

黄河三角洲北部悬浮体和颗粒有机碳的分布与影响因素

胡邦琦^{1,2}, 李国刚^{3*}, 布如源³, 李军¹, 张永明^{3,4}, 赵京涛¹ (1.青岛海洋地质研究所, 国土资源部海洋油气资源和环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071; 2.中国科学院地球环境研究所, 黄土与第四纪地质国家重点实验室, 陕西 西安 710075; 3.国家海洋局北海海洋工程勘察研究院, 山东 青岛 266033)

摘要: 2008年12月对黄河三角洲北部及其毗邻海域悬浮体浓度(SSC)和颗粒有机碳(POC)进行了研究, 并结合该海域水文资料, 分析了该区冬季SSC和POC的空间分布特征和影响因素。结果表明, 冬季研究区水体中的SSC变化范围较大(5~1064mg/L), 表、底层的SSC高值区(>600mg/L)均呈条带状分布于废弃神仙沟-钓口三角洲附近海域, 且随水深加大SSC快速降低(<50mg/L)。冬季海水中的POC变化于17~640μg/L, 表、底层POC的分布模式基本一致, 均表现为POC高值区(>400μg/L)集中于近岸海域, 渤海中部POC仅为20~50μg/L左右, 但底层POC向渤海湾中部扩散范围比表层大。POC和SSC之间存在显著正相关关系, 表明该海区近岸浅水区沉积物再悬浮是影响研究区POC空间分布的重要原因。冬季SSC和POC高值区与最大侵蚀区、波致底切应力>0.2N/m²的区域相对应, 表明在冬季强海洋动力条件下, 废弃神仙沟-钓口三角洲叶瓣前缘不仅是沉积物的“源”, 也同样是颗粒有机碳的“源”。

关键词: 渤海; 黄河三角洲; 冬季; 悬浮体; 颗粒有机碳

中图分类号: X142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)06-1069-06

Distribution of suspended sediment and particulate organic carbon of the northern Huanghe Delta in winter in China. HU Bang-qi^{1,2}, LI Guo-gang^{3*}, BU Ru-yuan³, LI Jun¹, ZHANG Yong-ming^{3,4}, ZHAO Jing-tao¹ (1.Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Ministry of Land and Resources, Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China; 2.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China; 3.Marine Engineering and Prospecting Institute of North China Sea, State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China). *China Environmental Science*, 2012,32(6): 1069~1074

Abstract: In Dec. 2008, a total of 137 samples were collected from 34 stations off the northern Huanghe Delta to analyze the suspended sediment concentration (SSC) and particulate organic carbon (POC). The results show that the SSC varied between 5~1064mg/L, both the surface and bottom high SSC zone (>600mg/L) located parallel to the coastline along the delta coast of the abandoned Diaokou-Shenxiangou river mouth. The SSC decreased dramatically seaward with increasing water depth. The POC ranged from 17 to 640mg/L, with similar distribution pattern in surface and bottom layers. The high POC zone also located along the delta coast, however, this zone extended even further in the bottom layer, from the Diaokou mouth area to the central Bohai Bay. A significant positive correlation existed between POC and SSC, suggesting that the source of suspended sediments was an important factor for the POC. In winter, the high zones of SSC and POC were correlated well with the erosion center and the high wave-induced bottom shear stress (>0.2N/m²) off the abandoned Diaokou river mouth. This study suggests that the delta coast areas off the abandoned Diaokou-Shenxiangou river mouth were not only the major source of SSC, but also the POC, most likely caused by the strongly winter storm waves.

Key words: Bohai Sea; Huanghe Delta; winter; suspended sediment; particulate organic carbon

海洋是地球上最大的碳储库,全球河流每年携带总量约为216Tg的颗粒有机碳入海,其在海洋沉积物中的埋藏和转换是全球碳循环中的关键环节^[1]。陆架边缘海是陆地和海洋的连接带,尽管仅占全球海洋总面积8%左右,但受日益加剧

收稿日期: 2011-10-20

基金项目: 我国近海海洋综合调查与评价专项(908-01-CJ04);海洋公益性行业科研专项(200805063);黄土与第四纪地质国家重点实验室开放基金项目(SKLLQG1107);国家自然科学基金资助项目(40976036,40906033)

* 责任作者, 工程师, lotus.olive@126.com

的人类活动影响和河流输入的大量陆源物质供应,其生物地球化学循环比较复杂.同时,由于地理位置(纬度、气候等)及相关的生态结构差异导致近海存在碳源汇的季节性差异,已成为全球陆架边缘海碳循环问题研究的难点和焦点问题之一^[1-3].海水中的颗粒有机碳(POC)一般是指直径大于 $0.45\mu\text{m}$ 的有机碳,包括海洋中有生命和无生命的悬浮颗粒和沉积物颗粒.颗粒有机碳不但与生物的生命过程、初级生产力关系紧密,也是海水中碳固化和迁移的主要形式^[2-3].此外,总有机碳是衡量水体有机污染程度的一项综合指标,对海洋有机污染起指示作用.

