

青岛近岸海域表层沉积物生源要素分布及污染状况评价

雷明丹^{1,2}, 王朝晖^{1,2}, 江涛³

(1.暨南大学生命科学技术学院生态学系, 广东广州 510632; 2.热带亚热带水生生态工程教育部工程研究中心, 广东广州 510632; 3.农业部海洋渔业可持续发展重点实验室, 中国水产科学研究院黄海水产研究所, 山东青岛 266071)

摘要: 为了解青岛市近岸海域不同功能海区沉积物中生源要素分布及污染状况, 于 2017 年 11 月在胶州湾、崂山近岸海域和青岛市文昌鱼保护区共采集了 33 个表层沉积物样品, 分析了沉积物生源要素中总有机碳 (TOC)、总氮 (TN)、总磷 (TP) 及生物硅 (BSi) 的含量。青岛近岸海域 TOC、TN、TP 和 BSi 含量范围分别为 0.21%~1.43%、0.02%~0.13%、0.06%~0.15% 和 0.26%~0.60%。胶州湾表层沉积物中 TN 和 TP 含量较高, 崂山近岸海域 TOC 较高, 而文昌鱼保护区 BSi 含量较高。此外, 胶州湾沉积物中 BSi 含量呈显著下降趋势, 说明海域硅藻生产力的下降。根据沉积物中 TOC/TN 摩尔比, 崂山近岸海域沉积物中有机质为海源和陆源混合输入, 而胶州湾和文昌鱼保护区有机质的主要来源为海源输入。生源要素污染评价结果显示, 青岛近岸海域表层沉积物中 TOC 含量未受到污染, 而 TN 和 TP 则处于中等污染水平。
关键词: 沉积物; 总有机碳; 总氮; 总磷; 生物硅; 青岛近岸海域

中图分类号: P736 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2021)01-0093-08

Distribution and pollution assessment of biogenic elements in surface sediments from Qingdao coastal area

LEI Ming-dan^{1,2}, WANG Zhao-hui^{1,2}, JIANG Tao³

(1. Department of Ecology, College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering, Ministry of Education, Guangzhou 510632, China; 3. Ministry of Agriculture, Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Qingdao 266071, China)

Abstract: Thirty-three surface sediment samples were collected from Jiaozhou bay, Laoshan coastal area and Qingdao amphioxus reserve area in November 2017. Biogenic elements including total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total phosphate (TP) and biogenic silica (BSi) were analyzed. Concentrations of TOC, TN, TP and BSi were in the range of 0.21%~1.43%, 0.02%~0.13%, 0.06%~0.15%, 0.26%~0.60%, respectively. TN and TP were high in Jiaozhou bay, and TOC was high in Laoshan coastal area. While, BSi was high in amphioxus reserve area. In addition, BSi in Jiaozhou bay showed a significant decreasing trend compared to the previous studies, indicating the decrease of diatom productivity. Based on the molar ratios of TOC/TN, TOC in Jiaozhou bay and amphioxus reserve area was originated from mixture inputs of terrestrial and marine sources, while was mainly originated from marine sources in Laoshan coastal area. Results from pollution assessment of

收稿日期: 2019-12-18, 修订日期: 2020-04-23

基金项目: 科技基础资源调查专项项目 (2018FY100200); 中国水产科学研究院基本科研业务费项目 (2020TD12)

作者简介: 雷明丹 (1996-), 女, 广东南雄人, 硕士, 主要从事海洋沉积物研究, E-mail: jnulmd@163.com

通讯作者: 江涛 (1978-), 男, 博士, 副研究员, 主要从事海洋生态学研究, E-mail: jiangtaojnu@163.com

biogenic elements indicated that TOC in the surface sediments from Qingdao coast belonged to the uncontaminated level, however TN and TP reached moderate pollution level.

Key words: sediments; TOC; TN; TP; BSi; Qingdao coast

生源要素主要是碳、氮、磷和硅等由生物产生的营养元素, 沉积物中的生源要素来源于海洋生物和碎屑的迁移沉降以及地表径流、大气沉降等方式。近海海洋沉积物是海洋生态系统中碳、氮、磷和硅等元素的重要储蓄库和补给源, 沉积物中营养元素可以释放到上层水体中, 以满足海洋生物生长所需。沉积物中生源要素的分布对了解水体初级生产力、有机质来源和营养盐水平有重要的指示作用^[1]。

