬沙浓度均维持较高的水平。对实测数据结果进行统计分析表明,冬季平均水温为 8℃,而夏季高达 26℃,因而冬季的海水粘滞系数约为夏季的 1.5 倍以上(表 4)。因此,冬季悬沙(平均粒径为 10μm)的平均沉降速度仅为  $5.57 \times 10^{-5}$  m/s,比夏季低 34%;而底床切应力比夏季增加 20%,这两种效应的叠加使得冬季整个海域悬沙浓度显著增加。

表 4 温度对悬沙沉速和底床切应力的影响

Tab.4 Influence of water temperature on suspended sediment settling velocity and bottom shear stress

季节	温度 (℃)	海水粘滞系数 ( $\times 10^{-6}$ m <sup>2</sup> /s)	沉降速度 ( $\times 10^{-5}$ m/s)	底床剪切应力 (N/m <sup>2</sup> )
夏	26	0.93	8.44	0.10
冬	8	1.41	5.57	0.12

#### 4 结论

苏北近岸海域存在着长江口北支口外和废黄河口海域两个悬沙浓度的高值中心,主要与长江泥沙输入和苏北近岸的侵蚀和再悬浮有关。长江冲淡水及入海泥沙量的季节变化影响着长江口北支口外海域及研究区东南部悬沙浓度的时空分布。此外,悬沙浓度的分布还受到大尺度环流系统(苏北沿岸流与黄海暖流)的影响及控制,其中苏北沿岸流造成表、低层高值中心分布位置的差异,并影响到表层高值中心向南扩展的程度,黄海暖流则对近岸悬沙浓度向外海扩展有影响。

从悬沙浓度的垂向分布来看,底层明显高于表层。流速在各季均与悬沙浓度有较好的相关关系,表明研究区再悬浮作用是影响悬沙时空分布的重要因素。季风、海浪对悬沙浓度的分布起到一定的扰动作用,并造成不同季节悬沙浓度分布的极高值与高值

中心位置的变化。其中冬季风形成底层向海的环流有利于悬沙向海扩散,夏季风形成底层向岸的环流则不利于悬沙扩散。此外,冬季气温和水温极低,影响海水的粘滞性,导致海水中悬浮颗粒沉降速度降低、底部切应力和再悬浮作用增强,使得冬季整个海域悬沙浓度均维持较高的水平。

致谢 南京大学张永战、吴祥柏、王华强、王元磊、刘运令、闵凤阳、王宁、冉琦、丁艳峰、葛松等参加了野外采样;徐咏飞、刘旭英、李家胜、白凤龙、谢文静、冯志轩、青平等协助进行水样过滤,李婧对遥感数据的分析进行了指导,谨致谢忱。

#### 参 考 文 献

- 丁文兰, 1985. 渤海和黄海潮汐潮流分布的基本特征. 海洋科学集刊, 25: 27—40
- 万新宁, 李九发, 沈焕庭, 2004. 长江口外海滨典型断面悬沙通量计算. 泥沙研究, (6): 64—70
- 中华人民共和国水利部, 2007. 中国河流泥沙公报 2006. 北京: 中国水利水电出版社, 1—17
- 冯钟葵, 2001. Landsat 7 ETM+数据的增益设置及增益改变. 中国建设卫星地面站(用户简讯 2001,3), 8—9
- 田向平, 1994. 河口盐水入侵作用研究动态综述. 地球科学进展, 9(2): 29—34
- 任美镔, 1986. 江苏省海岸带和海涂资源综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 19-65
- 刘兴泉, 尹宝树, 侯一筠, 2008. 长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究 I. 定解条件与研究方案. 海洋与湖沼, 39(1):82—89
- 孙效功, 方 明, 2000. 黄东海陆架区悬浮体输运的时空变化规律. 海洋与湖沼, 31(6), 581—587
- 吴德安, 崔效松, 张忍顺等, 2008. 江苏辐射沙洲水道潮流调和分析. 海洋与湖沼, 39(2):105—111
- 宋召军, 黄海军, 刘 芳, 2006. 南黄海辐射沙洲附近海域悬浮泥沙的遥感反演研究. 高技术通讯, 16(11):1185—1189
- 张忍顺, 陈才俊, 1992. 江苏岸外沙洲演变与条子泥并陆前景研究. 北京: 海洋出版社, 56—64
- 李 炎, 李 京, 1999. 基于海面-遥感器光谱反射率斜率传递现象的悬浮泥沙遥感算法. 科学通报, 44(17):1982—1987
- 林 葵, 汤毓祥, 郭炳火, 2002. 黄海、东海表、上层实测流分析. 海洋学报, 24(2):9—19
- 郑琰明, 康建成, 钟 巍等, 2009. 2004 年夏初、秋末长江口外海区冲淡水及羽状锋的盐度特征. 海洋与湖沼, 40(3):275—282
- 秦蕴珊, 李 凡, 徐善民, 1989. 南黄海海水中悬浮体的研究. 海洋与湖沼, 20(2): 101—112
- 高 磊, 李道季, 余立华等, 2009. 春季长江口崇明东滩沉积物-水界面营养盐交换过程研究. 海洋与湖沼, 40(2):109—116
- 高 抒, 程 鹏, 汪亚平等, 1998. 长江口外海域 1998 年夏季悬