黄河是我国第二大河,平均每年携带大约 11 亿 t 泥沙和 $1.8\sim 8.1\text{Tg}$ 颗粒有机碳入海,是中国东部陆架边缘海主要的陆源物质和有机碳供应者之一,对中国东部陆架海区乃至整个西北太平洋海域的生态系统均有较大的影响^[4-6].黄河口及其毗邻海域的颗粒有机碳组成和分布特征已引起广泛关注^[5,7-15].黄河三角洲邻近海域受东亚季风气候的影响,海洋动力条件季节性

差异明显^[16],冬季海洋气候恶劣限制了海上调查工作的开展,因此该海域冬季实测悬浮体和颗粒有机碳资料较为缺乏.研究表明黄河三角洲毗邻海域沉积物扩散主要发生在冬季^[16].因此,本文利用 2008 年 12 月在黄河三角洲北部及毗邻海域进行的水文调查所获取的资料,对该海区冬季悬浮体和颗粒有机碳的分布特征和影响因素进行了研究,这对加深边缘海特别是水下三角洲地区的碳埋藏及其季节性转换具有重要的科学意义.

1 研究区概况

研究区贯穿渤海东西,涵盖渤海湾南部、渤海中央海区,东面与渤海海峡相邻(图 1).黄河是该区主要的陆源物质供应者,历史上每年携带约 11 亿 t 的泥沙入海,由于黄河含沙量大($>25\text{kg}/\text{m}^3$),常造成下游河道淤积,尾闾河道摆动频繁.自 20 世纪 50 年代以来,黄河先后由神仙沟、钓口流路向北流入渤海,1976 年改道清水沟流路后口门向东.黄河入海水沙存在明显的季节性差异,主要集中在汛期.

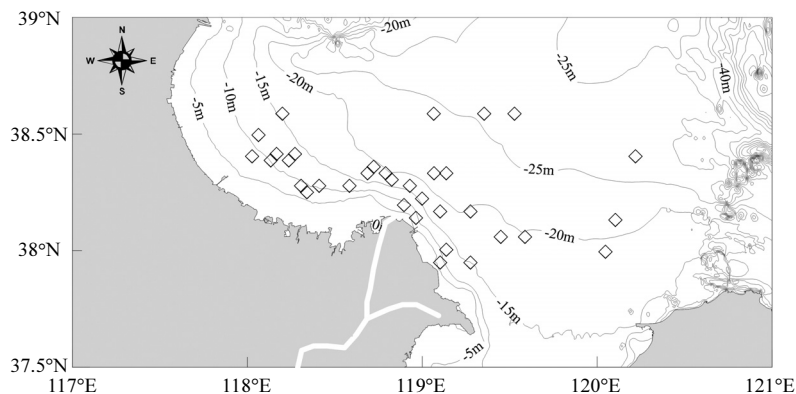


图 1 研究区地理位置、水深及样品站位

Fig.1 Map of sampling locations and water depth

黄河口门位置频繁变迁,岸线演变剧烈,导致不同时期的近岸水流存在较大差异,但在离岸较远处仍可以显示出比较稳定的海流,主要由东北偏北向环流,渤海湾内逆时针环流和渤海湾南部顺时针环流组成^[17].研究区主要的海洋动力因素除海洋环流之外,还包括潮流、风浪等.受东亚冬季风的影响,冬半年盛行偏北向浪,在黄河水下三

角洲坡脚形成强大的底应力,形成两个高能强流速区,分别位于神仙沟口外和清水沟老河口外,最大流速中心带都在海岸的坡脚转折范围($10\sim 15\text{m}$ 水深)^[18].

