

Doi :10.11840/j.issn.1001-6392.2015.02.015

莱州湾西南部海域及其毗邻河流水体营养盐的分布特征及长期变化趋势

张锦峰^{1,2}, 高学鲁¹, 李培苗¹, 庄文¹, 周凤霞¹

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 鲁东大学 化学与材料科学学院, 山东 烟台 264025)

摘 要: 根据 2012 年 9 月对莱州湾西南部海域及其毗邻 10 条河流的调查结果, 以及近 30 年来关于莱州湾海域表层水营养盐的调查资料, 报道了各条河流和近海海域的营养盐状况及该海域营养盐的长期变化趋势, 结果表明: (1) 10 条主要调查河流的总溶解态氮 (TDN) 平均含量在 1.82 ~ 10.66 mg/L 之间, 其中有 8 条河流超过河流总氮劣五类水质标准, 6 条河流硝态氮 ($\text{NO}_3\text{-N}$) 含量高于氨氮 ($\text{NH}_4\text{-N}$)。 (2) 所调查的 5 个近海断面中小清河口近海断面、虞河口近海断面及溢洪河口近海断面的 DIN 平均含量超过海水无机氮第四类水质标准; 除小清河口近海断面外其余近海断面活性磷 ($\text{PO}_4\text{-P}$) 含量均属一类海水水质。 (3) 部分断面营养盐含量在河口混合区淡水端升高, 可能与咸淡水混合动力作用相关; 莱州湾西部区域营养盐含量高于南部区域, 南部的堤河氮、磷含量极高; 原油开采活动可能是影响附近水体中营养盐含量及形态的重要因素。 (4) 从 20 世纪 80 年代初至 90 年代中期, 莱州湾表层水无机氮平均含量经历了由低到高的变化, 到 90 年代后期已属劣四类海水水质; 无机磷平均含量在该时段呈降低趋势, 但到 90 年代后期也保持在较高水平, 随后又波动下降。 (5) 所调查的莱州湾近海区域整体处于磷限制潜在富营养状态; 氮磷摩尔比 (N:P) 在所考察的大部分时段内高于 Redfield 阈值 (16), 净营养盐收支呈磷减少而氮增加的总体变化趋势, 近年来磷限制程度有所减缓。

关键词: 莱州湾; 河流; 氮; 磷; 硅; 富营养; 年际变化

中图分类号: X171.1

文献标识码: A

文章编号: 1001-6932(2015)02-0222-11

Nutrient distribution characteristics and long-term trends in the southwest of the Laizhou Bay and its adjacent rivers

ZHANG Jin-Feng^{1,2}, GAO Xue-Lu¹, LI Pei-Miao¹, ZHUANG Wen¹, ZHOU Feng-Xia¹

(1. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai 264003, China; 2. School of Chemistry and Materials Science, Ludong University, Yantai 264025, China)

Abstract: Dissolved nitrogen and phosphorus in surface waters of the southwestern nearshore area of the Laizhou Bay and the adjacent 10 rivers that it connects with were surveyed in September 2012 and the long-term variation trends of them were studied based on the historical data of the past 30 years. The main findings are as follows: (1) The average total dissolved nitrogen concentrations of the 10 rivers ranged from 1.82 mg/L to 10.66 mg/L, most of which exceeded the river-water standard Grade V of China. (2) The average dissolved inorganic nitrogen concentrations in 3 transects (Xiaoqinghe river transect, Yuhe river transect, Bailanghe river transect) of the 5 surveyed nearshore transects exceeded the seawater standard Grade IV of China (0.5 mg/L); the average active phosphorus concentrations in 4 sections of the 5 surveyed nearshore sections were below the seawater standard Grade I of China. (3) The nutrient concentrations in the upper reaches of some estuaries maintained a high level, which maybe correlate to intense mixing of seawater and freshwater. The nutrient concentrations in the western part of the studied area were higher than those in the bottom part of the Bay. The nutrient

收稿日期: 2014-06-10; 修订日期: 2014-07-21

基金项目: 山东省科技发展计划项目 (2012GHY1153)。

作者简介: 张锦峰 (1979-), 男, 博士研究生, 讲师。电子邮箱: zhjf_2005@163.com。

通讯作者: 高学鲁, 博士, 研究员。电子邮箱: xlgao@yic.ac.cn。

<http://hytb.nmdis.org.cn>

concentrations of the Dihe River in the bottom part of the Bay were especially higher. Crude oil mining activities may affect nutrient content and morphology of the neighboring aquatic body. (4) The average concentration of inorganic nitrogen in the Laizhou Bay experienced a transition from a low level to a high one, which was worse than the seawater standard Grade IV of China after the year of 1995. (5) Since the late 1980 s, phosphorus has been in the nutrient limiting phytoplankton growth in the Laizhou Bay, and the molar ratios of nitrogen and phosphorus were higher than Redfield threshold (16) for most of the survey period, but the extent of phosphorus limitation has eased relatively in recent years.

Keywords : Laizhou Bay; rivers; nitrogen; phosphorus; silicate; eutrophication; inter-annual variations

由于营养盐的过度富集,富营养化已经成为全球海岸带生态系统的主要环境问题 (Cloern, 2001; Seitzinger et al, 2005),这种富营养化与沿岸的人口增长、工农业生产以及水产养殖直接相关,营养盐的地球化学循环,特别是营养盐向河口和近岸海域的迁移过程受人类活动的影响巨大 (Gao et al, 2012; 高学鲁等, 2007; Howarth et al, 2002; Howarth et al, 2006; 边佳胤等, 2013)。营养盐的含量增长和组成变化不仅能引发严重的环境问题,而且影响浮游植物的生物组成和群落结构 (Wang et al, 2012; 穆迪等, 2012)。在人类活动的影响下,海岸带区域环境状况正在发生着深刻变化。其中,营养盐含量和分布的改变所引起的一系列海洋生态系统结构和功能变化已引起越来越多的重视 (Philippart et al, 2000; Yu et al, 2001; 刘霜等, 2013)。

莱州湾位于山东半岛西北,渤海南部,是典型的半封闭型内海,占渤海总面积的 1/10,其西南岸分布有大小 10 多条河流和山东省的 10 多个市、县、区。由于拥有丰富的石油资源、海水资源和地下卤水资源,该区域已经成为山东省重要的化学工业基地,超过 400 个化工企业坐落于此,生产 150 多种化工产品,是全世界最大的工业纯碱产生基地。本课题组近期的研究发现,由于密集的人类活动,该区域受到某些重金属的污染 (Zhuang et al, 2013),可以预期,大量营养物质也将伴随着工农业废水和生活污水排入附近河流及近海。

莱州湾曾是渤海最主要的渔业区,是黄渤海生态系统中渔业生物的产卵场与索饵场。进入 20 世纪 90 年代,由于沿岸经济的快速发展、陆源排污量的迅猛增加、黄河淡水入海量的锐减等原因,莱州湾海域环境质量不断下降,导致了经济海洋生物产卵场萎缩,渔业资源遭到破坏,底栖生物多样性急剧减少,海洋生境恶化 (崔毅等, 2003; 纪大伟等, 2007; 李显森等, 2008; 许思思等,

