

长江口表层沉积物有机碳分布及其影响因素

王华新^{1,2}, 线薇薇¹

(1. 中国科学院 海洋研究所 海洋生态与环境重点实验室, 山东 青岛 266071; 2. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘要: 根据长江口及其邻近海域 2007 年 2、5、8、11 月 4 个航次野外调查资料, 系统地探讨了长江口表层沉积物总有机碳(TOC)的时空分布特征及其主要影响因素。结果表明, 长江口及其邻近海域表层沉积物类型以细砂和粉砂为主, 细颗粒泥沙主要分布在调查水域南部, 北部海域以砂组分为主, 沉积物组成和分布具显著的季节变化特征; 长江口及其邻近海域表层沉积物 TOC 含量介于 0.012%~1.589%, 平均为 0.524%, 不同季节其空间分布特征不同; 最大浑浊区域和东南外海区 (122°30'E 以西, 31°31'N 以北)表层沉积物 TOC 含量显著高于北部海域; 沉积物粒度是影响长江口表层沉积物 TOC 的重要因素, 水动力条件通过作用于沉积物组成变化影响 TOC 时空分布, TOC 的高分布区位于长江冲淡水锋面与台湾暖流、黄海沿岸流混合处, 分布范围随水动力条件季节变化而变化。

关键词: 长江口; 表层沉积物; TOC; 时空分布

中图分类号: P736.4 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2011)05-0024-08

河口三角洲和邻近海域是陆地和海洋物质和能量交换最强烈的地带, 这里发生着复杂的物理、化学、生物、地质过程, 是全球变化研究和海洋地质科学的前沿领域之一^[1]。长江口作为世界第三大河的入海口, 每年经河口入海的径流量平均达 8 912 亿 m³, 泥沙量 4.6 亿 t, 大部分入海泥沙在河口三角洲堆积, 部分入海细粒泥沙向南和向东输送^[2]。底部沉积物是长江径流输送的陆源有机物的最终归宿, 陆源有机物在输运过程中, 以及沉降后的一段时期内, 不但要经受波浪、潮流和洋流的动力分选作用, 还要经历分解、矿化和生物作用^[3], 且不断和其他来源的有机物相混合, 形成沉积物有机物不同的分布规律^[4]。20 世纪 80 年代以来, 众多学者开展了长江及其近岸海域水体颗粒态有机物质分布、通量、来源及沉积动力过程意义等研究^[5-7], 但对底部沉积物有机碳的时空分布特征及其影响因素的研究较少^[4, 8-9]。了解底部沉积物中有机物分布特征, 有助于分析和预测长江口及其海域环境演化趋势, 解析长江口生物地球化学循环过程。

本研究旨在了解长江口及其邻近海域表层沉积物有机碳空间分布, 及其季节变化特征; 分析长江口物理、化学、沉积环境特征, 探讨长江口沉积物有机碳时空变化的主要影响因素。

1 研究区域与研究方法

1.1 调查区域和时间

长江口位于黄海和东海的分界处, 属三角洲河口, 水深一般不超过 50 m, 丰水多沙, 年径流量平均为 9 240 亿 m³。自然状态下, 5~10 月为丰水期, 冲淡水扩展范围较大, 多数月份其扩展方向不是按河口延伸方向一直指向东南, 而是在 122°10'~122°30'E 转成东北方向; 11 月至次年 4 月为枯水期, 淡水入海后沿河口方向扩展到 122°30'~123°E 区域, 然后便向舟山群岛附近海面扩散^[10]。河口东南部有台湾暖流北上, 北部有南下的黄海沿岸流和苏北沿岸流, 海流连同强大的潮流与充沛的长江冲淡水相互交汇混合, 对长江口物理化学环境要素的分布和变化产生重要影响。

调查时间为 2007 年 2 月、5 月、8 月和 11 月。调查范围在 123°20'E 以西、30°45'~32°N 之间的长

收稿日期: 2010-05-04; 修回日期: 2010-07-07

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目(KZCX1-YW-08-01); 国务院三峡工程建设委员会资助项目(SX 2004-010)

作者简介: 王华新(1984-), 女, 山东泰安人, 硕士研究生, 从事海洋生态学研究, 电话: 0532-82898594, E-mail: soswhx123@163.com; 线薇薇, 通信作者, 电话: 0532-82898594, E-mail: wwwxian@qdio.ac.cn

江口及其邻近海域, 设置调查站位 40 个(图 1)。依据长江冲淡水范围和水体悬浮物含量特征, 将该海域分为 3 个区域: 最大浑浊区(冲淡水覆盖范围内, 悬浮物含量最高): 15、16、21、22、23、28、29、30、39、40 号站; 东南海域(长江冲淡水南部偏转覆盖水域, 悬浮物含量较低): 17、18、19、20、24、25、26、27、31、32、33、34 号站; 北部海域(长江冲淡水东北部偏转覆盖水域, 悬浮物含量较低): 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14 号站。