随着沿海城市的快速发展、人口的大量增加和城市化进程的不断加快, 近岸海域正面临着区域生态环境破坏、污染加重、生物多样性减少和渔业资源退化等巨大压力。青岛近岸海域濒临黄海, 港湾众多, 岸线曲折, 滩涂广阔, 水质肥沃, 是多种水生生物繁衍生息的场所。由于接纳的陆源污染物数量迅速增加, 加上渔业生产等海上活动造成的污染, 青岛近岸海域的污染水平呈现逐年加重趋势^[2]。海域污染的加剧也导致赤潮频繁发生, 1990—2013年青岛近海发生赤潮 33 次, 发生范围以胶州湾为主^[3]。Dai 等人的研究表明, 2003 年胶州湾沉积物中的总氮和总磷已经呈现了一定程度的污染^[4], 而 Wang 等人于 2009 年的研究显示, 虽然总磷含量有所下降, 但总有机质和生物硅含量均增加^[5]。

随着经济发展和城市化进程的加速, 青岛近岸海域污染也逐渐加剧。为了比较青岛沿海不同功能海域沉积物的污染状况, 采集青岛近岸 3 个海域表层沉积物样品, 对沉积物中的主要生源要素进行分析测定, 并对生源要素污染状况进行了评价, 旨在为青岛近岸海域海洋环境的相关研究提供背景资料, 同时为海洋环境保护及可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

2017 年 11 月—12 月分别在胶州湾(J1—J11)、

崂山近岸海域(L1—L13)以及文昌鱼保护区(W1—W9)设置了 33 个采样点, 站位分布如图 1 所示。采用彼得逊采泥器采集 3 个海域表层沉积物, 取表层 0~3 cm 沉积物, 用封口袋封装, 置于-20 °C 冰箱避光保存待测。测定样品时, 每个站位称取 20 g 左右沉积物样品置于培养皿中, 放入烘箱经 40 °C 烘干至恒重, 研磨后过 100 μm 孔径筛网, 所得干样品用密封袋封装待测。

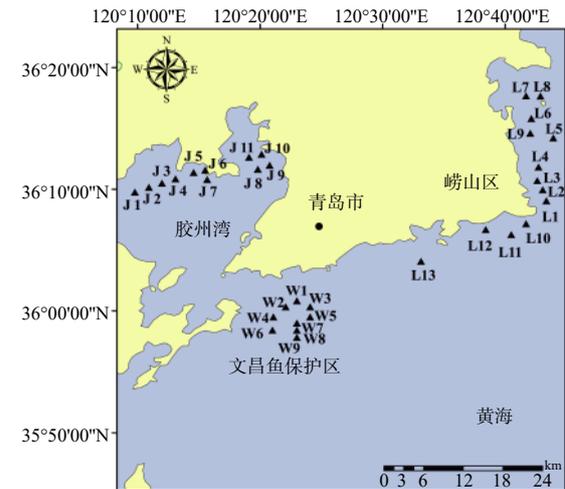


图 1 采样点分布

Fig. 1 Sampling stations in Qingdao coastal area

1.2 分析与测定

1.2.1 总有机碳 (TOC) 的测定

总有机碳 (total organic carbon, TOC) 含量的测定使用德国 Elementar Vario EL cube 元素分析仪进行。首先称取 3 g 沉积物干样品于 10 mL 离心管中, 沿管壁缓慢加入浓度为 1 mol/L 的 HCl 5 mL, 加入 3 mL 超纯水, 置于超声波振荡器中振荡 15 min, 4000 r/min 离心 10 min, 去除上清液; 再加入适量的超纯水, 超声振荡 15 min, 4000 r/min 离心 10 min, 去除上清液, 放入 60 °C 烘箱中干燥 48 h 以上, 烘干至恒重后用研钵研磨成粉末, 最后在元素分析仪上测定 TOC 含量。

1.2.2 总氮 (TN) 和总磷 (TP) 的测定

总氮 (total nitrogen, TN) 和总磷 (total phosphorus, TP) 的测定采用过硫酸钾氧化法进行^[6]。称

取 10 ~ 50 mg 干样品于 50 mL 比色管中, 用超纯水定容至 25 mL, 再加入 25 mL 过硫酸钾与氢氧化钠配制而成的消化液, 加盖摇匀后放入高压灭菌锅内, 在 (120±1) °C 条件下消解 30 min, 取出后冷却至室温。取上清液测定 220 nm 和 275 nm 处的吸光值, 用以测定 TN 含量。再取 10 mL 上清液, 加入钼-锑-抗显色剂 1 mL, 显色 30 min 后于紫外可见分光光度计 700 nm 波长下测定吸光值, 用以测定 TP 含量。

1.2.3 生物硅 (BSi) 的测定

生物硅 (bio-silicon, BSi) 的测定使用化学连续提取法^[7], 称取 30 ~ 50 mg 沉积物样品, 用 3 mL 体积分数 10% 的 H₂O₂ 处理 30 min, 加入 5 mL 1 mol/L 的 HCl, 超声振荡 30 min, 离心去除上清液, 将 45 °C 烘干至恒重的样品加入 10 mL 0.5 mol/L 碳酸钠溶液, 90 °C 水浴提取 5 h, 6500 r/min 离心 6 min, 离心后取 2 mL 上清液加超纯水稀释至 25 mL, 用硅钼蓝法测定 BSi 含量。