- 沙浓度特征. 海洋通报, 18(6):44—50
- 高建华, 汪亚平, 潘少明等, 2005. 长江口悬沙动力特征与输运模式. 海洋通报, 24(5): 8—15
- 黄海军, 刘艳霞, 樊辉等, 2008. 黄河清 8 出汉河口泥沙异重流特征及其时空分布. 海洋与湖沼, 39(6): 90—96
- 蔡德陵, 石学法, 周卫健等, 2001. 南黄海悬浮体和沉积物的物质来源和运移: 来自碳稳定同位素组成的证据. 科学通报, 46(增刊): 16—23
- Dyer K R, 1979. Estuarine Hydrography and sediment. Cambridge: Cambridge university press, 178
- Holt J T, James I D, 1999. A simulation of the southern North Sea in comparison with measurements from the North Sea Project. Part 2 Suspended particulate matter. Continental Shelf Research, 19: 1617—1642
- Iseki K, Okamura K, Tsuchiya Y, 1994. Seasonal variability in particle distribution and fluxes in the East China Sea. In: Tsunogai S, Iseki K, I. Koike I *et al* ed. Proceeding of the Sapporo IGBP Symposium(14—17 November 1994, Sapporo, Hokkaido, Japan), 189—197
- Stumpf R P, 1987. Application of AVHRR satellite data to the study of sediment and chlorophyll in turbid coastal water. NOAA Technical Memorandum NESDIS AISC7, 50
- Souza A, Holt J, Proctor R, 2007. Modeling SPM on the NW European Shelf Seas. In: Balson P S, Collins M B ed. Coastal and Shelf Sediment Transport. Geological Society of London, Special Publications, 274: 147—158

## SEASONAL DISTRIBUTIONS OF THE CONCENTRATIONS OF SUSPENDED SEDIMENT ALONG JIANGSU COASTAL SEA

XING Fei, WANG Ya-Ping, GAO Jian-Hua, ZOU Xin-Qing

(Key Laboratory for Coast and Island Development, Ministry of Education & Jiangsu Province, Nanjing University, Nanjing, 210093, China)

**Abstract** Water samples of 69 stations in the South Yellow Sea were collected in the four seasons from 2006 to 2007; and suspended sediment concentrations (SSC) were measured and compared with the data extracted from the remote sensing TM images in corresponding seasons. The results confirmed the effectiveness of the usage of measured data to analyze the distribution of SSC, even though they were not acquired simultaneously. Correlation analyses between the SSC and the current speed, wind speed, water depth and the wave height indicated that tidal current was the main factor that controlled the SSC distribution pattern. Measurements showed that SSC was higher in the south than that in the north. The minimal value in the north was due to lack of sediment supply and weak hydrodynamics in this area. On the other hand, abundant supply from the land led to large SSC values spreading along the coast. Two peak values were observed in the study area. One was close to the coast of the abandoned Yellow River delta, and the other was close to the North Branch mouth of the Changjiang River. The data in a full year period illustrated that the maximum SSC occurred in winter in contrast to the minimum value observed in summer. SSC was well-distributed in winter whereas many high and low centers were noted in other seasons. The peak value varied in different seasons while it kept constant on the north side of Jianggang around the coast of the abandoned Yellow River delta. Vertical profiles showed that the SSC was higher in the bottom than that in the surface water since the strong bed shear stresses caused re-suspension. In respect to the coastal sea of northern Jiangsu, re-suspension was the critical factor for the continuous high SSC, while seasonal changes of discharge explained the fluctuations of SSC around the Changjiang estuary. Other factors, e.g. sediment sources, monsoon, storm surge, wind and waves, may affect the SSC distribution patterns locally and temporarily. The wind imposed an impact on SSC in winter. The seasonal temperature variation was another possible reason for the highest SSC value in winter, because it might strongly change the sea water viscosity, decrease the sediment settling velocity, increase the bottom shear stress, and increase the SSC significantly in the water column.

**Key words** Suspended sediment concentration, Tidal current, TM image, Radial Sand Ridge, Changjiang Estuary