2 样品采集与分析

2008 年 12 月在黄河三角洲北部及毗邻海域

进行悬浮体样品采集,共获得 34 个站位共 137 个样品(图 1)。悬浮体采样使用 ALEC 公司的 Water-SampLer 自容式 CTD 采水器,采水层根根据水深确定,一般采集五层。该 CTD 采水器能同时测量悬浮体的温度、盐度、水深、叶绿素等要素。其中,叶绿素测试方法为荧光测量,测量范围为 $0\sim 400\mu\text{g/L}$,分辨率为 $0.01\mu\text{g/L}$,精度为 $\pm 1\%$ 。每个站位进行两次采样,分别使用孔径为 $0.45\mu\text{m}$ (悬浮体浓度)和 $0.7\mu\text{m}$ 滤膜(颗粒有机碳)在现场利用真空过滤器过滤。过滤后滤膜放入冷冻库中低温保存,直至室内进行分析。采用干式燃烧法测量进行颗粒有机碳(POC)分析,具体流程见文献[15]。

3 结果

由图 2 可见,研究区表、底层温度分布基本一致,均表现为渤海中部海域较高,向西递减,在黄河三角洲河口附近和渤海湾中部海域存在低温区($<2^{\circ}\text{C}$)。研究区表、底层盐度分布也近乎一致,表现为近岸盐度低($<31.5\text{‰}$),向外海盐度逐步增高的整体趋势(图 3)。研究区表、底层的叶绿素浓度均较低,高值区均局限在近岸(图 4)。

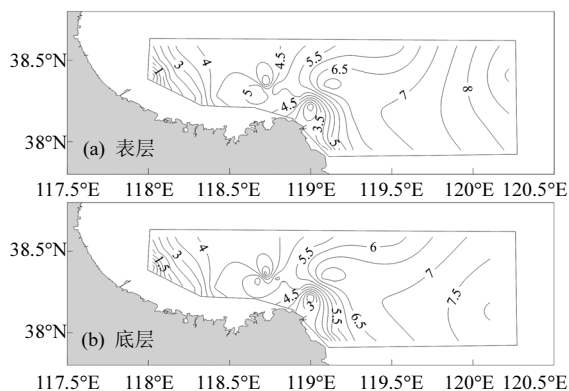


图 2 研究区表层和底层温度($^{\circ}\text{C}$)分布

Fig.2 Distribution pattern of temperature($^{\circ}\text{C}$) in the surface and bottom layers over the study area

由图 5 可见,研究区表层悬浮体浓度介于 $5\sim 956\text{mg/L}$ 之间,均值为 264.1mg/L 。悬浮体浓度高值区位于黄河河口附近,其浓度接近 1000mg/L ,并向海快速降低,在渤海中部悬浮体浓度较低,小

于 50mg/L 。底层悬浮体浓度介于 $6\sim 1064\text{mg/L}$ 之间,均值为 420mg/L 。底层悬浮体浓度高值区与表层一致,但分布范围有向渤海湾中部扩散的趋势,渤海中部底层悬浮体浓度同样很低。

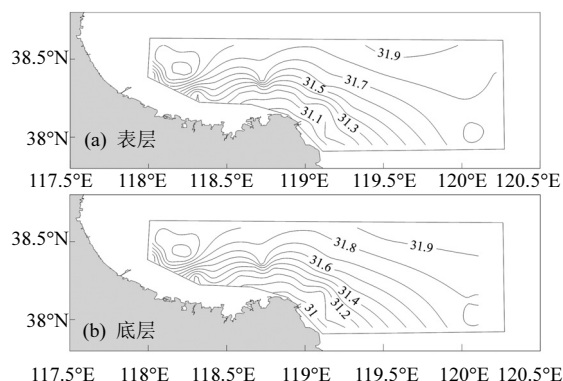


图 3 研究区表层和底层盐度(‰)分布

Fig.3 Distribution pattern of salinity(‰) in the surface and bottom layers over the study area

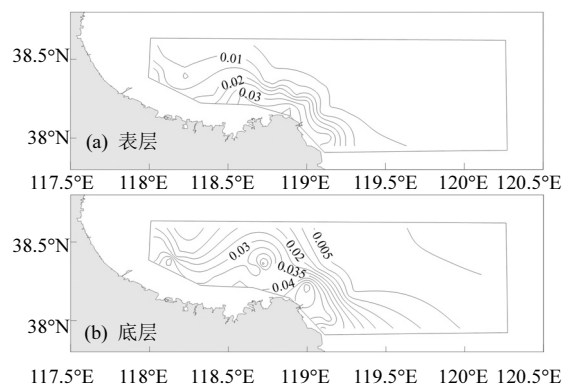


图 4 研究区表层和底层叶绿素-a ($\mu\text{g/L}$)分布

Fig.4 Distribution pattern of Chlorophyll-a($\mu\text{g/L}$) in the surface and bottom layers over the study area