TOC、TN、TP 和 BSi 的含量分别以 C、N、P 和 Si 占干沉积物的质量百分数表示。采用国家标准近海沉积物样品 (GBW 07314) 进行样品测定质量控制, 将 5 份标准沉积物样品同时进行各种元素的测定, TOC、TN、TP 和 BSi 测定误差均小于 5%。

1.3 数据处理及图像分析

1.3.1 沉积物污染评价

对于沉积物污染评价目前国际上尚未统一标准, 而国家标准《海洋沉积物质量》(GB18668-2002) 也仅对 TOC 含量设置了质量标准, 因此本文拟采用我国目前通行的两种沉积物标准, 用单因子标准指数法对沉积物 TOC、TN 和 TP 的污染状况进行评价, 单一污染因子的标准指数计算公式如下^[8]:

$$S_i = C_i / C_s$$

式中: S_i 为单项评价指数或标准指数, S_i 大于 1 表示含量超过评价标准值; C_i 为评价因子 i 的实测值; C_s 为评价因子 i 的评价标准值。式中 TOC 评价标准 (2%) 采用国家标准《海洋沉积物质量》(GB18668-2002) 中的一类标准值, TN (550 mg/kg) 和 TP (600 mg/kg) 的评价标准采用我国《第二次全国海洋污染基线调查技术规

程》中的评价标准值。

1.3.2 图像处理

运用 ArcMap 10.2 中的反距离权重法绘制各生源要素等值分布图。

2 结果与讨论

2.1 青岛近岸海域沉积物生源要素的分布规律

青岛近岸海域 TOC 含量变化范围为 0.21% ~ 1.43%, 平均值为 0.77%, 其中, 胶州湾 TOC 含量变化范围为 0.34% ~ 1.34%, 平均值为 0.82%; 崂山近岸海域 TOC 为 0.44% ~ 1.43%, 平均值为 0.89%; 文昌鱼保护区 TOC 为 0.21% ~ 0.85%, 平均值为 0.53%。从 TOC 的分布规律来看 (图 2A), 胶州湾东北近岸海域以及崂山近岸海域均有一个高值区, 分别为胶州湾东北部的 J9 和崂山头附近的 L1 站位, 在胶州湾从东北向西南呈降低趋势; 在崂山近岸海域, 崂山头的站位 L1 附近 TOC 较高, 以 L1 为中心向西、北两个方向逐渐减少; 文昌鱼保护区西北部 TOC 分布较高, 其他位置分布均较低。在 3 个海域中, 崂山近岸海域和胶州湾 TOC 含量相近, 文昌鱼保护区 TOC 含量较低。

青岛近岸海域 TN 含量变化范围为 0.02% ~ 0.13%, 平均值为 0.09%, 其中, 胶州湾海域 TN 含量变化范围为 0.05% ~ 0.13%, 平均值为 0.10%; 崂山近岸海域 TN 为 0.03% ~ 0.13%, 平均值为 0.09%; 文昌鱼保护区 TN 为 0.02% ~ 0.10%, 平均值为 0.07%。TN 分布规律与 TOC 相近 (图 2B), 其中, 在胶州湾呈现出从内湾到外湾、从东北向西南的下降趋势; 而崂山近岸海域则以 L1 为高值区, TN 含量向两边逐渐下降; 在文昌鱼保护区 TN 则呈现从北至南的下降趋势。同样, 胶州湾及崂山近岸海域的 TN 含量明显高于文昌鱼保护区。

青岛近岸海域 TP 含量变化范围均为 0.06% ~ 0.15%, 平均值为 0.12%, 3 个海域 TP 含量相近, 其中, 胶州湾、崂山近岸海域和文昌鱼保护区 TP 含量的平均值分别为 0.12%、0.11% 和 0.13%。TP 的分布规律明显与 TOC、TN 的分布规律有所不同 (图 2C), TP 的高值区多分布于文昌鱼保

