

夏季渤海湾及邻近海域颗粒有机碳的分布与物源分析

胡利民, 邓声贵, 郭志刚*, 刘勇

(中国海洋大学海底科学与探测技术教育部重点实验室, 青岛 266100)

摘要: 根据2006年8月在渤海湾及其邻近海域41个站位取得的155个样品的颗粒有机碳(POC)和颗粒氮(PN)的分析数据, 结合同步获得的水文环境要素资料, 分析了该区夏季POC和PN的空间分布特征、影响因子与有机碳物源。结果表明, 夏季水体中POC的浓度为155.9~1363.1 $\mu\text{g/L}$, 平均浓度为429.5 $\mu\text{g/L}$; PN的浓度为26.2~225.5 $\mu\text{g/L}$, 平均浓度111.5 $\mu\text{g/L}$ 。POC与PN的空间分布特征一致, 呈现近岸高、远岸低、表层低、底层高的特点。生物作用、水体温盐跃层和总悬浮颗粒物(TSM)是影响研究区POC空间分布的重要原因。POC与TSM的相关分析表明, POC与TSM之间具有正相关关系, 不同来源的TSM是控制水体中POC浓度高低的重要因素。本区POC/PN的比值范围为3.4~7.0, 但这一物源指标的应用受到海水中颗粒无机氮(PIN)的影响。通过建立POC和PN的一元线性回归模型, 估算了样品中PIN的含量。扣除样品中PIN的影响后, 本研究区的POC/PON(颗粒有机氮)比值范围介于5.5~19.8之间, 显示POC除了海洋生物为主要来源外, 周边河流的陆源输入也有重要贡献。这一研究方法对认识中国近海的POC物源具有一定的参考价值。

关键词: 颗粒有机碳; 颗粒氮; 物源; 生物作用; 渤海

中图分类号: X142 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2009)01-0039-08

Distribution and Source of Particulate Organic Carbon in the Bohai Bay and Its Adjacent Bohai Sea, China

HU Li-min, DENG Sheng-gui, GUO Zhi-gang, LIU Yong

(Key Laboratory of Submarine Geosciences and Prospecting Techniques, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the analysis of particulate organic carbon (POC) and particulate nitrogen (PN) of the 155 samples collected from the 41 stations in the Bohai Bay and its adjacent sea, during the summer period in 2006, combining with the data of environmental hydrology, the spatial distributions, influential factors and source of POC and PN were discussed. The results show that the concentrations of POC and PN range from 155.9 $\mu\text{g/L}$ to 1363.1 $\mu\text{g/L}$, 26.2 $\mu\text{g/L}$ to 225.5 $\mu\text{g/L}$, with average values of 429.5 $\mu\text{g/L}$ and 111.5 $\mu\text{g/L}$, respectively. The spatial distribution patterns of POC and PN are similar in the study area. The concentrations of POC and PN in the coastal areas are higher than those in the outer shelf, and the concentrations of POC and PN are higher at the bottom water layers than those at the surface water layers. Biological effect, thermocline and concentration of TSM are the main factors affecting the spatial distribution of POC. There exists a positive correlation between POC and TSM, indicating that the source of TSM is an important factor for the POC. The POC/PN ratio varies from 3.4 to 7.0, but this result is influenced by the presence of particulate inorganic nitrogen (PIN). According to the univariate linear regression model between POC and PN, the concentrations of PIN in the samples were evaluated. Removing the content of PIN in the samples, the POC/PON ratio ranges from 5.5 to 19.8 (PON = PN - PIN), suggesting that the terrestrial input originating from the nearby rivers is also an important source of POC, in addition to the major contribution from the marine primary production. This method could be applied to identify the source of POC in other coastal areas of China.

Key words: particulate organic carbon; particulate nitrogen; source; biological effect; Bohai Sea

全球碳循环是国际地圈-生物圈计划(IGBP)的核心问题之一。全球化石燃料燃烧每年以 CO_2 形式向大气排放的碳约为6 Gt, 其中海洋吸收 CO_2 的碳量为2.2 Gt/a, 约占人类排放总量的1/3左右^[1], 因此海洋在碳的源-汇研究中起着至关重要的作用。陆架边缘海, 尽管只占全球海洋总面积的7.6%, 但由于其生物生产力比较高, 它作为陆海相互作用的关键区域在全球碳循环的研究中同样也扮演着重要的角色^[2]。

海水中有有机碳主要以溶解有机碳(DOC)和颗粒

有机碳(POC)形式存在, 其中POC占海洋有机碳总量的10%左右, 它与生物的生命过程、初级生产力密切相关, 是海洋及河流等水体中碳固化和迁出的主要形式^[3,4]。有关东中国海陆架POC的研究已经有一些报道, 如刘占飞等^[5]对东海台湾海峡附近POC的分布和影响因素及季节变化作了论述。

收稿日期: 2008-01-07; 修订日期: 2008-03-11

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2005CB422304); 国家自然科学基金项目(40776062); CJ02区块海底底质调查与研究项目(908-01-CJ02)

作者简介: 胡利民(1983~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为海洋地球化学, E-mail: huliminouc@gmail.com

* 通讯联系人, E-mail: guozgg@ouc.edu.cn

Huang 等^[3]探讨了东海南部、台湾岛北部 POC 在中层水中由陆架向外海侧向传输的过程. 赵继胜等^[6]从底界面研究出发, 探讨了东海不同沉积区水体 POC 的垂直分布特征. Wu 等^[7]的研究显示 POC 在长江口的浓度大于长江干流的浓度, 并有着向海减少的趋势. Zhang 等^[8]重点研究了长江口的悬浮颗粒、沉降颗粒、及沉积物中的稳定碳、氮同位素比值在物源识别和沉积动力上的指示作用. 这些研究主要集中在黄海和东海, 对于渤海的 POC 研究还鲜见报道.