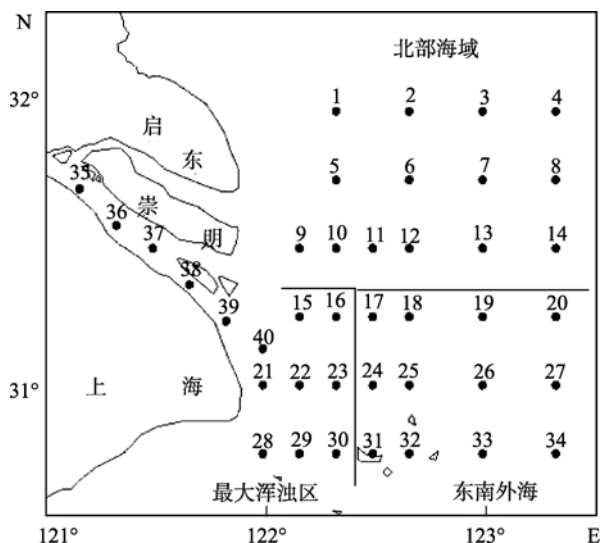


图 1 长江口调查站位图

Fig. 1 Locations of survey stations in the Changjiang estuary

1.2 样品收集和分析方法

用 Van Veen 抓斗采泥器(0.1 m²)采集长江口水域表层沉积物, 一共收集 105 个样品, 用抓斗样品的顶部 0~5 cm 做粒度分析, 采集的沉积物样品密封、冷藏, 带回实验室。沉积物样品经干燥, 研成粉末, 取 50~100 mg 于 20 mL 玻璃瓶中, 向玻璃瓶中加入过量的(2 mL)1 mol/L HCl, 将此酸化样品置于水浴中震荡, 12 h 后用去离子水洗涤至 pH 为中性, 50℃条件下干燥过夜, 然后放置在空气中至少 24 h, 待其重量达到平衡, 干燥保存。称取定量样品, 用 Flash 1112 EA 元素分析仪测定总有机碳(TOC)。

粒度分析按海洋底质调查技术规程要求进行。取适量湿样品, 先后各加入过量的 30% 的 H₂O₂ 和 0.25 mol/L 的 HCl 溶液去除有机质和碳酸盐, 离心清洗两次。加少许蒸馏水, 经超声波充分分散后在中国科学院海洋研究所用法国产 Cilas940L 激光粒度仪上进行测量。测量范围为 0.3~2 000 μm, 重复测

量的相对误差小于 2%。部分含有砾石的样品和粗砂样品, 用孔径间隔为 1/2Φ 的分样筛过筛, 粒径大于 2 000 μm 的部分采用筛析, 小于 2 000 μm 的部分采用粒度仪测量。粒级标准采用尤登-温德华氏等比制 Φ 值粒级标准。

各测站同步调查水体温度、盐度、透明度、悬浮物含量、溶解氧、pH 及营养盐等环境参数, 以及颗粒物有机碳(POC)、底栖生物量等, 样品采集和处理方法依据《海洋调查规范》(GB12763)(国家技术监督局, 1991)进行。

2 结果与讨论

2.1 底质分布特征

长江口及其邻近海域表层沉积物类型以粉砂和细砂为主, 黏土分布范围较小。不同季节长江口表层沉积物组成不同: 2 月, 长江口超过 50% 的调查站位沉积物类型为砂质, 细砂平均含量 42.70%, 黏土平均含量较低, 为 11.48%; 5 月, 长江口表层沉积粉砂含量最高, 达 47.55%, 细砂为 40.27%, 黏土含量较 2 月有所增加, 为 12.18%; 8 月长江口及其邻近海域的表层沉积物细砂、粉砂、黏土含量均值分别为 42.22%、45.74%和 12.04%, 较 5 月细砂含量有所增加, 粉砂含量下降, 黏土含量变化不大; 与其他月份相比, 11 月份表层沉积物细砂含量最高(48.07%), 黏土含量最低(10.05%)。

图 2 显示长江口表层沉积物不同组分空间分布, 以颗粒较细的黏土和颗粒较粗的细砂为例。可以看出, 黏土高分布区(含量比例超过 20%)主要位于长江口南部水域, 不同季节其分布范围有所变化: 2 月黏土高分布区向东北方向出现一狭长延伸, 5 月高分布区范围最广, 8 月其位置向南部水域推移, 11 月高分布范围缩小。长江口表层沉积物细砂主要分布在北部偏东部水域, 不同季节其分布趋势不同: 2 月出现两块高分布区, 分别在口门附近水域和东北部水域, 含量超过 65%; 5 月细砂分布组成最低, 口门附近水域、东部外侧和北部外侧水域细砂分布超过 40%; 8 月在东北部水域出现细砂含量超 80% 的高分布区; 11 月细砂高分布区范围向近岸水域扩展。