2010; Zhang et al, 2012)。特别是含营养盐类和重金属类污染物的过量排放引起海水污染和水域富营养化,给莱州湾生态环境和生物群落造成严重的危害 (Gao et al, 2013; 胡宁静等, 2012; 宁璇璇等, 2011; Zhao et al, 2013)。因此,及时掌握和了解莱州湾及附近河流的营养盐状况及其长期变化规律,对于今后研究赤潮灾害、控制环境污染和保护海洋生态环境等都具有重要意义。本文通过 2012 年 9 月对莱州湾西南区域 5 个河口近海断面和 10 条毗邻河流的综合调查,结合对近 30 年来关于莱州湾海域表层水营养盐调查资料的分析,报道了莱州湾西南海域及其毗邻河流中氮、磷及硅的含量和分布特征,评价了近海区域的营养状况,并探讨了该区域氮、磷的长期变化趋势,以期为相关科学研究和政府决策提供参考。

1 样品采集与分析

1.1 样品采集

本研究的样品采集时间为 2012 年 9 月 23 日 - 2012 年 10 月 1 日,正值雨季刚过,河流处于丰水期,大量营养物质汇入河流及近海。采样站位设置在莱州湾西南海域毗邻的 10 条河流及 5 个入海口近海断面上,其中河流及河口混合区站位 39 个,覆盖从高潮线向内陆延伸 15 ~ 20 km 的范围;近海站位 15 个,覆盖从高潮线向近海延伸 10~15 km 的范围。调查区域为典型的河流-海湾生态系统,也是人类活动密集的区域,因此对该区域营养盐的研究具有一定的代表性,调查站位设置见图 1。在每个站位采集 500 mL 表层水 (< 0.5 m) 装于高密度聚乙烯瓶中,样品瓶用 1:10 盐酸溶液浸泡 24 h 后,用超纯水冲洗 3 次并在干燥箱中烘干,使用前又经超纯水冲洗 2 次。水样经醋酸纤维滤膜 (Whatman, 0.45 μm) 过滤后,在 4 $^{\circ}\text{C}$ 下冷藏保存,并尽快运回实验室测试。

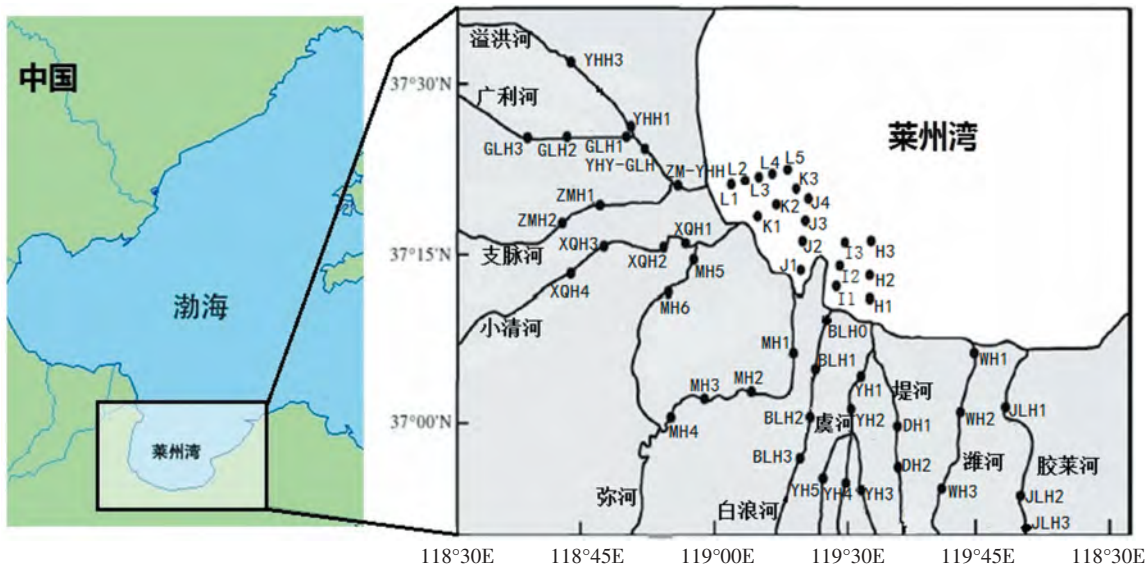


图 1 采样站位图

1.2 样品分析

营养盐分析：水样经过滤后，分别取 10 mL 装入比色管（每个样品 3 个重复，比色管经 1:10 盐酸溶液浸泡 24 h，并用超纯水冲洗 3 次，后在干燥箱中烘干），用连续流动分析仪（Seal Auto Analyzer III 德国）测定总溶解态氮（TDN）、硝态氮（NO₃-N）、亚硝态盐（NO₂-N）、氨氮（NH₄-N）、总溶解态磷（TDP）、活性磷酸盐（PO₄-P）、总溶解态硅酸盐（TDSi）。溶解态无机氮（DIN）为 NO₃-N、NO₂-N 及 NH₄-N 之和，溶解态有机氮（DON）用 TDN 减去 DIN 计算，溶解态有机磷（DOP）用 TDP 减去 PO₄-P 计算。盐度用奥利龙 Star A329 便

携式多参数测量仪现场测定。

莱州湾近 30 年营养盐数据源于中国海洋环境质量公报（国家海洋局，1982-1998）和单志欣等（1996），米铁柱等（2001），曲克明等（2001），高会旺等（2003），崔毅等（2003），万修全等（2004），陈立群（2004），郝彦菊等（2005），沈新强等（2005），孙丕喜等（2006），夏斌等（2009），刘义豪等（2011），胡宁静等（2012）的研究及本次调查的结果。本文所考察指标的年度数据均采用该年度关于莱州湾表层水营养盐的文献数据平均值，通过比较各年度的平均数据，考察莱州湾氮、磷的总体变化趋势。

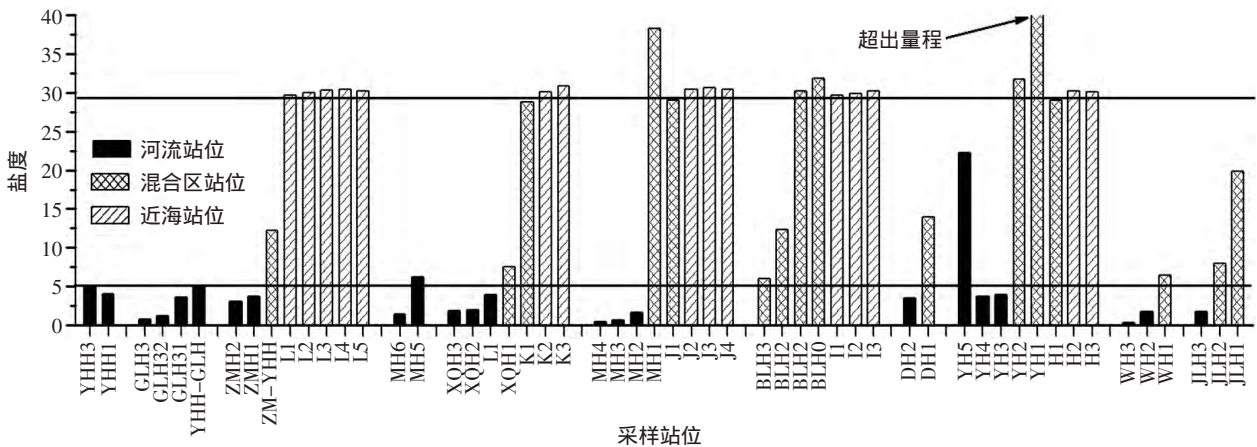


图 2 莱州湾西南海域及其毗邻河流盐度的空间分布特征

2 结果与讨论

野外调查的主要对象为莱州湾西南部毗邻的 10 条入海河流及 5 个入海口近海断面的溶解态氮、溶解态磷和硅酸盐，所讨论各条河流及近海的营养盐平均含量为该河流或断面各采样点数据的平均值。莱州湾内平均盐度大约为 29 (张洪亮等, 2006; 赵鹏等, 2010)，根据所在位置及盐度，把所调查站位分为河流站位、河口混合区站位及近海站位，其中盐度低于 5 的为河流站位，盐度在 5 ~ 29 之间为河口混合区站位，盐度大于 29 的为近海站位，站点 MH1、BLH1、BLH2、YH1 和