渤海是一个半封闭的陆架海, 沿岸河流众多, 黄河、海河、辽河 3 条主要河流分别注入莱州湾、渤海湾、辽东湾. 流入渤海湾的海河水系包括蓟运河、永定河、大清河等 7 条河流, 是我国的七大水系之一, 流域面积达 31.8 万 km², 流域人口约 1.176 亿^[9]. 河流带来了大量的淡水和丰富的营养盐, 同时也将人类排放的污染物带入渤海湾及其邻近海区, 导致海水质量下降, 部分水质和底泥的环境污染程度日趋严重, 进而对整个渤海的生态系统产生重要影响^[10, 11]. 本研究依据 2006 年 8 月在渤海湾及其邻近海域取得的悬浮颗粒物样品, 对这一海区夏季的 POC 空间分布特征、物源及其影响因子进行了探讨, 这对认识陆架边缘海碳的源与汇及其生物地球化学过程有着重要意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

于 2006 年 8 月在渤海湾附近区域用 2 500 mL 有机玻璃采水器分层取样, 采样站位如图 1 所示, 共 41 个站位, 其中除了外围的 10 个站位 (B3 ~ B12) 外, 大部分站位都位于渤海湾内. 每个站位保证采集到 3 层水体的样品, 即表层、中层 (0.6 深度层)、底层, 一般取样为 5 ~ 7 层水体. 使用多参数环境监测系统 AAQ1183 (Alec, 日本) 同时获得水体的温度、盐度、浊度、叶绿素 a 等环境水文参数. 采集到的海水样品使用 Whatman GF/F 玻璃纤维滤膜 (0.45 μm , 直径 47 mm, 预先在 450℃ 下灼烧过 6 h) 进行抽滤, 1 000 mL 水样经过滤后, 以少量的去离子水洗盐, 然后滤膜立即置于 -20℃ 冰柜冷冻保存至分析.

1.2 分析方法

样品分析在中国科学院广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室完成, 样品处理按 GB/T 12763 海洋调查规范的方法进行. 先将滤膜低温解冻并干燥至恒重, 用 10⁻⁵ g/g 的电子分析天平称量得

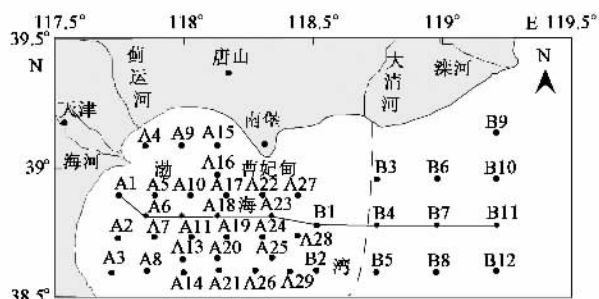


图 1 研究区域及采样点站位

Fig.1 Study area and sampling stations

到带有悬浮体的滤膜的总重量后, 减去空白膜的重量, 即得到总悬浮颗粒物 (TSM) 的重量. 然后将滤膜置于密闭干燥器内经浓盐酸熏蒸 12 h 以去除无机碳, 之后于 50℃ 下低温烘干 24 h 以去除剩余盐酸和水分. 将处理好的膜样用锡舟包裹于 Vario EL-III 型 (德国, Elementar) 元素分析仪上同时测定 POC 和 PN 的含量. 每个样品测定 2 个平行样, 取其平均值. 每 20 个样品运行 1 个标准样品以检测仪器的稳定性, 每 10 个样品做 1 次空白样测试. 选择部分样品平行测定 6 次, 得到 POC 和 PN 重复测定结果的误差分别为 0.02% 和 0.003%; 相对标准偏差 (RSD) 均小于 10%.

2 结果与讨论

2.1 POC、PN 的浓度与水平分布

整个研究区 POC 的浓度范围为 155.9 ~ 1 363.1 $\mu\text{g/L}$, 平均浓度为 429.5 $\mu\text{g/L}$. 表层和底层 POC 的浓度变化范围都较大. 表层 POC 的浓度范围为 159.3 ~ 1 129.7 $\mu\text{g/L}$, 高值区出现在海河口及曹妃甸附近的近岸区域. 随着离岸距离的增大, POC 向外海逐渐降低, 明显呈现出近岸高, 远岸低的特点 (图 2). 底层 POC 的浓度范围为 191 ~ 1 232.8 $\mu\text{g/L}$, 最高值区出现在曹妃甸附近的近岸区域, 同样呈现出近岸高, 远岸低的特点. PN 的浓度范围为 26.2 ~ 225.5 $\mu\text{g/L}$, 平均浓度 111.5 $\mu\text{g/L}$. PN 的空间分布特征与 POC 基本一致, 呈现出近岸高, 远岸低的特点. 对比国内其他研究发现, 本区 POC 浓度相对较高. 长江口附近由于受陆源输入影响较大, POC 浓度较高, 达 109 ~ 3 815 $\mu\text{g/L}$; 而相对于近岸河口区, 一些陆架及外海的 POC 浓度较低, 如黄东海陆架的 POC 浓度为 8 ~ 458 $\mu\text{g/L}$ ^[12].