长江口及其邻近海域包括 3 个区域: 最大浑浊区, 包括河道及口门南部水域; 东南外海, 31°30'N 以南 122°30'E 以西水域; 北部海区, 31°30'N 以北水域。表 1 显示长江口不同区域表层沉积物粒度特征。可以看出, 最大混浊带表层沉积物中, 粉砂和黏土

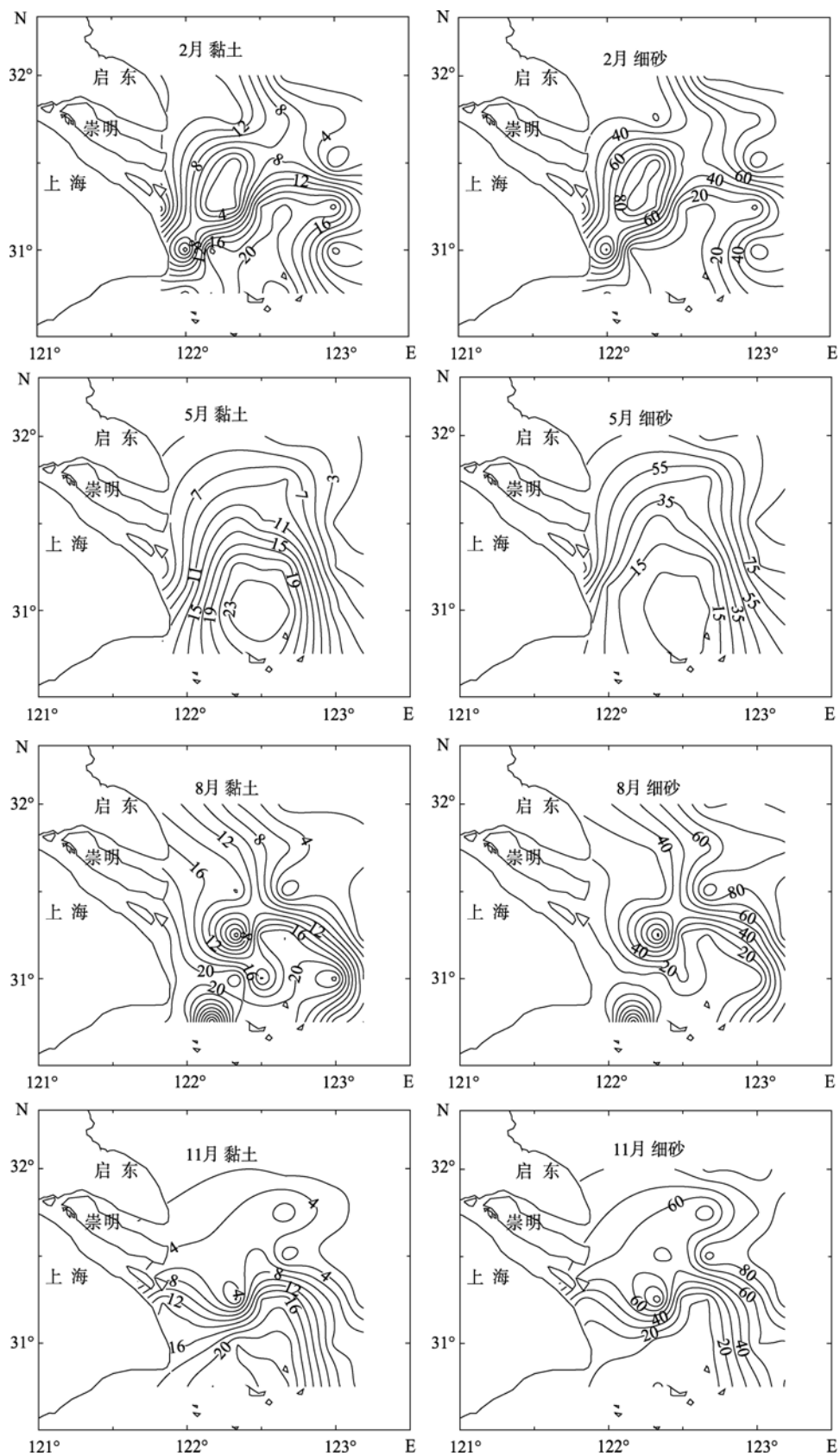


图 2 长江口表层沉积物组分空间分布

Fig. 2 Composition distributions of surface sediment in the Changjiang estuary

表 1 长江口不同海域表层沉积物粒度特征(%)
 Tab. 1 Grain sizes of surface sediment in different areas of the Changjiang Estuary (%)