YH2 的盐度特别的高，可能与站位位于盐场附近有关，根据所处位置也划分为河口混合区站位。莱州湾西南及其毗邻河流盐度空间分布如图 2 所示。营养盐的长期变化趋势主要根据近 30 年来对莱州湾海域表层水营养盐的调查资料，以及本次调查的结果，分析莱州湾海域无机氮、无机磷、氮磷比的长期变化趋势。结果讨论如下。

2.1 莱州湾西南海域及毗邻河流的氮含量及分布特征

2.1.1 TDN 分布的一般特征

莱州湾西南海域及其毗邻河流中 TDN 含量及分布如图 3 所示。

TDN 含量的一般特征为：河流站位 > 河口混

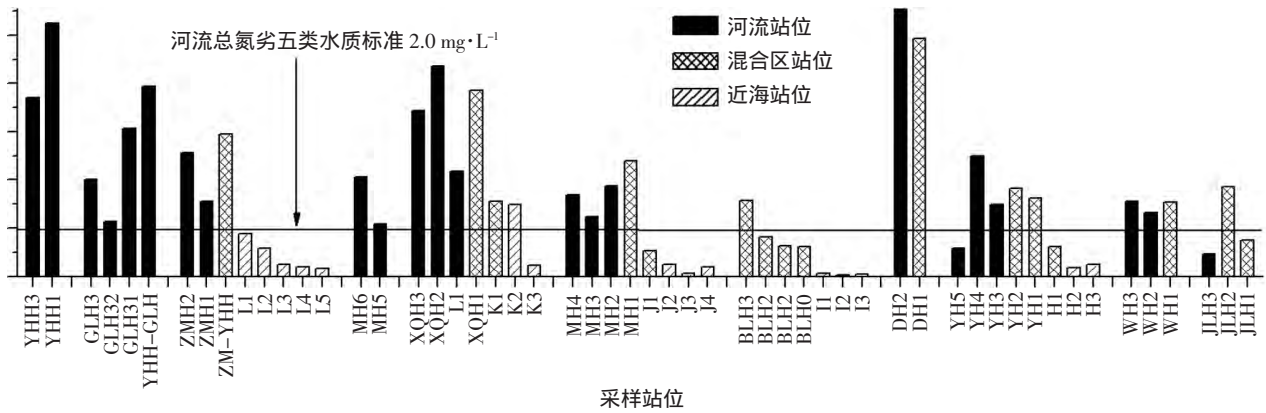


图 3 莱州湾西南海域及其毗邻河流 TDN 含量的空间分布特征

合区站位 > 近海站位，而且河流不同站位 TDN 含量差异大于近海各站位的差异；河流中 TDN 平均含量为 4.66 mg/L，标准偏差为 2.3 mg/L；近海 TDN 平均含量为 0.85 mg/L，标准偏差为 0.67 mg/L；河口混合区及近海的 TDN 含量与其毗邻河流中含量相一致，即毗邻河流 TDN 含量高则相应混合区及近海中 TDN 含量也较高，说明莱州湾的 TDN 主要来源于陆源输入；在溢洪河口混合区、小清河河口混合区及弥河口混合区的淡水端均出现 TDN 高值站点，特别是弥河口淡水端的 TDN 含量为该断面最高值，这种现象可能与咸淡水混合作用有关。溢洪河 (YHH)、广利河 (GLH)、小清河 (XQH)、堤河 (DH) 及弥河 (MH) 的大部分站点 TDN 含量很高，超过地表水总氮劣五类水质标准 (GB 3838-2002)，人类活动的影响可能是这些河流中氮含量高的重要诱因，溢洪河和广利河流经东营市区，小清河源于济南，流经山东省十几个

县市，弥河下游分布有潍坊市滨海经济技术开发区的很多化工厂，堤河为昌邑市的重要排污河道，工农业废水和生活污水的大量排入，使这些河流中氮含量居高不下。近岸海域 TDN 呈现从岸到海含量逐渐降低的趋势，其中小清河河口近海 TDN 平均含量最高。

2.1.2 各河流中氮的特征

莱州湾毗邻的 10 条河流中 TDN 平均含量在 1.82 ~ 10.66 mg/L 之间，除白浪河 (BLH)、胶莱河接近河流总氮劣五类水质标准外，其余 8 条河流：溢洪河、广利河、支脉河 (ZMH)、小清河、弥河、虞河 (YH)、堤河和潍河 (WH)，都超过劣五类水质标准 (GB 3838-2002)，其中溢洪河和堤河超标最为严重，分别超标 4 倍和 5 倍，其次为小清河、广利河、支脉河及弥河，分别超标 3.5 倍、2 倍和 1.5 倍；总体来看，西部区域河流的 TDN 含量高于南部区域的河流，南部区域的堤河

TDN 含量最高。所调查的 6 条河流中 DIN 平均含量高于 DON，特别是在堤河和小清河中 DIN 含量高出 DON 两倍以上，但在溢洪河、弥河及潍河中 DON 平均含量高于 DIN，特别是在溢洪河中 DON 含量占到 TDN 含量的 90% 以上；莱州湾西南毗邻 10 条河流的氮平均含量见图 4。

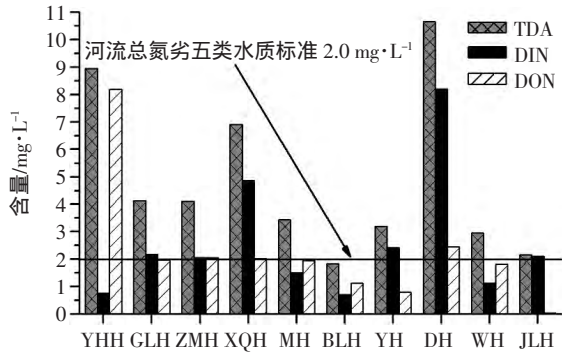


图 4 所调查河流平均氮含量

所调查河流中无机氮的形态特征见图 5，溢洪河、广利河、支脉河及堤河的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均含量高于 $\text{NO}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2\text{-N}$ ，特别是堤河中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均含量是 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 $\text{NO}_2\text{-N}$ 之和的 10 倍以上，而其余 6 条河流大都表现出 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均含量高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 及 $\text{NO}_2\text{-N}$ 的特点，其中小清河、弥河及虞河中的 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量最高；与其他河流不同的是弥河中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 平均含量高出于 $\text{NO}_2\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4\text{-N}$ 很多，且弥河中 $\text{NO}_2\text{-N}$ 平均含量高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ ，这种特殊性可能与弥河流经的潍坊滨海经济技术开发区的点源污染有关；溢洪河、广利河、支脉河都流经东营市的胜利油田区域，其中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均含量偏高可能与原油开采活动有关；