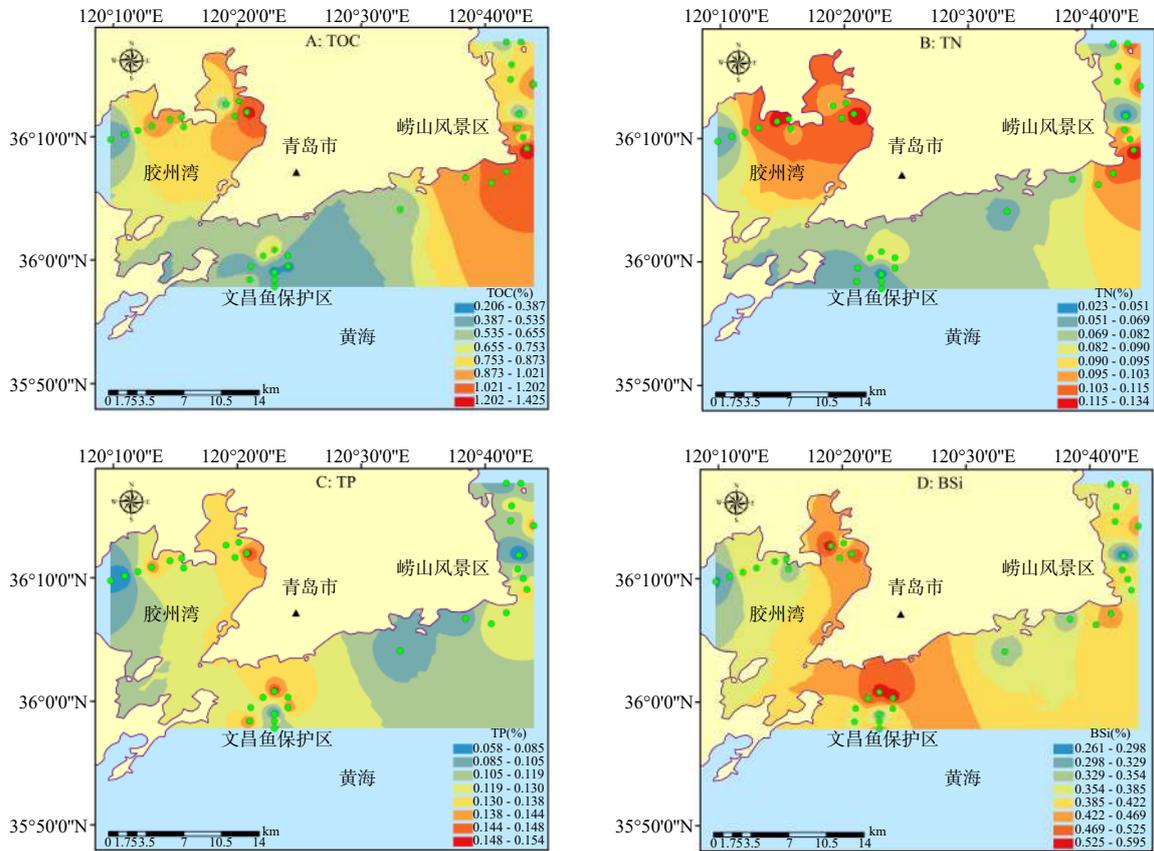


图 2 青岛近岸海域表层沉积物中生源要素的分布

Fig. 2 Distribution of biogenic elements in surface sediments from Qingdao coast

保护区。胶州湾内湾东北部 TP 含量较高,从湾内到湾外逐渐下降;崂山近岸海域 TP 含量分布均匀,并无明显高值区域,崂山头附近海域略高;在文昌鱼保护区东北部和西部分布较高,核心区 W7 以南分布较低。

青岛近岸海域 BSi 含量变化范围为 0.26%~0.60%,平均值为 0.40%,胶州湾与文昌鱼保护区 BSi 含量相近,崂山近岸海域相对较低。其中,胶州湾海域 BSi 含量为 0.29%~0.58%,平均值为 0.39%;崂山近岸海域 BSi 为 0.26%~0.46%,平均值为 0.38%;文昌鱼保护区 BSi 为 0.28%~0.60%,平均值为 0.43%。从 BSi 的分布规律来看(图 2D),其中两个高值区分别为胶州湾东北部的 J11 以及文昌鱼保护区的北部 W1,胶州湾 BSi 含量总体呈现东高西低的水平分布趋势,文昌鱼保护区 BSi 含量从北至南逐渐下降,而崂山近岸海域整体 BSi 含量分布较为均匀。

胶州湾和崂山近岸海域都是青岛市重要的海水养殖区,海水养殖过程中投放的大量蛋白质饵料和养殖动物的代谢产物进入沉积物或悬浮于水中,致使养殖海域沉积物中 TOC 和 TN 含量较高。此外,城市污水也是 TOC 和 TN 的重要来源,本研究中 TOC 和 TN 含量的高值区均为离青岛市区较近的近岸海域。胶州湾是一个半封闭海湾,周围工业发达、人口稠密,工业污染和生活污染较严重,并且胶州湾东部是青岛市的排水口^[2],河流携带大量生活和工业废水进入湾内,致使该海域的生源要素含量明显偏高。崂山近岸海域包围着青岛旅游胜地—崂山风景区,崂山头附近有许多度假村和酒店,生活污水的排放导致该海域 TOC 和 TN 含量也较高。文昌鱼保护区没有海水养殖,而且入海河流较少,陆源输入较少,因此 TOC 和 TN 含量较低。