渤海湾内由于水深较小, 周围入海河流较多, 水体混合均匀, 表层和底层温度和盐度的差别很小,

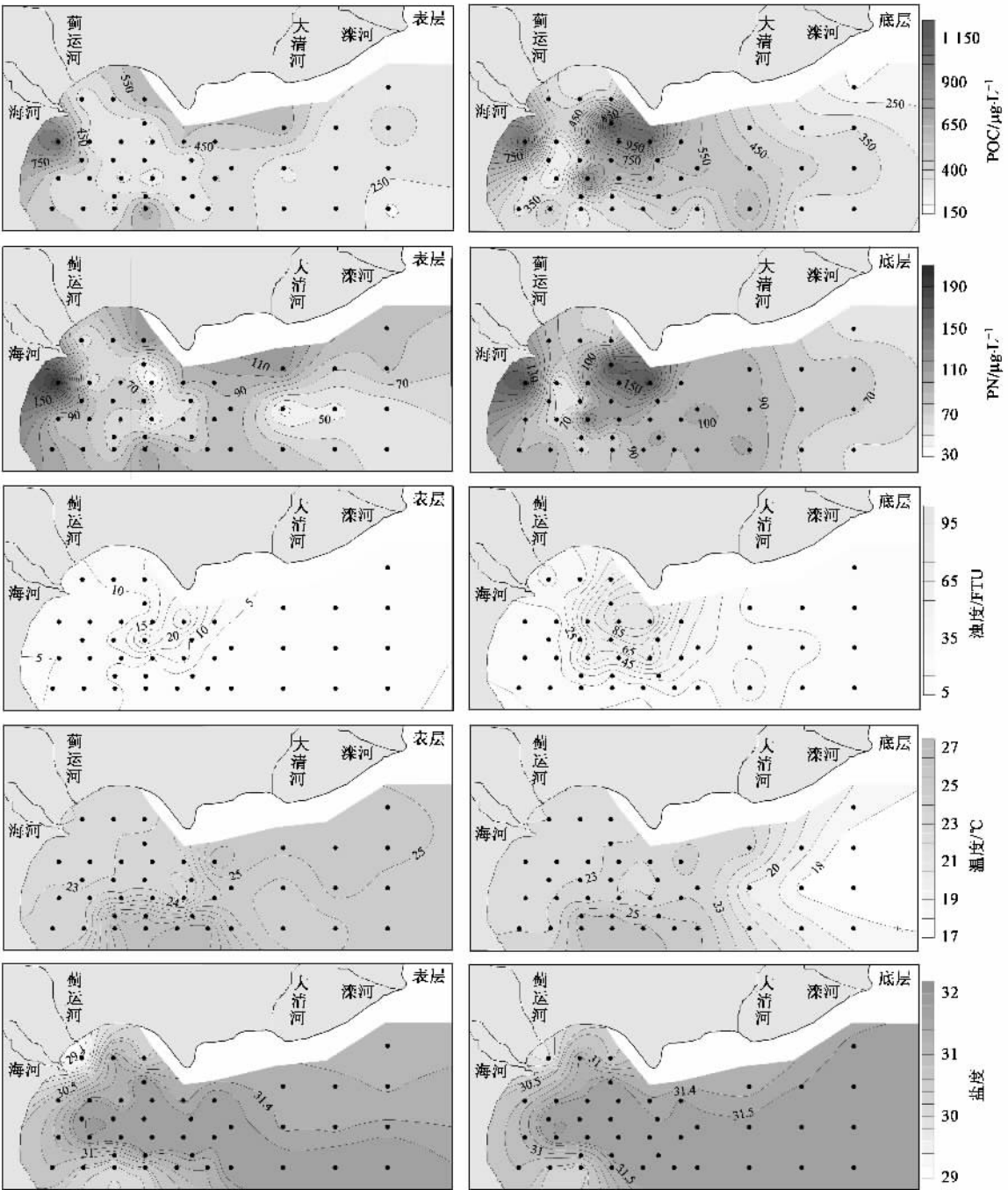


图 2 POC、PN、浊度、温度、盐度的水平分布

Fig.2 Horizontal distributions of POC, PN, turbidity, temperature, and salinity at the surface and bottom water layers

POC 的浓度也较高。随着水深的加大,从湾内向湾外,海水的盐度升高,上层为高温高盐水,底层则为低温高盐水,POC 浓度也呈现出向外海逐渐降低的趋势(图 2)。结合渤海夏季的环流和水团特征,认为渤海湾外底层的低温高盐水可能与渤海中部的海水侵入有关。受环流和水团的作用,POC 及水体的浊度的分布明显表现为湾内高于湾外。如图 2 所示,

对比底层水体 POC 和浊度的分布发现,两者有很好的空间一致性。在曹妃甸附近海区,虽然表层和底层 POC 的浓度都比较高,但相对于表层 POC 的浓度,底层 POC 的浓度明显高于表层,这与该区域水体浊度异常偏高的分布较为一致。底层水体的高度混浊现象以及 POC 不同层位的显著差异说明该区域有可能受到某种较为强烈的环境因素的影响。事

实上,在曹妃甸北部正在建设中国北方最大的港口基地——曹妃甸工业基地,调查期间,该区域正在进行大规模的人工填海造陆工程,剧烈的人为活动造成海底细粒泥沙的再悬浮,这可能是造成该区域附近水体浊度异常偏高的主要原因,这对底层水体高浓度的 POC 有着重要贡献.