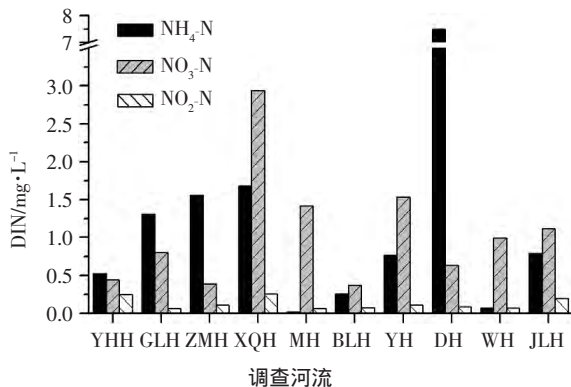


图 5 所调查河流中无机氮的形态

堤河为昌邑市的重要排污河道，沿岸有很多印刷厂、造纸厂等重污染企业，其中的 $\text{NH}_4\text{-N}$ 可能来源于点源污染。

2.1.3 各近海断面氮的特征

所调查的 5 个近海断面，分别为溢洪河口近海断面 (YHHK)、小清河河口近海断面 (XQHHK)、弥河口近海断面 (MHHK)、白浪河口近海断面 (BLHHK)、虞河口近海断面 (YHHK)，各断面 TDN 平均含量由高到低的顺序为：XQHHK > YHHK > YHHK > MHHK > BLHHK，这与相应河流中的 TDN 平均含量基本保持一致，微小的差异来自于各河流流量的不同；小清河近海断面、虞河近海断面及溢洪河近海断面的 DIN 平均含量超过海水无机氮第四类水质标准，其中小清河近海断面 DIN 含量最高，达 0.79 mg/L，白浪河近海断面 DIN 含量最低为 0.26 mg/L，但也超过海水无机氮第二类水质标准；除小清河河口近海断面外，其余 4 个断面的 DON 平均含量都低于 DIN 含量，这说明小清河河口近海氮的来源比其他河口近海更复杂，这与小清河受人类活动影响更复杂相一致。莱州湾西南部主要河口近海的氮平均含量见图 6。

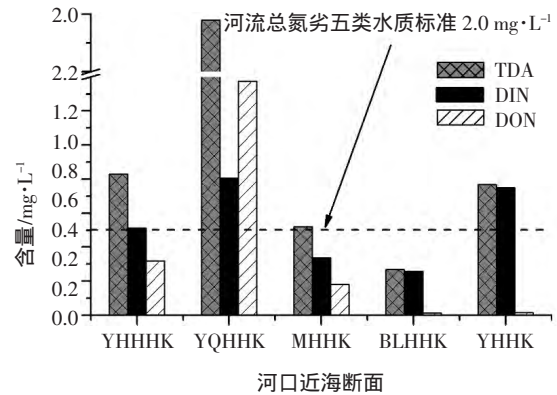


图 6 所调查近海断面氮平均含量

所调查各近海断面中无机氮的形态特征见图 7，除小清河河口近海断面外，其余四个断面的无机氮形态特征都表现为 $\text{NO}_3\text{-N} > \text{NH}_4\text{-N} > \text{NO}_2\text{-N}$ ，小清河河口近海断面中 $\text{NH}_4\text{-N}$ 含量最高，达 0.52 mg/L，这进一步说明小清河中氮源的复杂性；五个断面的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 含量基本保持在同一水平，说明该区域的 $\text{NO}_2\text{-N}$ 很可能来自面源；虞河口近海断面 $\text{NO}_3\text{-N}$ 与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 的高含量与虞河口为虞河与堤河的公共河口有一定关系。

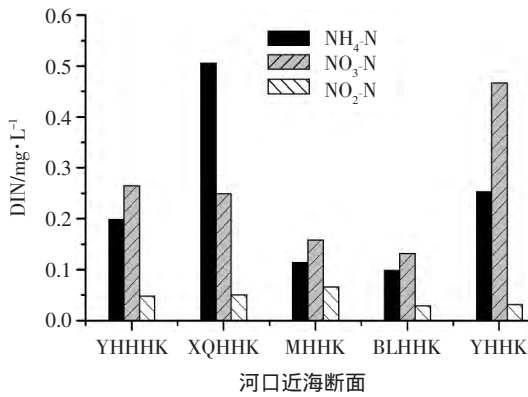


图7 所调查近海断面无机氮的形态

2.2 莱州湾西南海域及毗邻河流的磷含量及分布特征

2.2.1 TDP 分布的一般特征

莱州湾西南海域及其毗邻河流中 TDP 含量及分布如图 8 所示。河流中 TDP 含量高于河口混合区及近海，河流中 TDP 平均含量为 0.14 mg/L，标准

偏差为 0.11 mg/L，近海 TDP 平均含量为 0.03 mg/L，标准偏差为 0.01 mg/L；其中只有溢洪河和支脉河的少数站点 TDP 含量超过河流总磷第四类水质，广利河、小清河及堤河的少数站点超河流总磷第三类水质（中国地表水环境质量标准 GB 3838-2002），潍河、虞河及弥河的大部分站点 TDP 含量较低，均未达到河流总磷第二类水质；弥河口混合区淡水端站点 MH1 的 TDP 含量也特别高，与该站点 TDN 含量高的特点一致，这种现象可能与站点 MH1 和邻近的淡水站点 MH2 之间存在一个较大的急弯导致咸淡水混合动力学结构的特殊性有关。支脉河中 TDP 平均含量最高，而其中 TDN 平均含量相对较低，说明了该区域的氮和磷可能来自不同的源，支脉河流经农业相对发达的广饶县，磷很可能更多地来源于农业生产中磷肥的使用。除虞河口断面外，其余 4 个断面的 TDP 含量呈现从岸到海逐渐降低的趋势。