BSi 的分布规律与其他生源要素有所不同,

文昌鱼保护区较高, 而崂山近岸海域和胶州湾较低。胶州湾和崂山近岸海域的沉积物中富含有机质, 微生物降解作用较为活跃, 使包裹在硅质残体周围的有机质能迅速被矿化, 从而使沉积物中的硅更容易溶解并释放到上覆水体^[9]。此外, 随着富营养化程度的加剧, 硅已成为胶州湾浮游植物生长的最大限制因素^[10], 因此尽管有充足的 N、P, 但是硅限制导致硅藻生产力降低, 沉积物中 BSi 含量随之下降。研究也表明, 胶州湾沉积物 BSi 再生效率可达 51%^[11], 说明沉积物中约一半的 BSi 可重新溶解释放到上层水体。这些因素导致了胶州湾和崂山近岸海域表层沉积物中 BSi 含量较低。而文昌鱼保护区沉积物中 BSi 和 TP 含量高于富营养化的胶州湾和崂山近岸海域, 说明该海域硅藻生物量较高, 而硅藻的沉降也导致藻体内 BSi 和 TP 沉积于海底, 同时该海域沉积物中较低的有机质含量也使 BSi 和 TP 的再生率较低。

2.2 青岛近岸海域沉积物有机质来源分析

海洋沉积物中的有机质主要来源于海源输入和陆源输入两种方式, 海源输入是指以海洋藻类为主的生物输入有机质, 而陆源输入是指以陆地上的植物为主的生物输入有机质。沉积物中有机质的来源可以通过沉积物中 TOC 与 TN 比 (C 与 N 的摩尔比) 来判断, 由于海洋浮游植物富含蛋白质, 因此细胞内 C/N 较低; 而陆地植物富含纤维素, 蛋白质含量较低, 细胞内 C/N 较海洋藻类更高^[12]。一般认为, TOC/TN 介于 4~10

以海源输入为主, 在 15 以上以陆源输入为主, 介于 10~15 则为海源和陆源的混合输入^[12]。胶州湾 TOC 与 TN 摩尔比为 5.65~12.57, 平均值为 9.40, 说明此海域沉积物中有机质以海源输入为主; 而崂山近岸海域 TOC 与 TN 摩尔比为 8.85~15.62, 平均值为 11.71, 沉积物中有机质为陆源和海源混合输入; 文昌鱼保护区 TOC 与 TN 摩尔比为 4.85~10.46, 平均值为 8.82, 沉积物中有机质以海源输入为主。3 个海域的 TOC 与 TN 摩尔比平均值为 10.15, 说明青岛近岸海域的表层沉积物中有机质为海源和陆源的混合输入。从 TOC 与 TN 摩尔比的分布来看 (图 3A), 胶州湾的东北部较高 (>10), 湾内其余站位都低于 10, 说明胶州湾沉积物有机质来源为海源和陆源混合输入, 东北部有较高的陆源有机质输入, 而湾内其余站位有机质主要来源于浮游植物。在崂山近岸海域, TOC 与 TN 摩尔比较高, 平均值大于 10, 特别是崂山头以西附近地区陆源有机质输入比重较大。文昌鱼保护区 TOC 与 TN 摩尔比较低, 一般小于 10, 说明文昌鱼保护区表层沉积物中的有机质主要来源于浮游植物。

由于海洋沉积物中有机碳比生物硅保存效率低、降解速率快^[13], 因此沉积物中 TOC/BSi 一般小于 Redfield 值 (106:16=6.625)^[14]。本研究 3 个海域沉积物中 TOC/BSi 为 1.74~9.42, 平均值为 4.54, 也略低于 Redfield 值, 同样说明沉积物中的 BSi 比 TOC 更为稳定。胶州湾、崂山近岸海域和文昌鱼保护区 TOC/BSi 平均值分别为