2.2 POC、PN 的垂向分布

为了进一步研究 POC 在空间上的垂向分布变

化,在调查区中央选择一条由近岸到外海的断面(A1~B11),重点研究 POC 分布及其与环境因子的关系. 如图 3 所示,POC 和 PN 浓度的垂向分布总体呈现近岸区高,远岸区低的特点. 河口近岸区由于水浅,且受径流输入的影响大,水体上下混合均匀,POC、PN 与各环境因子的垂向变化不大. 随着离岸距离的增加,水深加大,在 15 m 水深左右出现了明显的温盐跃层,水体层化明显,POC 和 PN 的垂向分

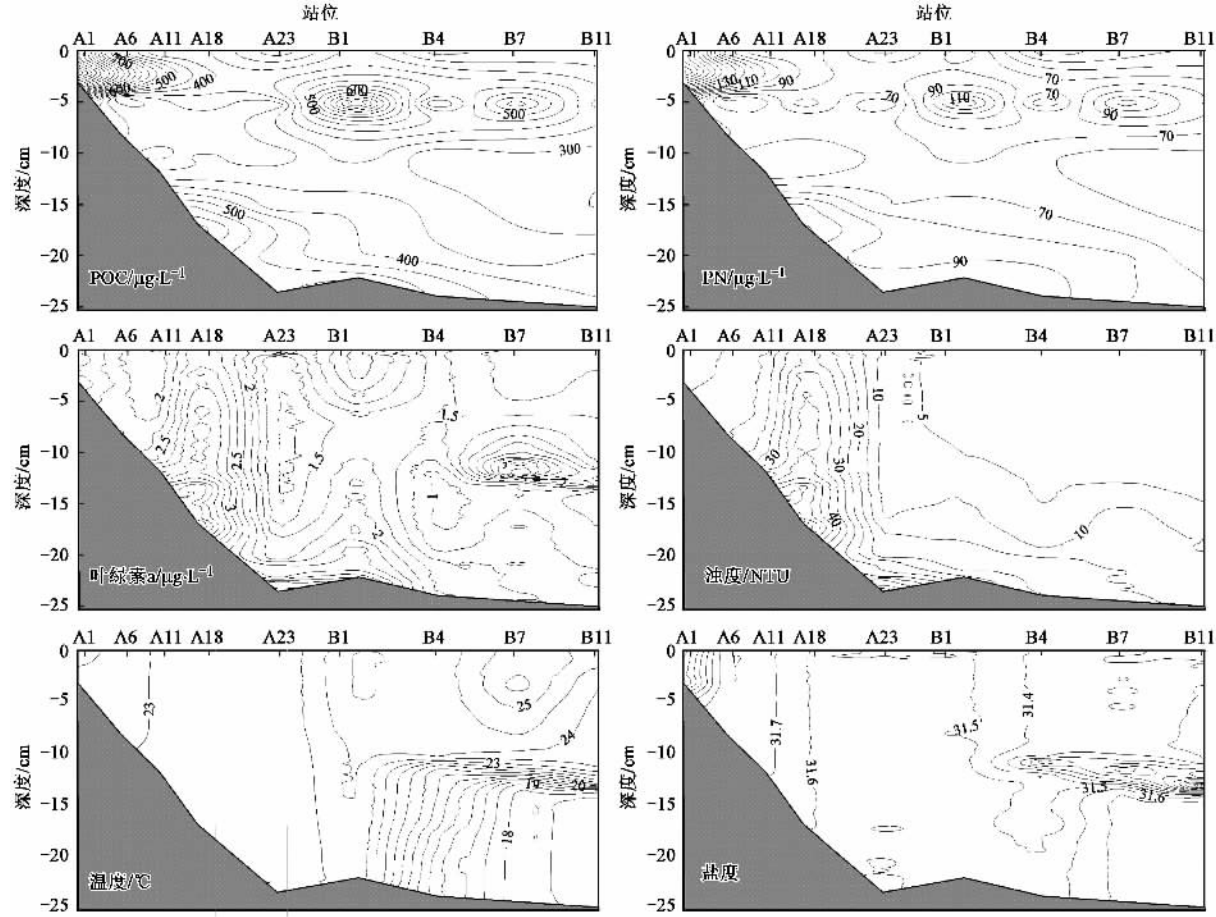


图 3 研究断面 POC、PN、叶绿素 a、浊度、温度和盐度的断面分布

Fig.3 Vertical distributions of POC, PN, Chl-a, turbidity, temperature and salinity along the study section

布总体表现为表层和底层高,中层低.

根据 POC、PN 及各水文环境要素的断面分布,将研究断面由西向东大致分为 3 个区域,分别为近岸区、中间区和外海区.