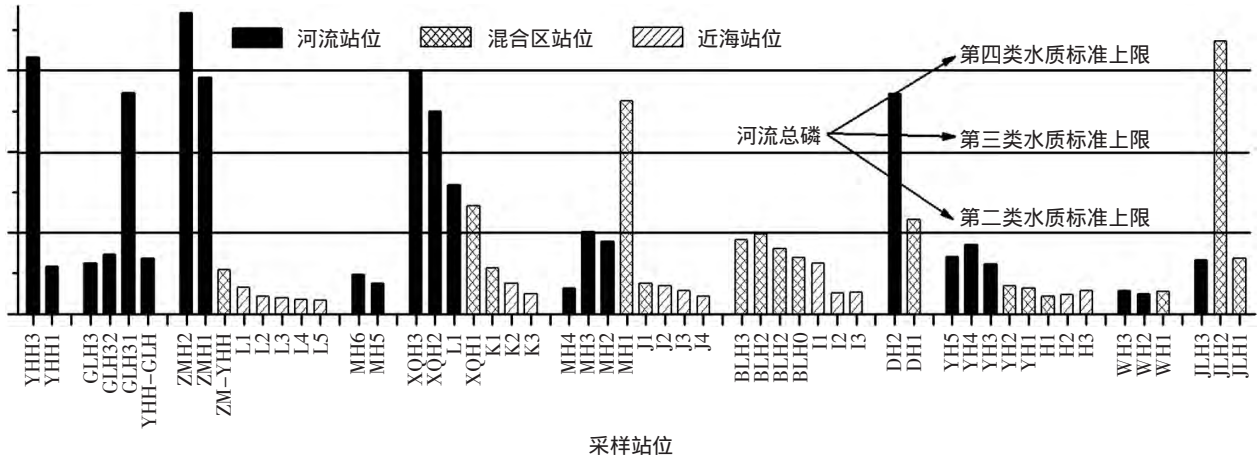


图8 莱州湾西南海域及其毗邻河流 TDP 的空间分布特征

2.2.2 各河流中磷的特征

莱州湾西南毗邻的 10 条河流中除广利河、虞河及潍河外，其余 7 条河流的 TDP 平均含量都超过河流总磷第二类水质标准（中国地表水环境质量标准 GB 3838-2002），特别是支脉河、小清河、堤河等河流已经达到或超出第三类水质标准。值得关注的是支脉河、小清河及胶莱河中的活性磷酸盐占 TDP 的比例较高，超过 TDP 含量的 50%，远高于其他河流，莱州湾西南岸河流的磷平均含量见图 9；各河流 DOP 平均含量见图 11。可以看出湾西岸河流中 DOP 平均含量总体高于南岸河流，但湾南岸的堤河中 DOP 含量是所有河流中最高的，含量为 0.126 mg/L。

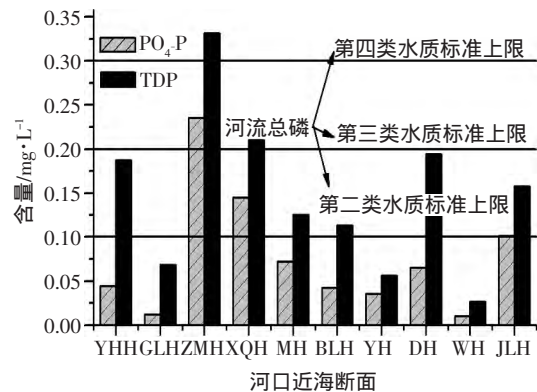


图9 所调查河流磷平均含量

2.2.3 各近海断面磷的特征

所调查的 5 个近海断面活性磷平均含量，只有小清河近海断面超过海水活性磷第一类水质标准，其余断面活性磷含量均属一类海水水质，其中白浪河近海断面活性磷平均含量最低仅为 0.005 mg/L。五个断面活性磷含量都相对较低，这种结果与 Liu 等 (2012) 在黄河口近海的调查结果相似，说明莱州湾近海区域营养盐的普遍特征是氮含量高而磷含量相对较低，近海断面的磷平均含量见图 10；各近海断面 DOP 平均含量由高到低的顺序为：BLHKK>XQHKK>MHKK>YHHKK>YHKK，其中白浪河口近海断面 DOP 的高含量与该断面的 TDN 低含量形成鲜明对比，进一步说明该区域氮、磷来自不同的源。各近海断面 DOP 平均含量见图 11。

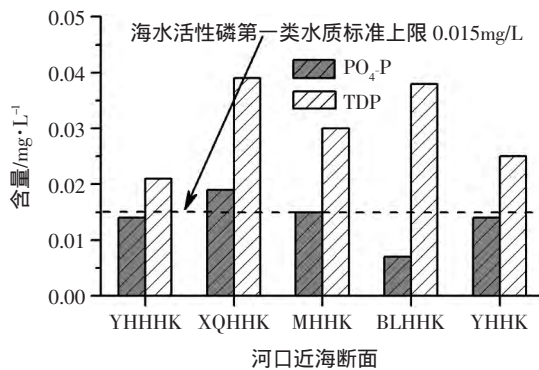


图 10 所调查近海断面磷平均含量

2.3 莱州湾西南海域及毗邻河流硅酸盐含量及分布特征

莱州湾西南海域及其毗邻河流中硅酸盐含量及分布如图 12 所示。河流中硅酸盐含量高于近海；

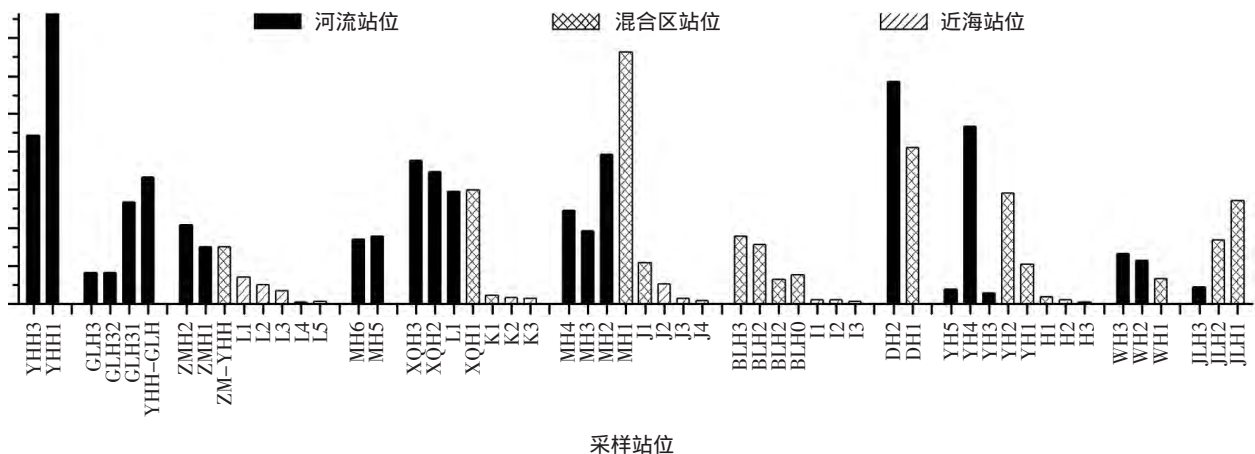


图 12 莱州湾西南海域及其毗邻河流硅酸盐含量及分布特征

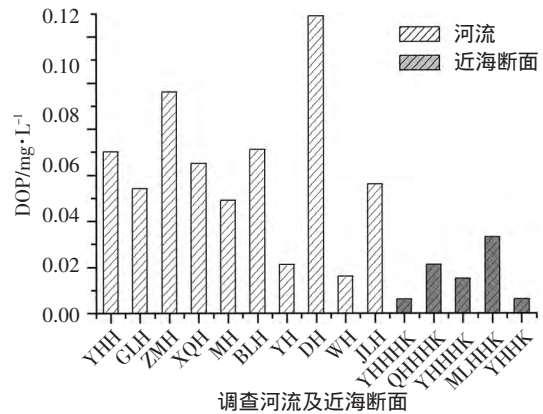


图 11 所调查河流及近海断面 DOP 平均含量

河流中硅酸盐平均含量为 4.90 mg/L，标准偏差为 3.32 mg/L；近海硅酸盐平均含量为 0.41 mg/L，标准偏差为 0.42 mg/L；大部分断面的硅酸盐含量表现出从上游到近海逐渐下降的趋势，但值得关注的是除潍河口外，其余河口混合区的淡水端 TDSi 含量均高于最邻近的上游站点，这种现象可能与淡水端咸淡水剧烈相互作用导致更多硅酸盐矿物溶解到海水有关，同时也在一定程度上说明该区域内硅酸盐主要来自矿物风化。