由图 6 可见,研究区表层颗粒有机碳(POC)浓度为 $25\sim 500\mu\text{g/L}$,均值为 $226\mu\text{g/L}$ 。表层 POC 高值区位于近岸海域,以河口附近海域最为突出,最高值可达 $500\mu\text{g/L}$,向海方向快速降低,在渤海中部仅为 $20\sim 50\mu\text{g/L}$ 。底层 POC 浓度为 $17\sim 640\mu\text{g/L}$,均值为 $300\mu\text{g/L}$ 。底层 POC 的高值区也局限于研究区西部,在河口附近海域 POC 可达 $400\mu\text{g/L}$ 以上,POC 在底层高值区范围明显比表层大;在渤海中部 POC 浓度较低,仅为 $30\sim 60\mu\text{g/L}$ 。

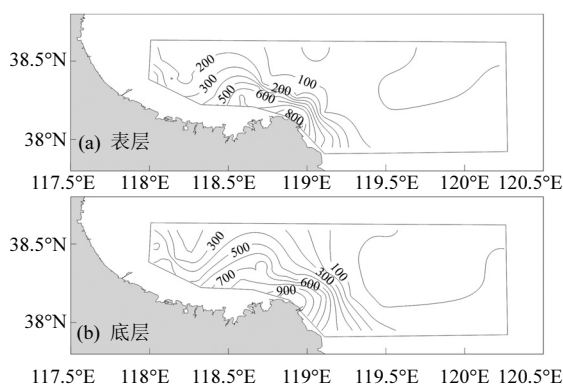


图5 研究区表层和底层悬浮体(mg/L)浓度分布

Fig.5 Distribution pattern of suspended sediment concentration (SSC) (mg/L) in the surface and bottom layers over the study area

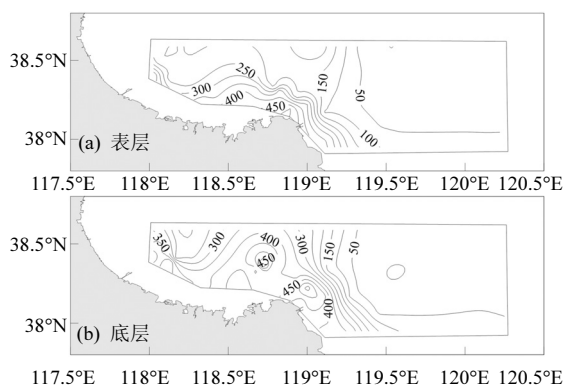


图6 研究区表层和底层颗粒有机碳(μg/L)分布

Fig.6 Distribution pattern of particulate organic carbon (POC)(μg/L) in the surface and bottom layers over the study area

主要来自长江径流和沉积物的再悬浮^[22],同时冬季东海中陆架砂质区的 POC 垂直分布呈现出底层高于表层的现象,与海洋动力环境密切相关^[23].黄海再悬浮沉积物在底层悬浮体浓度可占 90%以上,因此也可能是 POC 一个重要来源^[24].蔡阿根等^[25]在九龙江口附近海域颗粒有机碳的研究中发现,在海底水动力环境较强或底栖生物扰动频繁的海区,由于海底沉积物的再悬浮,底层水体的 POC 含量明显增大.