近岸区大约是从岸边一直延伸到 A23 站附近,基本位于渤海湾内,沿岸海河、蓟运河等河流注入了丰富的淡水和营养盐,是海陆交互作用的强烈地带. 由图 3 可知,本区 POC 存在着 2 个高值区:一个高值区位于海河入海口附近的 A1 站附近,水深较小,水体混合均匀,POC 的不同层位的浓度都很高,垂直变化幅度较小. 结合水体温盐、叶绿素 a 和浊度的垂

向分布特征,认为出现这一 POC 浓度高值区主要有两方面的原因:一是周围入海河流较多,且近岸区水浅,水体混合强,而造成悬浮颗粒物的浓度较高,这对于 POC 有一定的贡献;二是由于径流的输入,带来了丰富的陆源颗粒,水体中营养盐丰富,适合浮游生物的生长,表层叶绿素 a 的浓度较高,因此生物的作用也是 POC 的重要来源. 另一个高值区出现在 A18 站的底层水体,由于本站附近海底地形坡度较大,受渤海湾外底层侵入海水的上涌作用,引起底层沉积物的再悬浮,并阻隔了近岸悬浮体向外海的输送,水体的浊度较高,从而使底层水体 POC 的浓度较高.

中间区(大约位于 A23 ~ B4 之间) 离岸较远, 平均水深达 20 多米, 海底地形较为平坦。POC、PN 的垂向变化较大, 表层和底层较高, 中层低。随着水深的增大, 在 8 m 左右的次表层水中, POC 和 PN 的浓度出现一高值区, 结合叶绿素 a 以及浊度等参数(图 3), 认为这可能与表层生物活动产生的颗粒物的沉降有关。已有研究发现: 浮游植物光合作用后, 所产生的颗粒物或浮游生物的碎屑会不断地从表层向下沉降, 造成在次表层处出现 POC 的高值区^[12]。从温盐的垂向分布上看, 在 15 m 左右的中间层位上, 出现了一个温盐跃层, 水体浊度在该跃层上下也有明显的变化, 下层的混浊度明显高于上层。

外海区(大约位于 B4 ~ B11 之间) 水体层化较强, 中层水体的温盐跃层的现象更加明显。POC 和 PN 同样呈现表层和底层高, 中层低的垂向分布特征。结合温度、盐度、浊度等参数的断面分布, 认为中层水体低浓度的 POC 可能受外来海水的影响, 且跃层本身具有一定的阻隔效应, 使得底部再悬浮的碎屑颗粒很难向上扩散^[13], 从而使跃层上下的浊度差别明显。此外, 值得注意的是, 随着水深的加大, 在跃层附近出现了一个叶绿素 a 的高值区, 但对应的 POC 浓度较低, 造成这一现象的原因可能是: ① 本次调查期间正值夏季, 透明度大, 太阳辐射强, 表层水温高, 加上底层外来海水的影响, 上、下层水的差别较大, 海水的垂直稳定性好, 有利于浮游植物的生长, 生物活动旺盛, 使得叶绿素 a 的浓度相对较高。在不同的环境条件下, 浮游生物的种类和结构是不同的。因此叶绿素 a 在 10 m 层左右出现高值可能意味着该层海水中含有浮游生物所需的丰富的营养物质, 而且此深度上可以满足植物生长所需的光照条件, 引起浮游植物大量的繁殖, 导致叶绿素 a 高值的出现^[5, 14]; ② 随着水深的增加, POC 会有一定程度上的降解, 而且由于温度、盐度的降低, 水体的密度等结构条件改变, 加速了生物碎屑颗粒物的沉降速率, 使得一部分 POC 向底层转移。

2.3 POC 与 TSM 的相关分析

如图 4 所示, 本研究区域 POC 的浓度与 TSM 的浓度总体上呈正相关关系, 说明 TSM 的浓度和来源是控制 POC 浓度高低的一个重要因素^[15, 16], 但观察发现, 当 TSM 的浓度较小时($< 100 \text{ mg/L}$), TSM 与 POC 的浓度之间的相关性较差, 通过对比表层和底层水体中 TSM 和 POC 的浓度的相关性发现, 底层两者的相关性要高于表层(图 5), 这种现象主要是由于海区 TSM 的不同来源所造成的。总悬浮物中 POC

的质量分数 POC(%) 是 TSM 的一个重要性质, 可以根据这种性质来判断 TSM 的来源, 含量相似则反映来源一致; 含量波动范围大则说明 TSM 具有不同的来源^[16, 17]。研究发现: 随着 TSM 含量的升高, POC 在 TSM 中的质量分数下降, 而且在底层水体的这种下降的趋势要高于表层(图 6), 这说明不同层位 TSM 的来源存在一定的差别, 这对 POC 有着直接的影响。整个研究区域水深较浅, 海底再悬浮作用容易将海底的细颗粒泥沙转移的底层的水体中, 这与底层水体浑浊度普遍较高的现象相一致(图 2)。海底沉积物中有机碳的含量相对较低, 一般在 1% ~ 2% 之间, 从而造成底层水体悬浮颗粒物中 POC 的质量分数较低^[18]。上层水体中 TSM 由于受陆源输入和生物活动等多重因素的影响, POC 和 TSM 的相关性相对低, 而底层水体中的 POC 可能主要是受到海底再悬浮泥沙的影响较大, 故两者呈现出较好的正相关关系。