2.4 莱州湾西南近岸海域富营养化状况分析

根据前文数据，所调查海区氮的污染程度要比磷高，所以氮对该区域富营养化的贡献要大于磷，故选用郭卫东等 (1998) 提出的用 N、P 作为参数的富营养化评价模式进行评价 (表 1)。

所调查的 5 个近海断面平均 DIN、DIP (以 PO₄-P 计) 含量见表 2。根据郭卫东等 (1998) 提出的海水富营养化评价指标可以得出，除白浪河口近海为磷限制中度营养外，其余 4 个断面都处于

表 1 潜在性富营养化等级划分

级别	营养等级	DIN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	DIP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	n(N):n(P)
I	贫营养	< 0.2	< 0.03	8 ~ 30
II	中度营养	0.2 ~ 0.3	0.03 ~ 0.45	8 ~ 30
III	富营养	> 0.3	> 0.045	8 ~ 30
IV _p	磷限制中度营养	0.2 ~ 0.3	-	> 30
V _p	磷中等限制潜在性富营养	> 0.3	-	30 ~ 60
VI _p	磷限制潜在性富营养	> 0.3	-	> 60
IV _N	氮限制中度营养	未限制	0.03 ~ 0.45	< 8
V _N	氮中等限制潜在性富营养	未限制	> 0.045	4 ~ 8
VI _N	氮限制潜在性富营养	未限制	> 0.045	< 4

磷限制潜在富营养状态，其中小清河河口近海和虞河河口近海为磷限制潜在性富营养，溢洪河口近海和弥河河口近海为磷中等限制潜在性富营养。可以认为所调查的莱州湾西南海域整体处于磷限制潜在富营养状态，这与 Chai 等 (2009) 在长江口及其近海区域的调查结果一致，说明中国近海的磷限制潜在富营养状态有一定普遍性。

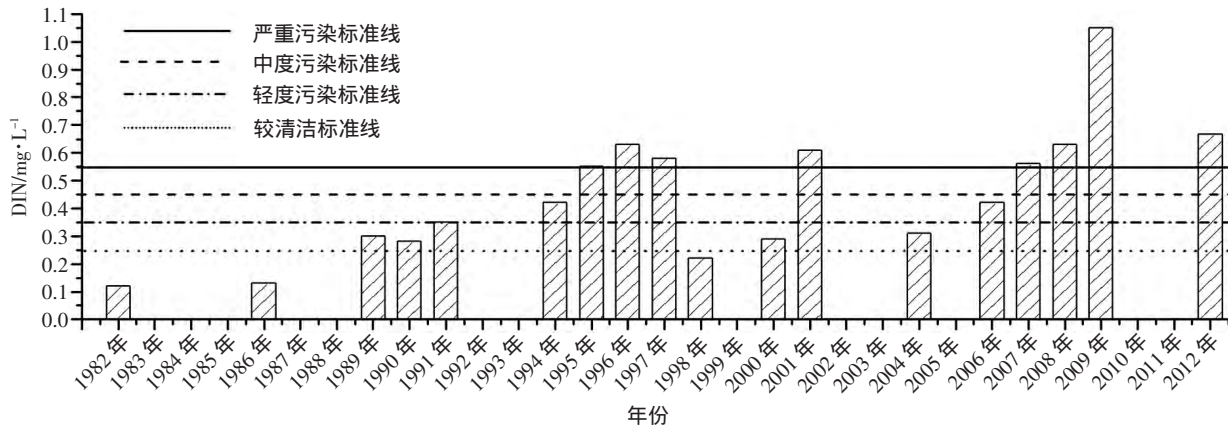


图 13 莱州湾无机氮平均含量长期变化

数据来源:中国海洋环境质量公报(1982~11998),单志欣等(2000),郝彦菊等(2005),淮毅等(2003),米铁柱等(2001),曲克明等(2002),高会旺等(2003),万修全等(2004),陈立群(2004),孙丕喜等(2006),刘义豪等(2011),夏斌等(2009),以及本次调查结果等。

2.6 莱州湾无机磷含量长期变化

根据近 30 年来关于莱州湾表层水中营养盐的历史研究数据,以及本次调查结果,分析莱州湾海水中无机磷平均含量的变化,可以认为有如下变化趋势:从 20 世纪 80 年代初到 90 年代中期,莱州湾无机磷平均含量呈总体降低趋势,从 1982 年的 0.067 mg/L ,降低到 1995 年的 0.012 mg/L ;20 世纪 90 年代中后期至 21 世纪初莱州湾无机磷平均含量保持在较高水平,平均为 0.041 mg/L ;进入 20 世纪以来莱州湾无机磷平均含量又经历了持续下降的过程,到 2009 年已经降低到 0.007 5 mg/L ;本次调

表 2 所调查河口近海的潜在性富营养化评价

站位	YHHK	BLHHK	XQHHK	MHHK	YHHHK
平均 DIN/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.76	0.26	0.79	0.35	0.51
平均 DIP/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	0.013	0.005	0.018	0.015	0.014
n(N):n(P)	87.7	78	66.7	35	54.6
营养等级	VI _p	IV _p	VI _p	V _p	V _p

2.5 莱州湾无机氮含量长期变化

根据近 30 年来关于莱州湾表层水中营养盐的历史研究数据,以及本次调查结果,分析莱州湾无机氮平均含量的变化,可以认为有如下变化趋势:20 世纪 80 年代中前期,莱州湾无机氮平均含量小于 0.2 mg/L ,符合一类海水水质标准;80 年代末至 90 年代初,海水无机氮开始从轻度污染向中度污染过度,平均含量在 0.25~0.35 mg/L 之间;在 90 年代中后期到 2012 年之间无机氮平均含量除在某些年份有降低或升高外基本保持在严重污染水平,属劣 4 类海水水质。莱州湾无机氮平均含量长期变化见图 13。

查的莱州湾 2012 年无机磷平均含量为 0.03 mg/L ,这可能与采样区域设置有关,但一定程度上也说明近年来莱州湾的磷限制程度有所减弱。莱州湾无机磷平均含量长期变化见图 14。

20 世纪 90 年代,莱州湾海域中 N 和 P 都有明显上升趋势,这可能与自 90 年代以来莱州湾西南岸土地利用方式的剧烈改变有关。20 世纪 90 年代以前,莱州湾西南岸主要为未开垦的滨海湿地,90 年代之后石油、化工等产业建设加剧以及配套的基础设施等建设用地增加(陈立群,2004),相应地湿地减少,流域土壤保持 N 和 P 营养盐的效率下