海域	细砂	粉砂	黏土
最大浑浊区	19.3	63.5	17.2
东南外海	29.2	55.8	15.0
北部海域	69.3	25.5	5.17

含量最高,其次是东南沿海,而北部外海表层沉积物细砂比例最高,近 70%,黏土含量较低。长江口 31°30'N 以南水域,包括最大混浊带和东南沿海沉积物类型为黏土质粉砂,31°30'N 以北海域沉积物以砂组分为主。刘红等^[11]对长江口门附近的研究结果显示口外水域沉积物类型以黏土质粉砂为主,高建华等^[4](2007)提出长江口外东海水域主要为砂组分为主,与本研究结果一致。

2.2 沉积物 TOC 分布特征

长江口区域表层沉积物 TOC 含量介于 0.012%~1.589%(图 3),平均为 0.524%,低于孙云明等^[12]

(2002)提出的东海沉积物 TOC 含量(0.61%)。

2 月份,长江口表层沉积物 TOC 含量介于 0.123%~0.935%之间,均值 0.505%。以 31°00'N 为界,以北海域表层沉积物 TOC 含量偏低,在靠近入口的 15、16 号站附近形成内低外高的涡状低值分布区,北部 3 号站 TOC 含量最低,仅为 0.123%,东南部水域为 TOC 高分布区。

5 月份,长江口表层沉积物 TOC 含量介于 0.024%~1.517%之间,平均为 0.574%。在南部水域以 23 号站为中心形成高值区域,在东北方向舌状延伸,TOC 高分布区范围扩大。

8 月份,长江口表层沉积物 TOC 含量介于 0.147%~1.093%之间,均值 0.544%。整个海域 TOC 含量超过 0.7%的区域较 5 月有所扩大,31°30'N 以南海域 TOC 含量值都高于 0.5%,整个海域的 TOC 平面分布状况较 5 月份复杂多样。

11 月份,长江口表层沉积物 TOC 含量介于 0.012%~1.589%之间,均值 0.474%。TOC 高值区面

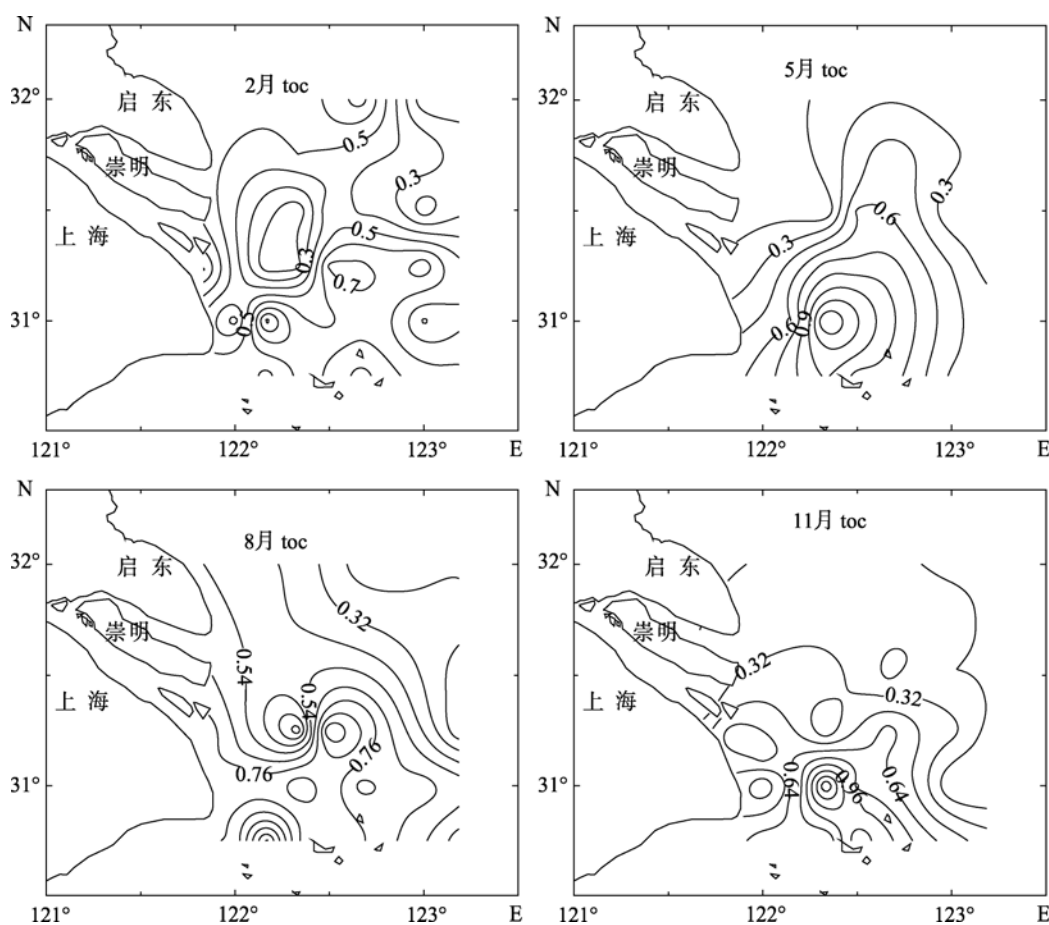


图 3 长江口表层沉积物 TOC 空间分布

Fig.3 Grain size distribution of surface sediment in the Changjiang estuary

积缩小, 而近海区 TOC 含量低值区范围扩大。可以看出, 长江口沉积物 TOC 含量以春季的 5 月最高, 11 月最低。长江口表层沉积物 TOC 高分布区主要集中在长江口东南部水域, 其范围随季节变化略有差异: 2 月 TOC 高分布区位于长江口南部偏东北水域, 5 月向北扩展, 8 月北部扩展区域略有回缩, 而高分布区向近岸和东部延伸, 11 月高分布区向南部收缩显著。