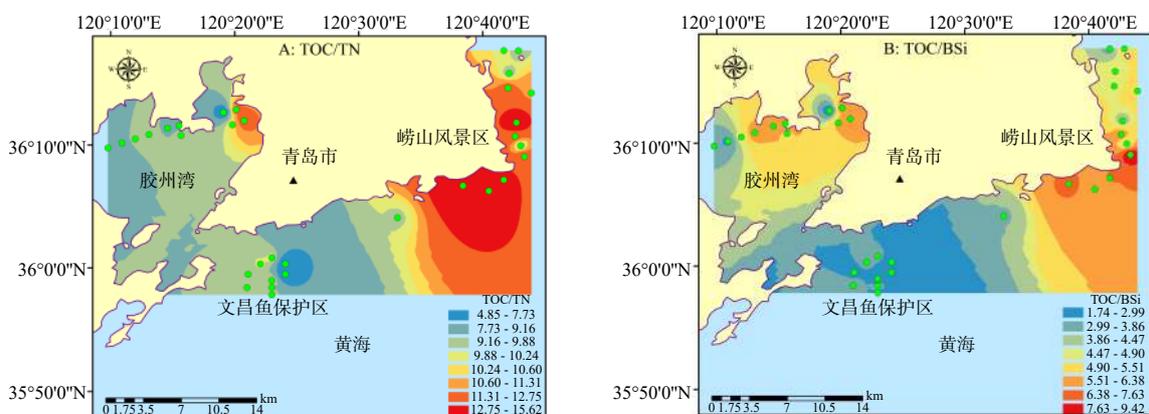


图 3 青岛近岸海域表层沉积物中 TOC/TN 和 TOC/BSi 的水平分布

Fig. 3 Distribution of TOC/TN and TOC/BSi in surface sediments from Qingdao coast

4.99、5.37 和 2.81。TOC/BSi 的高值区主要分布在胶州湾和崂山近岸海域(图 3B),说明这两个海域有较高的有机碳输入;而 TOC/BSi 低值区分布在文昌鱼保护区,反映了文昌鱼保护区沉积物中较高的 BSi 积累和较低的 TOC 含量,同时也说明硅藻等浮游植物对该海域总初级生产力贡献较大,与该海域沉积物中 TOC 与 TN 摩尔比得出的结论一致。

2.3 青岛近岸海域沉积物生源要素污染状况及评价

表层沉积物中的有机质是底栖动物的重要食物来源,但当沉积物中 TOC、TN、TP 含量达到一定浓度后,可能会对底栖生物的生存造成危害^[8]。而且,表层沉积物中有机质过多时,有机质分解会导致氧气的消耗以及与这些物质分解相关的有毒副产物(氨和硫化物)的积累,从而导致物种丰富度、丰度和生物量减少^[15]。因此,沉

积物中 TOC、TN 和 TP 等生源要素含量也可以作为环境污染评价指标。

根据《海洋沉积物质量》(GB18668-2002)和《第二次全国海洋污染基线调查技术规程》中的评价标准值对沉积物中生源要素进行单一污染因子评价,青岛近岸海域 TOC、TN 和 TP 的标准指数见表 1。结果显示,3 个海域 TOC 标准指数为 0.27~0.45,均小于 1,超标率为 0,全部符合第一类海洋沉积物质量标准,说明有机质对沉积物环境基本没有构成污染。TN 的标准指数为 1.27~1.82,处于中等污染水平,其中,胶州湾 TN 超标率为 90.9%,崂山近岸为 92.3%,文昌鱼保护区 TN 污染较轻,超标率为 77.8%。TP 标准指数为 1.83~2.17,处于中等污染水平,胶州湾和崂山近岸 TP 超标率与 TN 一致,文昌鱼保护区为 88.9%。结果说明,青岛近岸 3 个不同功能区海域沉积物中 TN 和 TP 平均含量全部超标,具有一定生态风险。

表 1 青岛近岸海域表层沉积物 TOC、TN 和 TP 的污染标准指数

Tab.1 Pollution standard indexes of TOC, TN and TP in surface sediments from Qingdao coast

研究区域	TOC			TN			TP		
	标准指数 平均数	标准指 数范围	超标率/ (%)	标准指数 平均数	标准指 数范围	超标率/ (%)	标准指数 平均数	标准指 数范围	超标率/ (%)
胶州湾	0.41	0.17~0.67	0	1.82	0.98~2.44	90.9	2.00	1.00~2.54	90.9
崂山近岸海域	0.45	0.22~0.71	0	1.64	0.61~2.36	92.3	1.83	0.97~2.43	92.3
文昌鱼保护区	0.27	0.10~0.42	0	1.27	0.42~1.77	77.8	2.17	0.99~2.56	88.9

与国内其他相邻及相近海域对比(表 2),本研究中青岛 3 个近岸海域的 TOC、TN、TP 含量均高于远离海岸带的南黄海海域^[16],这说明人类活动对沉积物生源要素含量有较大影响,而 BSi 含量则处于中等水平。胶州湾和崂山近岸海域的 TOC 含量与同为养殖海域的广东拓林湾和粤西海域相当,明显高于其他海域,说明海水养殖对沉积物中有机质含量有较大影响。青岛近岸海域的 TN 含量与国内其他海域相比处于中等水平,较长江口、黄河口及邻近海域高,主要是因为青岛近岸海域更靠近生活区,受岸上大量生活污水排放的影响,但低于拓林湾和粤西海域这两个海水养殖区域。