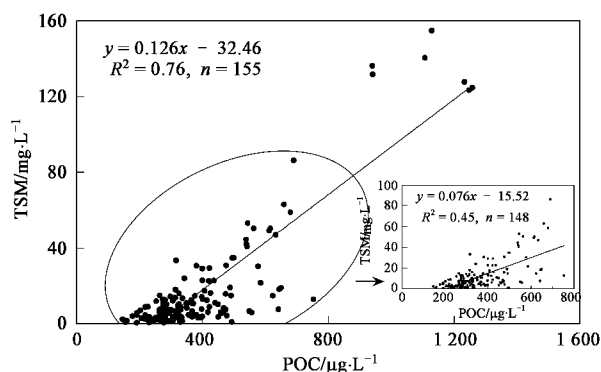


图 4 POC 与 TSM 的总相关关系

Fig. 4 Correlation between concentrations of POC and TSM in all the samples

2.4 POC 的物源分析

有机质的 C/N 这一指标被广泛用来区分海洋中有机质的不同来源。一般认为海洋生物有机质的 C/N 比值为 5 ~ 7^[19], 陆源高等植物有机质的 C/N > 15 ^[20]。本区域 POC/PN 比的范围是 3.4 ~ 7, 这一比值反映出该海域有机质主要为海洋生物来源。但是, 由于海洋中的颗粒氮(PN)分为颗粒有机氮(PON)和颗粒无机氮(PIN)两部分, PON 基本上是与颗粒有机质的来源相一致, 而颗粒无机氮(PIN)则主要是来自于海水中存在的一些含氮的化合物(亚硝酸盐、硝酸盐)以及细颗粒物(如粘土矿物)对水体中 NH_4^+ 的吸附^[21], 这些含氮的化合物的来源与海水有机质的来源不同, 主要与含氮的无机肥料有

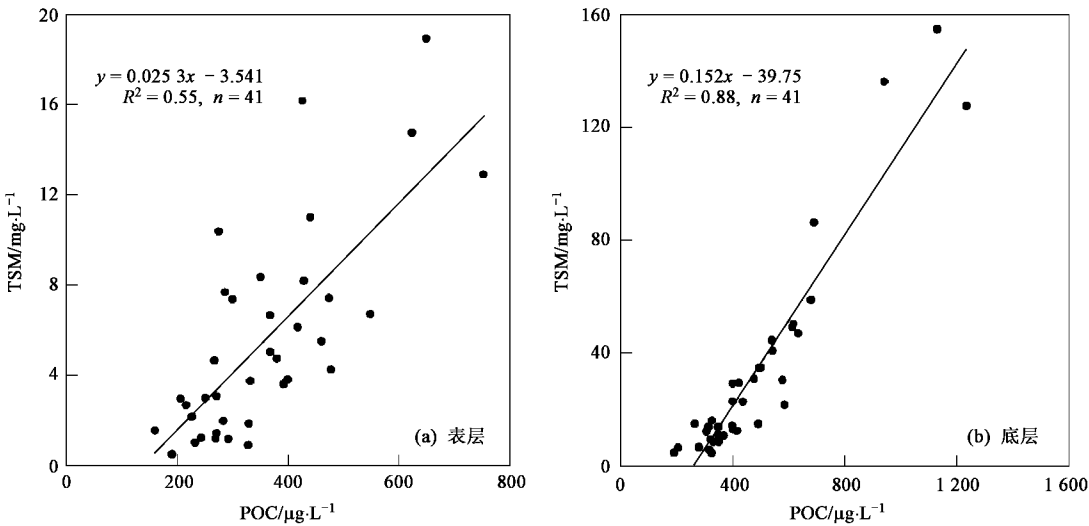


图 5 表层、底层 POC 与 TSM 的相关关系

Fig.5 Correlations between concentrations of POC and TSM at the surface and bottom water layers

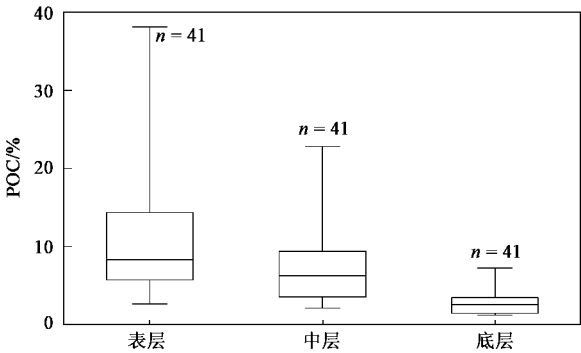


图 6 表层、中层、底层 POC 在 TSM 中的质量分数

Fig.6 Percentage contents of POC in TSM at the surface, middle and bottom water layers

关^[22]。因此,在使用 C/N 这一指标进行判别之前,需要考虑样品中无机氮含量的大小。当 POC 浓度较小时,样品中的 PIN 可能对于应用 POC/PN 比值来判断海水中 POC 的来源有一定的影响^[23]。研究表明,通过 POC 和 PN 的相关性回归分析,建立 POC 与 PN 的一元线性回归模型,可以估算出样品中 PIN 的含量^[22,23]。

对 POC 和 PN 进行相关性分析,如图 7 所示,由于 POC 和 PN 的回归直线不经过原点,而是在 y 轴 (PN)上有一段截距,即当 POC = 0 时,PN > 0,这说明本区域水体的颗粒氮(PN)中存在着一部分的颗粒无机氮(PIN),并且由 POC 和 PN 之间很好的正相关性,可大致认为样品中 PIN 的含量为一定值。当 POC 浓度为 0 时,PN 轴上截距的大小即相当于样品中 PIN 的含量^[22~24]。据此,可对所有样品的 POC 和