表 2 显示长江口不同水域表层沉积物分布特征。

表 2 长江口不同水域表层沉积物 TOC 含量(%)

Tab. 2 TOC contents of surface sediment in different areas of the Changjiang Estuary (%)

时间(年-月)	2007-02	2007-05	2007-08	2007-11	平均
最大浑浊区	0.613	0.756	0.728	0.737	0.709
东南外海	0.665	0.620	0.659	0.519	0.616
北部海域	0.345	0.385	0.296	0.190	0.304

2.3 TOC 分布影响因素

2.3.1 沉积物粒径

图 4 显示测定四个季节长江口表层沉积物中值粒径空间分布。将长江口表层沉积物 TOC 分布(图 3)与相对应中值粒径分布相比较, 二者高值区与低值区分布区域一致性较高, 沉积物中值粒径越大, 表层沉积物 TOC 含量越高。可以看出, 沉积物粒度是影响长江口表层沉积物 TOC 含量的重要因素。长江口南部是长江细颗粒泥沙的堆积场所, 沉积物组成主要是黏土质粉砂和粉砂质黏土, 中值粒径 $7 \sim 9 \Phi$, 由于细颗粒沉积物对有机物有着较大的富集能力^[13], 因此该区域对应的 TOC 含量较高; 北部沉积物粒度较粗, 中值粒径多在 $5 \sim 6 \Phi$, 该区域为 TOC 含量低值区。TOC 含量与中值粒径相关性分析结果显示, 二者相关关系显著($P < 0.05$), 相关系数高达 0.778。吕晓霞等^[4]、高建华等^[8]均指出长江口沉积物有机质含量与底质分布状况密切相关, 与本研究结果一致。

表 3 显示长江口各水域表层沉积物细颗粒组份季节变化, 与 TOC 季节变化趋势(表 2)对应分析, 可以看出, 除最大混浊带 5 月的变化趋势较特殊外, 其他水域二者的季节变化趋势基本一致, 表层沉积物 TOC 随沉积物组成中粗颗粒的细砂和细颗粒的黏土质粉砂组成的变化而变化。在最大混浊带, 与其他季节相比, 5 月表层沉积物 TOC 含量最高(表 2), 但其细颗粒的黏土质粉砂含量最低(表 3), 说明沉积物粒度组成是长江口表层沉积物 TOC 的季节变化的重要

最大混浊带、东南外海和北部海域表层沉积物 TOC 含量存在显著差异, 最大浑浊区和东南外海的表层沉积物 TOC 含量显著高于北部海区。最大浑浊区 80% 的站次的表层沉积物 TOC 含量高于 0.5%, 东南外海 60% 站次的 TOC 含量高于 0.5%, 而北部海区 80% 站次的 TOC 含量低于 0.5%。各水域 TOC 季节变化特征不同: 最大混浊带 2 月表层沉积物 TOC 含量最低, 5 月最高; 东南外海以 2 月最高, 11 月最低; 而北部海区 5 月 TOC 含量最高, 11 月显著低于其他月份。

驱动因素, 但在不同水域不同季节其影响程度不同。

2.3.2 水动力条件

图 5 显示长江口水体盐度空间分布特征。统计分析结果显示, 水体盐度与表层沉积物 TOC 含量相关关系不显著($P > 0.05$, 表 4)。这表明自长江口内至外, 表层沉积物中营养元素的分布并不随着水体盐度的变化而呈现出单纯的递增或递减的规律, 对盐度本身变化的响应并不显著。

水体盐度分布代表着长江口水动力条件特征, 调查水域环流体系主要包括长江径流、台湾暖流、黄海沿岸流。从各季节长江口表层沉积物粒度特征(图 3, 图 5)、TOC 空间分布(图 4)与水动力条件对应分析可以看出, 长江口水动力条件通过影响沉积物粒度特征来影响 TOC 分布: 2 月, 长江冲淡水向东扩展至 $122^{\circ}30'E$ 附近, 冲淡水覆盖范围较小, 黄海沿岸流的南压明显, 径流在 $122^{\circ}30'E$ 以东 $31^{\circ}30'N$ 处转向东北, 南部的 TOC 高分布区亦向东北方向延伸; 5 月, 随着长江入海径流量的增多, 长江冲淡水覆盖面显著扩大, 呈舌状向东偏北方向扩展, 东南外海台湾暖流顶托作用明显, 造成表层沉积物 TOC 高分布区向北延展显著, 南部分布区向近岸方向收缩; 8 月由于长江流量的进一步增加, 冲淡水覆盖面向东南部延伸, 受其影响, 表层沉积物 TOC 高分布区向东南扩展; 11 月黄海沿岸流向西延展, 北部 30 等盐线推进到 $122^{\circ}10'E$ 处, 冲淡水向南延伸, 表层沉积物 TOC 高分布区北随之显著向南推移。可以看出, 长江径流携带、搬运的有机质受到台湾暖流和黄海