青岛近岸海域 TP 含量均高于国内其他海域

(表 2),说明青岛近岸海域 P 污染较为严重,研究表明,青岛市 86% 的排污口存在超标排放现象,并且超标污染物主要为 TP^[2],大量含 P 污水的排放导致青岛近岸海域沉积物中 TP 污染较高。胶州湾的 TP 含量发生了显著变化,2003 年沉积物中 TP 含量为 0.22%^[4],2009 年下降到 0.04%^[5],2017 年又上升到 0.12%(本研究)。20 世纪末至 21 世纪初是环胶州湾地区工农业迅速发展的时期,而当时污水处理和排放的各种治理和管理措施不完善,导致 2003 年沉积物中 TP 污染较为严重。自 2004 年起施行《山东省海洋环境保护条例》以来,严控沿岸污水排放,近岸海域环境得到有效改善^[2]。但随着胶州湾开发和利用程度的持续增加,其环境质量下降,胶州湾沿岸还分布

表 2 本研究海域沉积物生源要素含量平均值与国内其他海域的比较

Tab.2 Comparison of average concentration of biogenic elements in this study with other Chinese coastal areas

研究区域	w/(%)				采样时间	参考文献
	TOC	TN	TP	BSi		
胶州湾	0.82	0.10	0.121	0.39	2017	本研究
崂山近岸海域	0.89	0.09	0.113	0.38	2017	本研究
文昌鱼保护区	0.53	0.07	0.127	0.43	2017	本研究
南黄海	0.48	0.07	0.024	/	2007	[16]
胶州湾	0.07~0.45	0.16~0.48	0.17~0.31	1.11~2.17	2003	[4]
胶州湾	0.52~0.96	0.05~0.08	0.027~0.052	1.82~3.47	2009	[5]
胶州湾	/	/	/	0.26~0.42	2015	[17]
渤海中南部	0.08~0.9	0.01~0.11	/	0.1~1.1	2007	[13]
长江口及邻近海域	0.32	0.03	0.06	0.77	2007	[18]
黄河口及邻近海域	0.46	0.04	/	/	2007	[19]
广东柘林湾	1.09	0.19	0.05	2.22	2008	[20]
粤西海域	0.74	0.16	0.024	/	2007	[7]

许多排污口,随着排污量的不断增加,到 2011 年青岛市已有 86% 的排污口存在超标排放 TP 的现象^[2],造成沉积物中 TP 含量出现回升。

近年来,胶州湾沉积物的 BSi 含量呈明显下降趋势,在 2003 年^[4]和 2009 年^[5]的两次调查中,BSi 含量均超过 1%,2009 年 BSi 含量最高(3.47%)^[5]。随后在 2015 年的调查中,BSi 含量急剧下降至 0.5% 以下^[14],而本研究中 3 个海域 BSi 的平均含量为 0.4% 左右(表 2),说明胶州湾海域硅藻生产力呈明显下降趋势。研究表明,近年来硅已成为胶州湾浮游植物生长的限制因子,并导致浮游植物生物多样性下降、甲藻等非硅藻类生物量上升、有毒有害赤潮发生频率呈增加趋势^[21-22]。此外,自 2007 年以来,青岛近岸海域连续多年遭受由浒苔引起的绿潮灾害,而大面积绿潮的发生也会对硅藻的生长产生一定的抑制作用,造成硅藻生物量下降^[23]。胶州湾是重要的菲律宾蛤仔养殖区,蛤仔的生物扰动可使硅酸盐从沉积物向水体转移,促进了 Si 的再生作用,进一步导致沉积物中 BSi 含量的下降^[24]。

3 结 论

(1) 青岛近岸海域表层沉积物中 TOC 含量

为 0.21%~1.43%, TN 含量为 0.02%~0.13%, TP 含量为 0.06%~0.15%, BSi 含量为 0.26%~0.60%。胶州湾和崂山近岸海域 TOC 和 TN 较高,文昌鱼保护区 TP 和 BSi 较高,胶州湾沉积物中 BSi 含量呈显著下降趋势。

(2) 胶州湾生源要素的分布规律总体呈现从内湾到外湾、从东北向西南的下降趋势;崂山近岸海域生源要素则以崂山头为中心,向两边递减;文昌鱼保护区生源要素在北部靠近市区处含量较高。

(3) 根据 TOC 与 TN 摩尔比得出,胶州湾和文昌鱼保护区有机质主要为海源输入,而崂山近岸海域沉积物中有机质为海源和陆源混合输入。TOC/BSi 均低于 Redfield 值,说明有机质的分解速率高于 BSi 的溶解速率。

(4) 通过生源要素污染评价得出,青岛近岸海域 TOC 污染程度较低,而 TP 污染较为严重,总体来说文昌鱼保护区的污染程度较轻。

参考文献:

- [1] 于 宇,宋金明,李学刚,等.沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义[J].生态学报,2012,32(5): 1623-1632.
- [2] 郑 琳,崔文林,刘 艳,等.青岛市近岸海域环境状况及变化趋势研究[J].海洋通报,2013,32(4): 446-451.