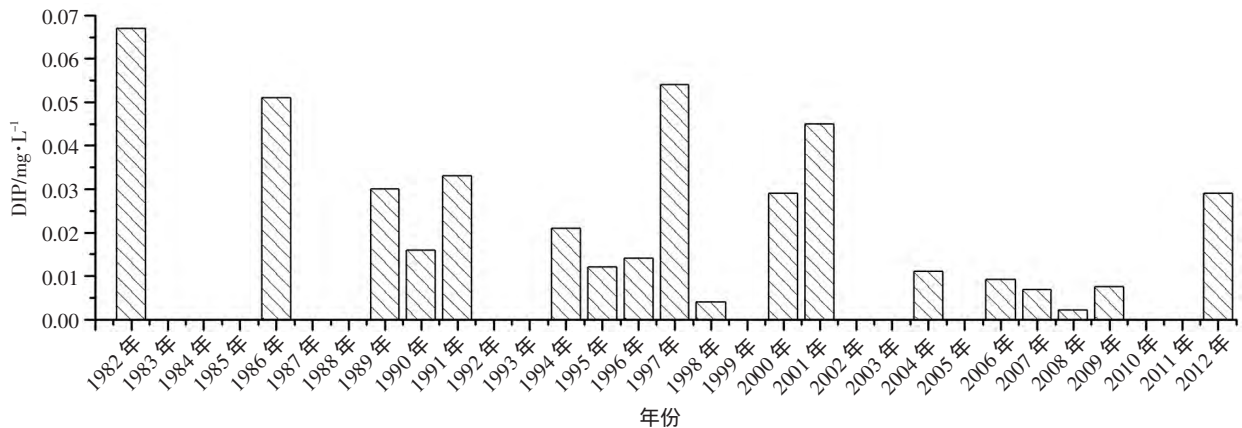


图 14 莱州湾无机磷平均含量长期变化

数据来源:中国海洋环境质量公报(1982~1998),单志欣等(2000),郝彦菊等(2005),崔毅等(2003),米铁柱等(2001),曲克明等(2002),高会旺等(2003),万修全等(2004),陈立群(2004),孙丕喜等(2006),刘义豪等(2011),夏斌等(2009),以及本次调查结果等。

降, N 和 P 营养盐流失严重(颜秀丽等, 2012)。

2.7 莱州湾氮磷比长期变化

莱州湾海域的氮磷摩尔比,除了在上世纪 80 年代初至 90 年代末低于 Redfield 阈值 16 外,其余大部分时段氮磷比偏高,而且有逐年升高的趋势,氮磷比从 1982 年的 4.1 增加到了 2009 年的 199,说明莱州湾海水从 20 世纪 90 年代初由氮限制

转变为磷限制,且该海域从 20 世纪 90 年代以来的大部分时段内均处于磷限制潜在富营养状态。富营养为赤潮爆发提供了条件,这也是 20 世纪 90 年代以来莱州湾赤潮频发的根源。但本次调查的结果显示 2012 年莱州湾氮磷摩尔比在 50 左右,说明磷限制程度有所减缓。莱州湾海域氮磷比长期变化见图 15。

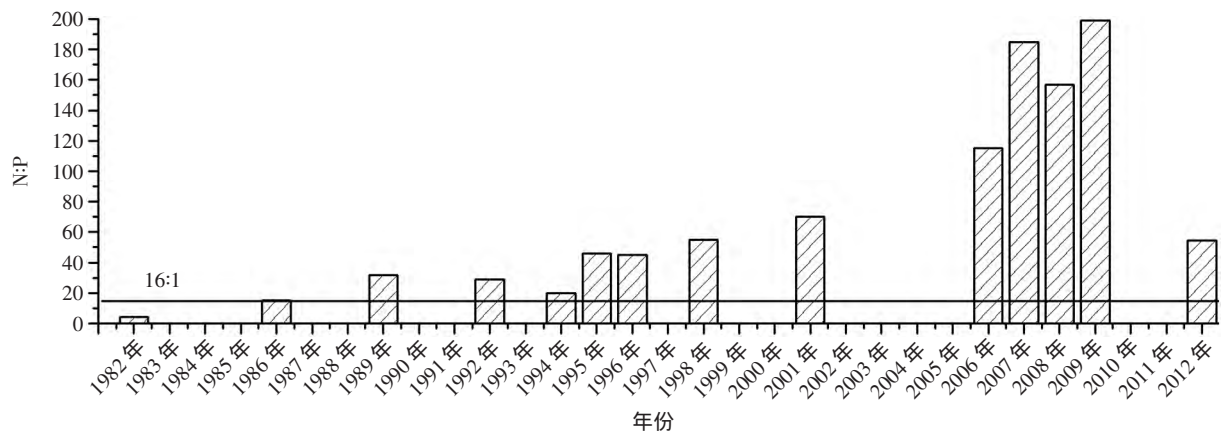


图 15 莱州湾氮磷摩尔比长期变化

数据来源:刘义豪等(2011);郝彦菊等(2005);米铁柱等(2001);曲克明等(2002);崔毅等(2003);孙丕喜等(2006);李广楼等(2007);以及本次调查结果等。

3 结语

莱州湾西南岸毗邻河流中氮含量远高于近海,河流中 TDN 平均含量为 4.66 mg/L;近海 TDN 平均含量为 0.85 mg/L;10 条河流的 TDN 平均含量,除白浪河、胶莱河接近河流总氮劣五类水质标准外,

其余 8 条河流:溢洪河、广利河、支脉河、小清河、弥河、虞河、堤河和潍河,都超过河流总氮劣五类水质标准;人类活动的影响可能是这些河流中 TDN 含量高的重要诱因。所调查的 5 个近海断面中小清河口近海断面、虞河口近海断面及溢洪河口近海断面的 DIN 平均含量超过海水无机氮第四类水质标准,其中小清河口近海断面 $\text{NH}_4\text{-N}$ 平均含量

超过 $\text{NO}_3\text{-N}$ ，其余 4 个断面均为 $\text{NO}_3\text{-N}$ 含量高于 $\text{NH}_4\text{-N}$ 。

莱州湾西南岸毗邻河流中 TDP 含量高于近海；河流中 TDP 平均含量为 0.14 mg/L；近海 TDP 平均含量为 0.03 mg/L；5 个河口近海断面 $\text{PO}_4\text{-P}$ 平均含量都较低，只有小清河断面超过海水活性磷第一类水质标准；莱州湾及其毗邻河流中 TDSi 含量表现出河流中高于近海的特点，在河口混合区的淡水端 TDSi 出现较高值；河流中硅酸盐平均含量为 4.90 mg/L；近海硅酸盐平均含量为 0.41 mg/L。除白浪河河口近海为磷限制中度营养外，其余 4 个近海断面都处于磷限制潜在富营养状态，其中小清河河口近海和虞河河口近海为磷限制潜在性富营养，溢洪河河口近海和弥河河口近海为磷中等限制潜在性富营养。莱州湾西南海域及其毗邻河流中的氮可能主要来源于工业生产和城市生活污水，而磷可能主要来源于农业生产；莱州湾西部区域污染程度重于南部区域，南部的堤河受污染程度严重。原油开采活动可能是影响附近水体中营养盐含量及形态的重要因素。

20 世纪 80 年代中前期，莱州湾无机氮符合一类海水水质标准；80 年代末至 90 年代初，无机氮开始从轻度污染向中度污染过度；90 年代中后期处于严重污染水平，属劣四类海水水质；无机磷平均含量呈波动降低趋势，从 1982 年的 0.067 mg/L，降低到 2009 年的 0.007 5 mg/L；但本次调查的莱州湾 2012 年无机磷平均含量为 0.03 mg/L，一定程度上说明近年来所采取的各种环保措施，有效遏制了莱州湾磷限制程度的进一步恶化。