沿岸流的阻隔, 在长江冲淡水锋面与台湾暖流、黄海沿岸流混合处附近沉降形成有机质高沉积区, 随各

季节水动力条件的不同, 长江口表层沉积物 TOC 的高分布区不同。

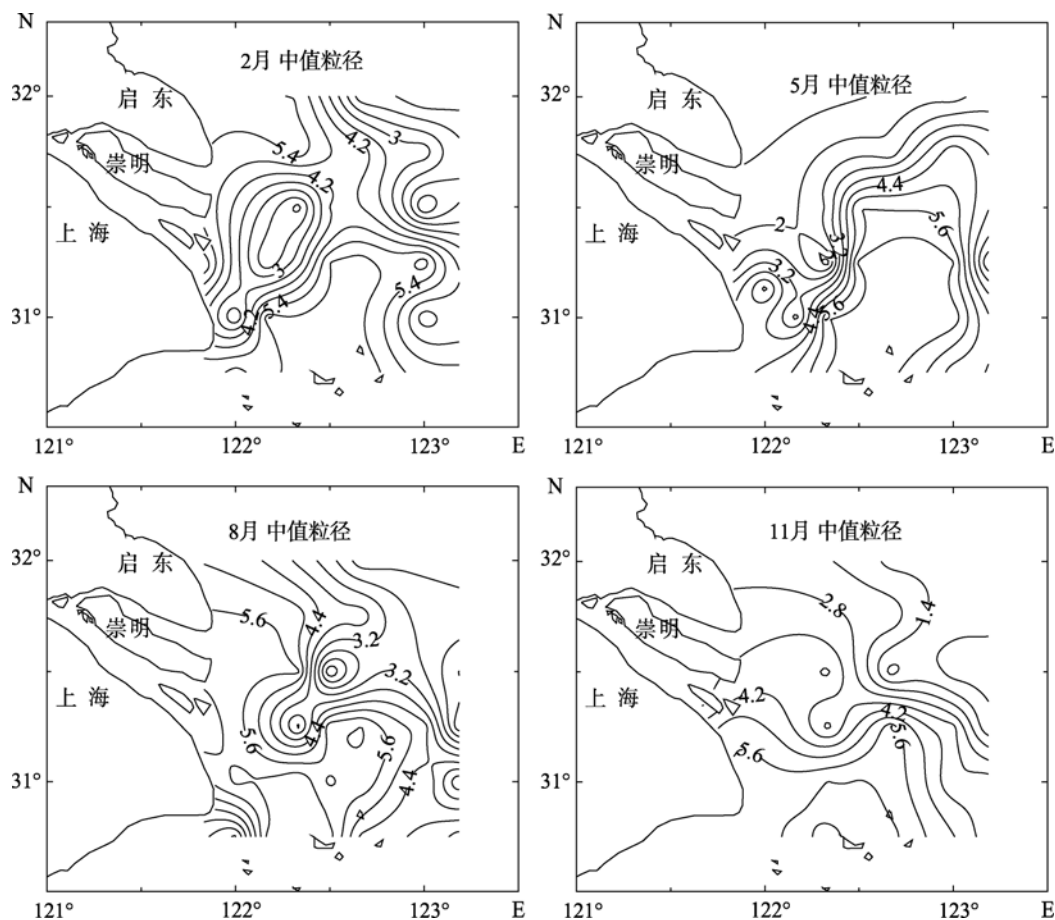


图 4 长江口表层沉积物中值粒径空间分布

Fig. 4 Medium size diameter distributions of surface sediment in the Changjiang estuary

表 3 长江口不同海域表层沉积物组成(%)

Tab. 3 Compositions of surface sediment in different areas of the Changjiang Estuary (%)

时间(年-月)	2007-02		2007-05		2007-08		2007-11	
	细砂	黏土质粉砂	细砂	黏土质粉砂	细砂	黏土质粉砂	细砂	黏土质粉砂
最大浑浊区	23.02	76.98	26.05	73.95	15.59	84.41	12.56	87.44
东南外海	18.81	81.89	33.56	66.44	30.69	69.31	33.90	66.10
北部海域	68.49	31.51	52.00	48.00	69.79	31.21	87.13	12.87