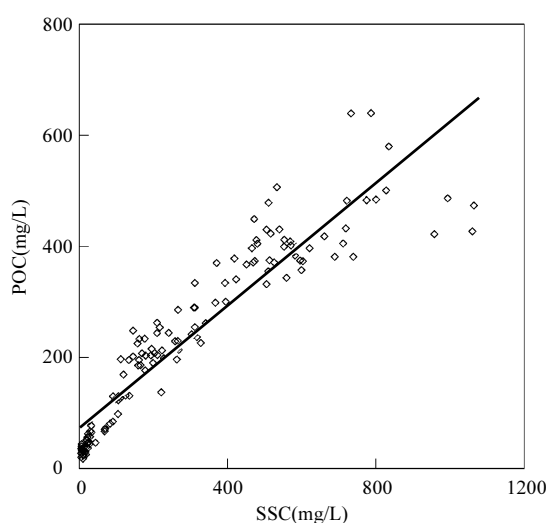


图7 研究区悬浮体浓度和颗粒有机碳浓度相关性

Fig.7 Correlations between concentration of SSC and POC

SSC 和 POC 平面分布最为突出的特征就是在废弃神仙沟-钓口三角洲叶瓣附近海域存在明显的高值区,两者之间存在明显的一致性(图 5 和图 6).SSC 和 POC 之间存在显著正相关关系($R^2=0.87$,图 7),这表明冬季研究区的 SSC 是控制 POC 变化的主要因素.颗粒中有机碳的质量分数(POC%)是悬浮体的一个重要特征指标,可以根据这种性质来判断其来源,含量相似说明其来源具有单一性,POC%波动范围大则说明悬浮体具有不同的来源.如图 8 所示,研究区表、底层 POC%变化区间大致相同,均值分别为 1.36%和 1.24%,这表明该区冬季悬浮体可能为单一来源.POC%均值和变化幅度均低于夏季渤海湾北部悬浮体中的 POC%(均值 4%~8%)^[14]和夏季黄

4 讨论

4.1 悬浮体与颗粒有机碳的相关性

海水中的颗粒有机碳(POC)来源多样,按来源途径可划分为陆源(通过河流、大气沉降输入)、海源(海洋生物的生产)、海底沉积物的再悬浮以及溶解有机碳(DOC)的转化等^[19].同时,POC 的垂直和水平分布又受多种因素共同影响,如河流输入、海洋环流、营养盐及生物活动等,导致其含量和组成在不同海区、不同层位差异较大.研究表明,海底再悬浮沉积物在我国近岸及陆架海区是 POC 的一个重要来源^[20-21].东海秋季 POC

河口毗邻海域悬浮体 POC%(均值 2%~3%)^[15]. 进一步分析发现, POC% 随 SSC 增高快速降低, 当 $SSC > 200 \text{ mg/L}$ 时, POC% 大致保持在 1% 左右(图 9). 海水中 POC% 与 SSC 的关系主要受两个因素的控制, 其一随着 SSC 降低, 水体透光度增强, 有利于浮游植物的生长, 从而海源有机碳对 POC 贡献增大, POC% 也会随之降低; 其二, 海洋动力对悬浮体的淘选作用, 也可能使得 POC% 随 SSC 降低而增加.