PN 进行回归分析($n = 155$),得到线性关系良好的回归方程:

$$\begin{aligned} \text{PN} &= 0.129 \times \text{POC} + 27.53 \\ (R^2 &= 0.85, p < 0.01) \end{aligned}$$

依据文献[23, 25],对研究区 POC/PN 这一指标进行修正,在分母中减去 PIN 的含量,即 $[\text{C/N}]' = \text{POC}/\text{PON}$,其中 $\text{PON} = \text{PN} - \text{PIN}$,这样能更加准确地判别 POC 的来源。由回归分析可得,样品中 $\text{PIN} \approx 28 \mu\text{g/L}$ 。本区域海水中 PIN 的来源一方面可能是由于海底细颗粒的沉积物的再悬浮,造成水体中 TSM 含量高,易于吸附 NH_4^+ ,另一方面可能由于排入研究区的河流大都流经一些工农业活动发达的地区,水体普遍受到不同程度的污染,含有大量无机氮化合物^[26],这对于海水中有有机质和颗粒无机氮的来源有着重要的贡献。扣除样品中 PIN 的影响后,本区 $[\text{C/N}]'$ 的范围介于 5.5 ~ 19.8 之间,平均值为 8.3,

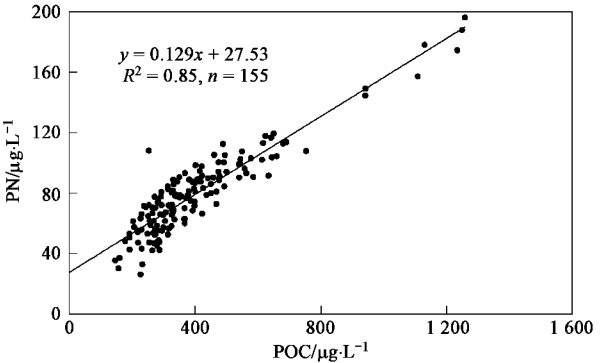


图 7 POC 与 PN 的总相关关系

Fig.7 Correlation between concentrations of POC and PN

这反映出研究区颗粒有机质应属于混合来源. POC/PON的高值区一般出现在湾内离岸较近的区域,而湾外及邻近的海区 POC/PON 的比值相对较低(图 8),这说明研究区的 POC 主要还是受海洋自生来源影响较大,这与调查期间正值夏季,海洋生物活动旺盛有着密切的关系. 而夏季也是沿海诸河流径

流量最大的季节,大量的河水带来了丰富的陆源物质,这对近岸 POC 的影响相对较大. 此外,考虑到 POC 在表层和底层分布的差异性,POC 和 PN 在不同层位的相关性也应有所差别. 如图 9 所示,底层两者的相关性更高,可能说明底层 POC 和 PN 的来源更加一致.

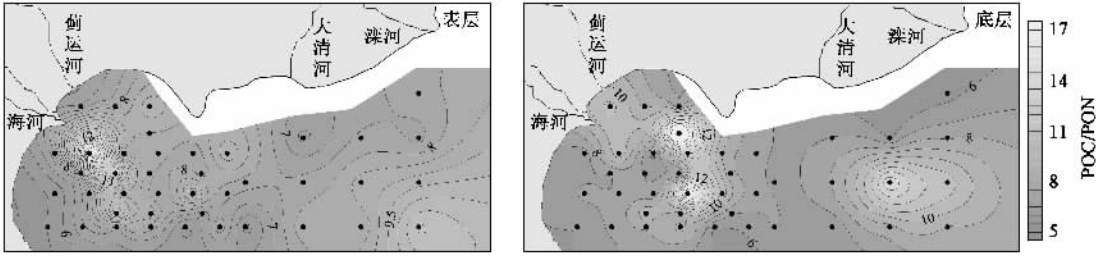


图 8 POC/PON 比值的水平分布

Fig.8 Horizontal distributions of POC/PON ratios at the surface and bottom water layers

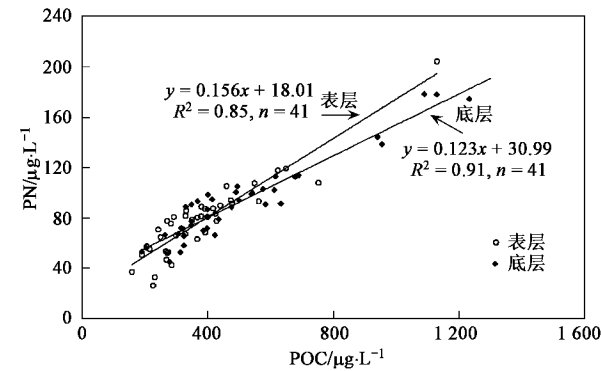


图 9 表层、底层 POC 和 PN 的相关关系

Fig.9 Correlations between concentrations of POC and PN at the surface and bottom water layers

3 结论

(1) POC 的空间分布呈现近岸高,远岸低;表层低,底层高的特点. 生物作用、水体温盐跃层和总悬浮颗粒物是影响研究区 POC 空间分布的重要原因.

(2) POC 与 TSM 的相关分析表明,POC 的浓度与 TSM 的浓度总体上呈正相关关系,底层两者的相关性要高于表层,这说明具有不同来源的 TSM 是控制水体中 POC 浓度高低的重要因素.