参 考 文 献

- Chai C, Yu Z M, Shen Z L, et al, 2009. Nutrient characteristics in the Yangtze River Estuary and the adjacent East China Sea before and after impoundment of the Three Gorges Dam. *Science of the Total Environment*, 407:4687–4695.
- Cloern J E, 2001. Our evolving conceptual model of the coastal eutrophication problem. *Marine Ecology Progress Series*, 210:22–253.
- Gao X L, Chen C T A, 2012. Heavy metal pollution status in surface sediments of the coastal Bohai Bay. *Water Research*, 46 (6):1901–911.
- Gao X L, Li P M, Chen C TA, 2013. Assessment of sediment quality in two important areas of mariculture in the Bohai Sea and the northern Yellow Sea based on acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metal results. *Marine Pollution Bulletin*, 72:281–288.
- Howarth R W, Boyer E, Pabich W, et al, 2002. Nitrogen use in the United States from 1961–2000, and estimates of potential future trends. *Ambio*, 31, 88–96.
- Howarth R W, Marino R, 2006. Nitrogen as limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems:evolving view over three decades. *Limnology and Oceanography*, 51, 364–376.
- Liu S M, Li L W, Zhang G L, et al, 2012. Impact of human activities on nutrient transports in the Huanghe(Yellow River) estuary. *Journal of Hydrology*, 430:103–110.
- Philippart C J M, Cadee G C, van Raaphorst W, et al, 2000. Long-term phytoplankton-nutrient interactions in a shallow coastal sea:Algal community structure, nutrient budgets, and denitrification potential. *Limnology and Oceanography*, 45(1):131–144.
- Seitzinger S P, Harrison J A, Dumont E, et al, 2005. Sources and delivery of carbon, nitrogen, and phosphorus to the coastal zone:an overview of Global Nutrient Export from Watersheds(NEWS) models and their application. *Global Biogeochemical Cycles* 19:1–1.
- Wang Y J, Liu D Y, Dong Z J, et al, 2012. Temporal and spatial distributions of nutrients under the influence of human activities in Sishili Bay, northern Yellow Sea of China. *Marine Pollution Bulletin*, 64:2708–2719.
- Yu Z G, Mi T Z, Yao Q Z, et al, 2001. The nutrients concentration and the changes in decade-scale in the central Bohai Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 20(1):65–75.
- Zhang R J, Zhang G, Zheng Q, et al, 2012. Occurrence and risks of antibiotics in the Laizhou Bay, China:Impacts of river discharge. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 80:208–215.
- Zhao Z, Tang J, Xie Z, et al, 2013. Perfluoroalkyl acids(PFAAs)in riverine and coastal sediments of Laizhou Bay, North China. *Science of the Total Environment*, 447:415–423.
- Zhuang W, Gao X L, 2013. Acid-volatile sulfide and simultaneously extracted metals in surface sediments of the southwestern coastal Laizhou Bay, Bohai Sea:concentrations, spatial distributions and the indication of heavy metal pollution status. *Marine Pollution Bulletin*, 76(1):128–138.
- 边佳胤, 袁林, 王琼, 等, 2013. 洋山深水港海域水质变化趋势分析及富营养化评价. *海洋通报*, 32(1): 107–112.
- 陈立群, 2004. 莱州湾海洋环境评价与污染总量控制方法研究. 硕士学位论文. 青岛: 中国海洋大学.
- 崔毅, 马绍赛, 李云平, 等, 2003. 莱州湾污染及其对渔业资源的影响. *海洋水产研究*, 24(1): 35–41.
- 单志欣, 郑振虎, 1996. 渤海污染对水产资源的影响. *齐鲁渔业*, 13(3): 34–36.
- 高会旺, 吴德星, 白洁, 等, 2003. 2000 年夏季莱州湾生态环境要素的分布特征. *青岛海洋大学学报*, 33(2): 185–191.
- 高学鲁, 宋金明, 2007. 2003 年 5 月长江口内外溶解态总氮、磷、硅的空间分布及日变化. *海洋与湖沼*, 38(5): 420–431.
- 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 等, 1998. 中国近岸海域潜在性富营养化程

- 度的评价.台湾海峡, 17(1): 64-70.
- 国家海洋局, 1982-1998. 中国海洋环境质量公报. 北京: 中国环境科学出版社.
- 郝彦菊, 王宗灵, 朱明远, 等, 2005. 莱州湾营养盐与浮游植物多样性调查与评价研究. 海洋科学进展, 23(2): 197-204.
- 胡宁静, 刘季花, 黄朋, 等, 2012. 渤海莱州湾表层沉积物中金属元素分布及环境质量. 海洋学报, 34(2): 93-100.
- 纪大伟, 杨建强, 高振会, 等, 2007. 莱州湾西部海域枯水期富营养化程度的初步研究. 海洋通报, 23(1): 43-48.
- 李广楼, 陈碧鹃, 崔毅, 等, 2006. 莱州湾浮游植物的生态特征. 中国水产科学, 13(3): 292-299.
- 李显森, 牛明香, 戴芳群, 等, 2008. 渤海渔业生物生殖群体结构及其分布特征. 海洋水产研究, 29(4): 15-21.
- 刘霜, 张继民, 冷宇, 等, 2013. 黄河口附近海域营养盐行为及年际变化分析. 海洋通报, 32(4): 383-387.
- 刘义豪, 杨秀兰, 靳洋, 等, 2011. 莱州湾海域营养盐现状及年际变化规律. 渔业科学进展, 32(4): 2-5.
- 米铁柱, 于志刚, 姚庆祯, 等, 2001. 春季莱州湾南部溶解态营养盐研究. 海洋环境科学, 20: 14-18.
- 穆迪, 李清雪, 陶建华, 等, 2012. 渤海湾西南部典型站位营养盐限制特性的加富培养实验研究. 海洋通报, 31(6): 680-686.
- 宁璇璇, 纪灵, 王刚, 等, 2011. 2009年莱州湾近岸海域浮游植物群落的结构特征. 海洋湖沼通报, 3: 97-104.
- 曲克明, 崔毅, 幸福言, 等, 2002. 莱州湾东部养殖水域氮、磷营养盐的分布与变化. 海洋水产研究, 23(1): 38-46.
- 沈新强, 晁敏, 2005. 对中国3个渔业水域生态环境质量的综合评价. 海洋水产研究, 26(3): 68-72.
- 孙丕喜, 王波, 张朝晖, 等, 2006. 莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系. 海洋科学进展, 24: 47-52.
- 万修全, 吴德星, 鲍献文, 等, 2004. 2000年夏季莱州湾主要观测要素的分布特征. 中国海洋大学学报, 34(2): 7-13.
- 夏斌, 张晓理, 崔毅, 等, 2009. 夏季莱州湾及附近水域理化环境及营养现状评价. 渔业科学进展, 30(3): 103-111.
- 许思思, 宋金明, 袁华茂, 等, 2010. 汞、铅和石油烃复合污染对渤海湾常见渔业资源生物的影响初探. 生态毒理学报, 05(6): 93-100.
- 颜秀利, 翟惟东, 洪华生, 等, 2012. 九龙江口营养盐的分布、通量及其年代际变化. 科学通报, 57(17): 1575-1587.
- 张洪亮, 杨建强, 崔文林, 2006. 莱州湾盐度变化现状及其对海洋环境与生态的影响. 海洋环境科学, 25(S1): 11-14.
- 赵鹏, 江文胜, 毛新燕, 等, 2010. 2000-2005年莱州湾盐度的变化及其主要影响因素. 海洋与湖沼, 41(1): 12-22.

(本文编辑:袁泽轶)