2.3.3 其他影响因素

海洋初级生产力、底栖生物活动、沉积物的悬浮和再沉降等对表层沉积物有机质分布产生一定的影响^[14]。选取叶绿素 a、底栖生物密度、水体悬浮物和 TOC 含量作为影响因子, 探讨长江口初级生产力水平、底栖生物丰度、以及沉积物与水体交换程度对表层沉积物 TOC 的作用(表 4)。研究结果显

示, 长江口表层沉积物 TOC 在 2 月与水温相关性达到显著性水平, 其他因素与 TOC 相关性均不显著, 且不同季节各因素与 TOC 相关程度不同(表 4)。这说明, 长江口表层沉积物有机质分布并不单纯由某种因素控制, 而是多种因素共同作用的结果, 要细分某种因素的作用大小, 还需要深入、细致的研究。

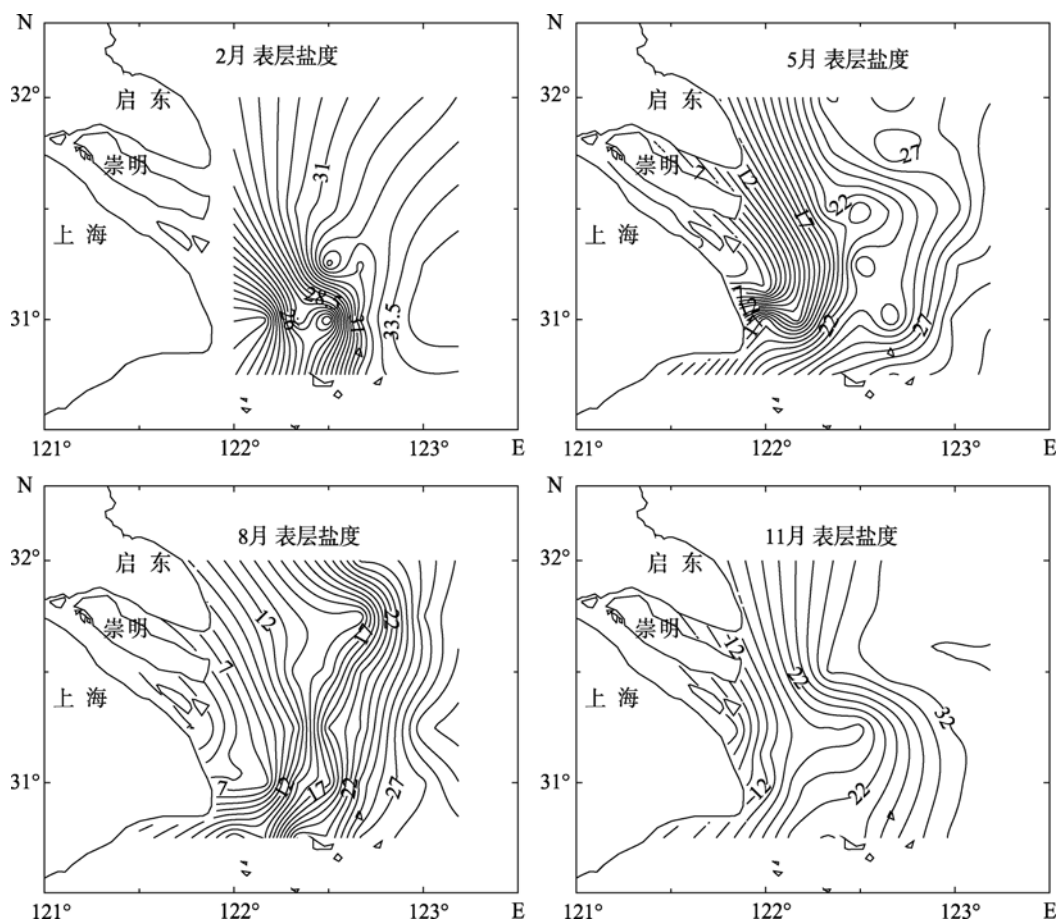


图 5 长江口水体表层盐度分布

Fig. 5 Surface salinity distributions in the Changjiang estuary

表 4 长江口表层沉积物 TOC 含量与环境因子相关关系

Tab. 4 Correlations between surface sediment TOC contents and environment factors in the Changjiang estuary

时间(年-月)	2007-02	2007-05	2007-08	2007-11
底栖生物密度	-0.054	-0.207	-0.125	-0.272
水体叶绿素 a	-0.236	-0.441	-0.13	-0.122
水体悬浮物	0.206	0.642	0.088	0.293
水体温度	0.038	0.059	0.183	-0.282
水体盐度	-0.286	-0.189	-0.326	-0.288

3 结论

(1) 长江口及其邻近海域表层沉积物类型以细砂和粉砂为主。整个海域不同季节粒度分布不同。长江口南部水域沉积物黏土含量较高,北海域粗粒度的细砂含量相对较高;