(3) POC 和 PN 的相关关系分析表明:海水中颗粒有机质来源较为复杂,底层 POC 和 PN 的来源更加一致. 海水中存在着一部分的颗粒无机氮(PIN). 当 POC 浓度较小时,这部分 PIN 对于应用 POC/PN 指标来判别海洋中 POC 的来源有一定影响. 通过建立 POC 和 PN 的一元线性回归模型,估算了样品中

PIN 的含量,扣除 PIN 的影响后,POC/PON 的比值范围介于 5.5~19.8 之间,说明 POC 除了海洋生物的来源外,近岸陆源的输入也不可忽视.

参考文献:

[1] Baliso B M, Fasham J R, Bowles M C, *et al.* Ocean biogeochemistry and global change [J]. IGBP Science, 2001, **2**: 1-36.

[2] 胡敦欣,杨作升. 东海海洋通量关键过程[M]. 北京: 海洋出版社, 2001. 1-10.

[3] Huang J, Lin P L, Liu K K. Dissolved and particulate organic carbon in the southern East China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2000, **20**: 545-569.

[4] 林晶,吴莹,张经,等. 长江有机碳通量的季节变化及三峡工程对其影响[J]. 中国环境科学, 2007, **27**(2): 246-249.

[5] 刘占飞,彭兴跃,徐立,等. 台湾海峡 1997 年夏季和 1998 年冬季两航次颗粒有机碳研究[J]. 台湾海峡, 2000, **19**(3): 95-101.

[6] 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.

[7] Wu Y, Dittmar T, Ludwichowski K U, *et al.* Tracing suspended organic nitrogen from the Yangtze River catchment into the East China Sea[J]. Marine Chemistry, 2007, **107**: 367-377.

[8] Zhang J, Wu Y, Jennerjahn T C, *et al.* Distribution of organic matter in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and their stable carbon isotopic ratios: implications for sources discrimination and sedimentary dynamics[J]. Marine Chemistry, 2007, **106**: 111-126.

[9] 李惠敏,霍家明,于卉. 海河流域水污染现状与水资源质量状况综合评价[J]. 水资源保护, 2000, **4**: 12-14, 44-45.

[10] 刘成,王兆印,何耘,等. 环渤海湾诸河口底质现状的调查研究[J]. 环境科学学报, 2003, **25**(4): 222-225.

[11] 孟伟,刘征涛,范薇. 渤海主要河口污染特征研究[J]. 环境科学研究, 2004, **17**(6): 66-69.

[12] 金海燕,林以安,陈建芳,等. 黄海、东海颗粒有机碳的分布特

- 征及其影响因子分析[J]. 海洋学报, 2005, **27**(5): 46-53.
- [13] 郭志刚, 杨作升, 雷坤, 等. 冲绳海槽中南部及其邻近陆架悬浮体的分布、组成和影响因子分析[J]. 海洋学报, 2001, **23**(1): 66-73.
- [14] 宁修仁, 史君贤, 刘子琳, 等. 长江口及浙江近海夏季叶绿素 a 和 ATP 的分布特征[J]. 海洋学报, 1986, **8**(5): 603-610.
- [15] Zhuo Y Z, 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**: 37-60.
- [16] Zhang S, Gan W B, Ittekkot V. Organic matter in large turbid rivers: Huanghe and its estuary [J]. *Marine Chemistry*, 1992, **38**(1/2): 53-68.
- [17] 高全洲, 沈承德, 孙彦敏, 等. 北江流域有机碳侵蚀通量的初步研究[J]. 环境科学, 2001, **22**(2): 12-18.
- [18] Gebhardt A C, Gaye-Haake B, Unger D, *et al.* Recent particulate organic carbon and total suspended matter fluxes from the Ob and Yenisei Rivers into the Kara Sea (Siberia) [J]. *Marine Geology*, 2004, **207**: 225-245.
- [19] Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A. The influence of organisms on the composition of sea water [A]. In: Hill M N (ed). *The Sea* [M]. New York: John Wiley, 1963. 26-77.
- [20] Meyers P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes [J]. *Organic Geochemistry*, 1997, **27**: 213-250.
- [21] Müller P J. C/N ratios in Pacific deep-sea sediments: effect of inorganic ammonium and organic nitrogen compounds sorbed by clays [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1977, **41**: 765-776.
- [22] Datta D K, Gupta L P, Subramanian V. Distribution of C, N, and P in the sediments of the Ganges-Brahmaputra-Meghna river system in the Bengal basin [J]. *Organic Geochemistry*, 1999, **30**: 75-82.
- [23] Goni M A, Rittenberg K C, Eglinton T I. A reassessment of the sources and importance of land-derived organic matter in surface sediments from the Gulf of Mexico [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1998, **62**: 3055-3075.
- [24] Goni M A, Cathey M W, Kim Y H, *et al.* Fluxes and sources of suspended organic matter in an estuarine turbidity maximum region during low discharge conditions [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2005, **63**: 683-700.
- [25] Schubert C J, Calvert S E. Nitrogen and carbon isotopic composition of marine and terrestrial organic matter in Arctic Ocean sediments: implications for nutrient utilization and organic matter composition [J]. *Deep-Sea Research I*, 2001, **48**: 789-810.
- [26] 张龙军, 夏斌, 桂祖胜, 等. 2005 年夏季环渤海 16 条主要入海河流的污染状况 [J]. 环境科学, 2007, **28**(11): 2409-2415.