- [3] 刘 霜, 张继民, 张洪亮, 等. 青岛近海赤潮灾害分级与时空分布及赤潮生物的变化[J]. *水生态学杂志*, 2014, 35(4): 43-47.
- [4] DAI J C, SONG J M, LI X G, et al. Environmental changes reflected by sedimentary geochemistry in recent hundred years of Jiaozhou Bay, North China[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 145(3): 656-667.
- [5] WANG Z H, GUO X, ZHANG K, et al. Environmental changes in Jiaozhou Bay of northern China during the past 90 years using metals and biogenic elements in sediments[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, 53: 301-312.
- [6] 邢殿楼, 霍堂斌, 吴会民, 等. 总磷、总氮联合消化的测定方法[J]. *大连水产学院学报*, 2006, 21(3): 219-225.
- [7] 谷阳光, 王朝晖, 吕颂辉, 等. 粤西海域表层沉积物生源要素分布与污染评价[J]. *深圳大学学报: 理工版*, 2010, 27(3): 347-353.
- [8] 岳维忠, 黄小平, 孙翠慈. 珠江口表层沉积物中氮、磷的形态分布特征及污染评价[J]. *海洋与湖沼*, 2007, (02): 111-117.
- [9] ABE K, TSUJINO M, KAZAMA T, et al. Underestimation of nutrient fluxes due to possible bacterial activity during a core incubation experiment[J]. *Journal of Oceanography*, 2015, 71(3): 263-270.
- [10] SHEN Z J, YAO Y, WU Y L. Silica supply and diatom blooms in the Jiaozhou Bay, China[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2016, 35(10): 20-27.
- [11] LIU S M, YE X W, ZHANG J, et al. The silicon balance in Jiaozhou Bay, North China[J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 74(1/2): 639-648.
- [12] MEYERS P A. Organic geochemical proxies of paleoceanographic, paleolimnologic, and paleoclimatic processes[J]. *Organic Geochemistry*, 1997, 27(5/6): 213-250.
- [13] LIU D Y, LI X, EMEIS K C, et al. Distribution and sources of organic matter in surface sediments of Bohai Sea near the Yellow River Estuary, China[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 165: 128-136.
- [14] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of seawater[M]//HILL M N. *The Sea: Ideas and Observations on Progress in the Study of the Seas*. New York: Wiley Interscience, 1963: 26-77.
- [15] HYLAND J, BALTHIS L, KARAKASSIS I, et al. Organic carbon content of sediments as an indicator of stress in the marine benthos[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 2005, 295: 91-103.
- [16] 韩天伟, 吕晓霞, 宋金明, 等. 南黄海表层沉积物中生源要素的分布规律及其环境意义[J]. *广西科学院学报*, 2017, 33(2): 87-92, 101.
- [17] 汪雅露, 袁华茂, 宋金明, 等. 胶州湾沉积物-海水界面硅的交换速率及其影响因素探讨[J]. *海洋学报*, 2016, 38(12): 55-65.
- [18] YANG B, CAO L, LIU S M, et al. Biogeochemistry of bulk organic matter and biogenic elements in surface sediments of the Yangtze River Estuary and adjacent sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2015, 96(1/2): 471-484.
- [19] 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.
- [20] 冯 杰, 王朝晖, 谷阳光, 等. 柘林湾养殖区表层沉积物中生源要素的分布[J]. *暨南大学学报: 自然科学与医学版*, 2011, 32(1): 69-73.
- [21] 吴玉霖, 孙 松, 张永山. 环境长期变化对胶州湾浮游植物群落结构的影响[J]. *海洋与湖沼*, 2005, 36(6): 487-498.
- [22] 孙晓霞, 孙 松, 吴玉霖, 等. 胶州湾网采浮游植物群落结构的长期变化[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 639-646.
- [23] 张 雪, 栾青杉, 孙坚强, 等. 绿藻浒苔对浮游植物群落结构影响研究[J]. *海洋科学*, 2013, 37(6): 24-31.
- [24] 孙晓霞, 孙 松, 赵增霞, 等. 胶州湾营养盐浓度与结构的长期变化[J]. *海洋与湖沼*, 2011, 42(5): 662-669.