(2) 长江口区域表层沉积物 TOC 含量介于 0.012%~1.589%, 平均为 0.524%, 5 月 TOC 含量最高, 11 月最低, 空间分布具显著的季节变化特征;

(3) 最大浑浊区区域和东南海域表层沉积物

TOC 含量显著高于北部海域, 不同水域 TOC 季节变化趋势不同;

(4) 长江口表层沉积物 TOC 含量与中值粒径相关关系显著($P < 0.05$), 沉积物粒度组成是长江口表层沉积物 TOC 的季节变化的重要驱动因素, 在不同水域不同季节其影响程度不同。

(5) 长江口水动力条件通过影响沉积物粒度特征来影响 TOC 分布。长江口表层沉积物 TOC 的高分布区位于长江冲淡水锋面与台湾暖流、黄海沿岸流混合处, 分布范围随着水动力条件的季节变化。

参考文献:

- [1] Robert R L, John W D, Brain D M, et al. The effects of riverine discharge on temperature, salinity, suspended sediment and chlorophyll α in a Mississippi delta estuary measured using a flow-through system[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 74: 145-154.
- [2] 沈焕庭, 朱建荣, 吴华林, 等. 长江河口陆海相互作用界面[M]. 北京: 海洋出版社, 2008.
- [3] Rice D L, Tenore K R. Dynamics of carbon and nitrogen during the decomposition of detritus derived from estuarine macrophytes[J]. *Estuary Coastal and Shelf Science*, 1981, 13: 681-690.
- [4] 高建华, 汪亚平, 潘少明, 等. 长江口外海域沉积物中有机物的来源及分布[J]. *地理学报*, 2007, 62(9): 981-991.
- [5] Wu Y, Zhang J, Liu S M, et al. Sources and distribution of carbon within the Yangtze River system[J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2007, 71: 13-25.
- [6] Wu Y, Dittmar T, Ludwischowski K U, et al. Tracing suspended organic nitrogen from the Yangtze River catchments into the East China Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 107: 367-377.
- [7] Zhang J, Wu Y, Jennerjahn T C, et al. Distribution of organic matter in the Changjiang(yangtzeRiver)Estuary and their stable carbon and nitrogen isotopic ratios: Implications for source discrimination and sedimentary dynamics[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 106: 111-126.
- [8] 吕晓霞, 翟世奎, 牛丽凤. 长江口柱状沉积物中有机质 C/N 比的研究[J]. *环境化学*, 2005, 24(3): 255-259.
- [9] 陈庆强, 孟翊, 周菊珍, 等. 长江口盐沼滩面发育对有机碳深度分布的制约[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(1): 26-32.
- [10] 罗秉征, 沈焕庭. 三峡工程与河口生态环境[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [11] 刘红, 何青, 孟翊, 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.
- [12] 孙云明, 宋金明. 中国近海沉积物在生源要素循环中的功能[J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(1): 26-33.
- [13] Mayer L M. Surface area control of organic carbon accumulation in the continental shelf sediments [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(4): 1271-1284.
- [14] Mayer L M. Surface area control of organic carbon accumulation in the continental shelf sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1994, 58(4): 1271-1284.

Distribution of the total organic carbon of surface sediment and its influence factors in the Yangtze River Estuary

WANG Hua-xin^{1, 2}, XIAN Wei-wei¹

(1. Key Laboratory of Marine Ecology and Environment Sciences, Institute of Oceanology, Chinese Academy of Science, Qingdao 266071, China; 2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Received: May, 4, 2010

Key words: the Yangtze River Estuary; surface sediment; total organic carbon; spatial and temporal distributions

Abstract: Based on the field survey data of four sailings in the Yangtze Estuary and the adjacent waters during February, May, August, and November 2007, the total organic carbon (TOC) temporal and spatial distributions of surface sediments in the Yangtze River Estuary (YRE) were discussed, and main influence factors of surface sediments TOC were analyzed according to the physical, chemical and sedimentary features of the YRE. The results showed that the surface sediment in the YRE was mainly composed by fine sand and silt. Fine sediment mainly distributed in the southern of the survey waters. The main components of the north sea were sand. The sediment composition and distribution showed significant seasonal variations. The surface sediment TOC in the YRE was between 0.012% and 1.589%, with an average of 0.524%. Spatial distribution of TOC had season characteristics. The surface sediment TOC contents in maximum turbidity zone and southeast offshore area (122°30'E, west, 31°31'N, north of) were significantly higher than those in the northern waters. Sediment grain size was an important factor influencing the surface sediment TOC, and hydrodynamic conditions influenced spatial and temporal distribution of TOC by affecting on the sediment composition. The distribution of TOC with high levels was located at the frontal edge of Yangtze River diluted water, mixing with the Taiwan Warm Current and the Yellow Sea coastal current. High distribution area of TOC seasonally varied with the hydrodynamic conditions.

(本文编辑: 康亦兼)