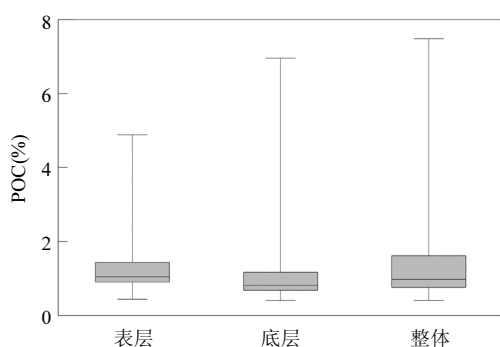


图 8 研究区表、底层颗粒有机碳百分含量变化

Fig.8 Percentage contents of POC% in the surface and bottom water Layer

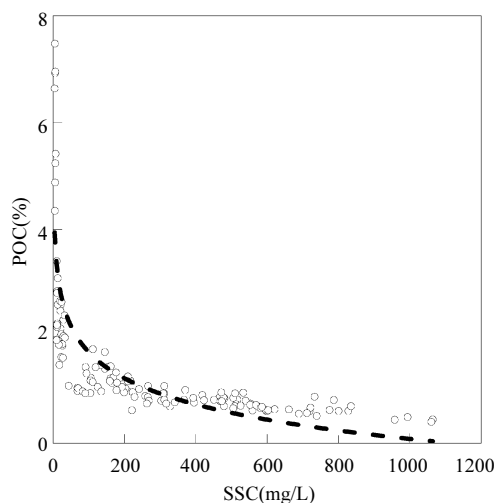


图 9 研究区悬浮体浓度和颗粒有机碳含量相关性

Fig.9 Correlations between concentration of SSC and POC%

4.2 悬浮体与颗粒有机碳空间分布的影响因素

LANDSAT 卫星遥感图像显示在废弃神仙

沟-钓口三角洲叶瓣附近海域存在着稳定的高浑浊区^[26], 即图 5 中 SSC 高值区, 与现行河口三角洲之间被一低浑浊区所间隔, 基本不受现行河口入海泥沙的季节性变化影响^[27]. Yang 等^[16]发现冬季黄河口以北悬浮体通量(SSF)大致沿岸线指向东南, 仅在神仙沟口附近指向东北-东; 夏季黄河口以北悬浮体通量(SSF)大致指向东北, 证实了现行黄河入海泥沙主要向东、东南方向运移, 而向西北输送较少. 这表明废弃神仙沟-钓口三角洲叶瓣附近海域高浑浊带主要是近底泥沙在动力作用下的再悬浮所致, 而非现行黄河入海泥沙扩散的结果^[27-28].

自 1976 年黄河尾间河道由刁流路改道清水沟流路以来, 由于沉积物供应断绝, 废弃神仙沟-钓口三角洲叶瓣由向海淤进转为快速向岸蚀退, 形成了一个弯月状的沿岸侵蚀区, 最大侵蚀深度可达 5~8m, 其中最大侵蚀区位置与波致底切应力超过 0.2 N/m^2 的区域相吻合, 也与本研究 SSC 和 POC 的高值区相对应(图 5 和图 6), 这表明波浪过程是废弃神仙沟-钓口三角洲海岸侵蚀和近底沉积物再悬浮的主要控制性动力机制^[27-28]. 王厚杰等^[28]指出废弃神仙沟-钓口三角洲叶瓣附近的浅水区域($< 10 \text{ m}$)由波浪过程导致的粉砂通过再悬浮进入浮泥层, 在重力控制下沿水下底坡向深水输送并在深水区($> 10 \text{ m}$)沉积. 对比研究区 2008 年 12 月份的表、底层 SSC(POC)空间分布趋势, SSC(POC)在底层的高值区范围明显高于表层, 有向渤海湾中部扩散的趋势, 指示部分浅水区域再悬浮沉积物(包括 POC)同样有从底层向渤海湾汇聚的趋势, 表明冬季强海洋动力条件下, 废弃神仙沟-钓口三角洲叶瓣前缘不仅是沉积物的“源”, 也同样是颗粒有机碳的“源”.

5 结论

5.1 冬季黄河三角洲北部及其毗邻海域 SSC 变化范围较大(5~1064mg/L), 表、底层的 SSC 高值区($> 600 \text{ mg/L}$)均呈条带状分布于废弃神仙沟-钓口三角洲附近海域, 随水深加大 SSC 快速降低.

5.2 研究区冬季海水中的 POC 变化于 17~640 $\mu\text{g/L}$, 表、底层 POC 的分布模式基本一致, 均

表现为高值区($>400\mu\text{g/L}$)集中于近岸海域,在渤海中部仅为 $20\sim 50\mu\text{g/L}$ 左右,但底层 POC 向渤海湾中部扩散范围比表层大。

5.3 POC 和 SSC 之间存在显著正相关关系,表明该海区近岸浅水区沉积物再悬浮是影响研究区 POC 空间分布的重要原因。冬季 SSC 和 POC 高值区与最大侵蚀区、波致底切应力 $>0.2\text{N/m}^2$ 的区域相对应,表明在冬季强海洋动力条件下,废弃神仙沟-钓口三角洲叶瓣前缘不仅是沉积物的“源”,也同样是颗粒有机碳的“源”。

参考文献:

- [1] Cai W J. Estuarine and coastal ocean carbon paradox: CO_2 sinks or sites of terrestrial carbon incineration? [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2011,3(1):123-145.
- [2] 胡敦欣,杨作升.东海海洋通量关键过程 [M]. 北京:科学出版社,2001.
- [3] 高学鲁,宋金明,李学刚,等.中国近海碳循环研究的主要进展及关键影响因素分析 [J]. *海洋科学*, 2008,32(3):83-90.
- [4] Milliman J D, Syvitski J P M. Geomorphic/tectonic control of sediment transport to the ocean: the importance of small mountainous rivers [J]. *Journal of Geology*, 1992,100:525-544.
- [5] 蔡德陵,蔡爱智.黄河口区有机碳同位素地球化学研究 [J]. *中国科学(B 辑)*, 1993,23(10):1105-1113.
- [6] Schlünz B, Schneider R R. Transport of terrestrial organic carbon to the oceans by rivers: re-estimating flux- and burial rates [J]. *International Journal of Earth Sciences*, 2000,88(4):599-606.
- [7] Bigot M, Salot A, Cui X, et al. Organic geochemistry of surface sediments from the Huanghe estuary and adjacent Bohai Sea (China) [J]. *Chemical Geology*, 1989,75(4):339-350.
- [8] Zhang S, Gan W B, Ittekkot V. Organic matter in Large turbid rivers: the Huanghe and its estuary [J]. *Marine Chemistry*, 1992,38(1/2):53-68.
- [9] Cauwet G, Mackenzie F T. Carbon inputs and distribution in estuaries of turbid rivers: the Yangtze and Yellow rivers (China) [J]. *Marine Chemistry*, 1993,43(1-4):235-246.
- [10] Yuan H, Liu Z, Song J, et al. Studies on the regional feature of organic carbon in sediments off the Huanghe River Estuary waters [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2004,23(1):129-134.
- [11] 张龙军,张向上,王晓亮,等.黄河口有机碳的时空输运特征及其影响因素分析 [J]. *水科学进展*, 2007,18(5):674-682.
- [12] 张龙军,徐雪梅,何会军.黄河不同粒径悬浮物中 POC 含量及输运特征研究 [J]. *环境科学*, 2009,30(2):342-347.
- [13] 张龙军,姜波,张向上,等.基于泥沙中碳含量的变化表征黄河调水调沙入海泥沙的扩散范围 [J]. *水科学进展*, 2008,19(2): 153-159.
- [14] 胡利民,邓声贵,郭志刚,等.夏季渤海湾及邻近海域颗粒有机碳的分布与物源分析 [J]. *环境科学*, 2009,30(1):39-46.
- [15] 乔淑卿,石学法,白亚之,等.黄河口及邻近渤海海域悬浮体和沉积物中有机碳、氮的分布特征及其影响因素 [J]. *沉积学报*, 2011,29(2):354-362.
- [16] Yang Z, Ji Y, Bi N, et al. Sediment transport off the Huanghe (Yellow River) delta and in the adjacent Bohai Sea in winter and seasonal comparison [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011,93(3):173-181.
- [17] 赵保仁,庄国文,曹德明,等.渤海的环流、潮流及其对沉积物分布的影响 [J]. *海洋与湖沼*, 1995,26(5):466-473.
- [18] 王厚杰.黄河口悬浮泥沙输送三维数值模拟 [D]. 青岛:中国海洋大学,2002.
- [19] 张乃星,宋金明,贺志鹏.海水颗粒有机碳(POC)变化的生物地球化学机制 [J]. *生态学报*, 2006,26(7):2328-39.
- [20] Hoshika A, Tanimoto T, Mishima Y, et al. Variation of turbidity and particle transport in the bottom layer of the East China Sea [J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2003,50(2):443-455.
- [21] Zhu Z Y, Zhang J, Wu Y, et al. Bulk particulate organic carbon in the East China Sea: Tidal influence and bottom transport [J]. *Progress in Oceanography*, 2006,69(1):37-60.
- [22] 刘文臣,王荣,吉鹏.东海颗粒有机碳的研究 [J]. *海洋与湖沼*, 1997,28(1):39-43.
- [23] 赵继胜,姬泓巍,郭志刚.冬季东海典型海域颗粒有机碳的垂直分布 [J]. *海洋科学*, 2003,27(6):59-63.
- [24] 张岩松,章飞军,郭学武,等.黄海夏季水域沉降颗粒物垂直通量的研究 [J]. *海洋与湖沼*, 2004,35(3):231-238.
- [25] 蔡阿根,李文权,陈清花,等.厦门西港和九龙江口颗粒有机碳的研究 [J]. *海洋科学*, 2003,5:46-50.
- [26] 范兆木,郭永盛.黄河三角洲沿岸遥感动态分析图集 [M]. 北京:海洋出版社,1992.
- [27] Bi N, Yang Z, Wang H, et al. Sediment dispersion pattern off the present Huanghe (Yellow River) subdelta and its dynamic mechanism during normal river discharge period [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010,86(3):352-362.
- [28] 王厚杰,原晓军,王燕,等.现代黄河三角洲废弃神仙沟-钓口叶瓣的演化及其动力机制 [J]. *泥沙研究*, 2010,(4):51-60.

作者简介: 胡邦琦(1983-),男,安徽绩溪人,助理研究员,主要从事海洋沉积和环境变化研究.发表论文 10 篇。