2013 年胶州湾营养盐结构与限制研究

高磊[1,2],姚海燕[1,2],张蒙蒙[1,2],曹婧[1,2],张祎[1,2]

(1. 国家海洋局北海环境监测中心 青岛 266033;2. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室 青岛 266033)

摘要:文章根据 2013 年 3—10 月期间在胶州湾开展的 7 个航次的综合调查结果,研究营养盐的时空变化和限制变化。胶州湾海域无机氮的主要存在形态为铵盐和硝酸盐;近年来营养盐由原先的硅限制逐步转变为磷限制,磷成为胶州湾的主要限制因子。

关键词:营养盐;海水质量;海洋环境;生态保护;环境监测

中图分类号:P76;X55 **文献标志码**:A **文章编号**:1005－9857(2016)10－0068－04

The Nutrient Structure and Limitation in Jiaozhou Bay, 2013

GAO Lei[1,2], YAO Haiyan[1,2], ZHANG Mengmeng[1,2], CAO Jing[1,2], ZHANG Yi[1,2]

(1. North China Sea Environmental Monitoring Center, State Oceanic Administration, Qingdao 266033, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266033, China)

Abstract: Temporal and spatial variation characteristics and structural changes of nutrients were studied in March, May, June, July, August, September and October 2013 in Jiaozhou Bay. It was found that: NH_4-N and NO_3-N were the main forms of inorganic nitrogen. PO_4-P and SiO_3-Si were both absolute and relative limitations, in which the PO_4-P limitation was more serious.

Key words: Nutrient, Seawater quality, Marine environment, Ecological protection, Environmental monitoring

海洋中的营养盐氮(N)、磷(P)、硅(Si)作为构成海洋生命活动的基本要素,是海洋生产力的重要物质基础,对海洋生物的生长繁殖和群落变化有着重要影响,其中任何一种要素都可能成为浮游植物生长的限制性因素[1]。关于胶州湾海域的营养盐限制问题已经有很多学者作过研究[2－5],这些研究主要针对 2008 年之前胶州湾营养盐的变化情况。2008 年奥运会后,青岛市实施“环湾保护、拥湾发展”的战略规划,近年来不断加强胶州湾海洋生态保护,颁布《青岛市胶州湾保护控制线》,制定并出台《关于胶州湾岸线治理保护三年行动计划实施方案(2013—2015)》《2013—2015 年环胶州湾流域污染综合整治方案》和《青岛市胶州湾保护条例》,强化环湾生态建设和保护,改善胶州湾生态环境质

收稿日期:2016-03-30;**修订日期**:2016-08-15

基金项目:2015 年度北海分局海洋科技项目(2015B03);山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室 2015 年度开放基金项目(201501).

作者简介:高磊,工程师,研究方向为海洋环境监测与评价,电子信箱:gaolei@bhfj.gov.cn

通信作者:姚海燕,高级工程师,硕士,研究方向为海洋环境监测与评价,电子信箱:yaohaiyan@bhfj.gov.cn

量。本文根据 2013 年 7 个航次的胶州湾海水营养盐调查结果，对胶州湾营养盐的结构和限制进行新的探讨，为胶州湾生态环境保护工作提供科学依据。

1　调查与方法

分别于 2013 年 3 月、5 月、6 月、7 月、8 月、9 月、10 月在胶州湾开展 10 个站位的综合调查（图 1）。分析项目主要有温度（T）、盐度（S）、活性磷酸盐（PO_4-P）、铵盐（NH_4-N）、硝酸盐（NO_3-N）、硅酸盐（SiO_3-Si）亚硝酸盐（NO_2-N）、溶解氧（DO）、化学需氧量（COD）和叶绿素 a 等，其中无机氮（DIN）含量由 NH_4-N、NO_3-N 和 NO_2-N 等 3 种组成。水温和盐度在现场测定，其他项目采样后立即运送到实验室进行分析，样品采集和分析均按《海洋监测规范》（GB17378—2007）中的相关要求进行。

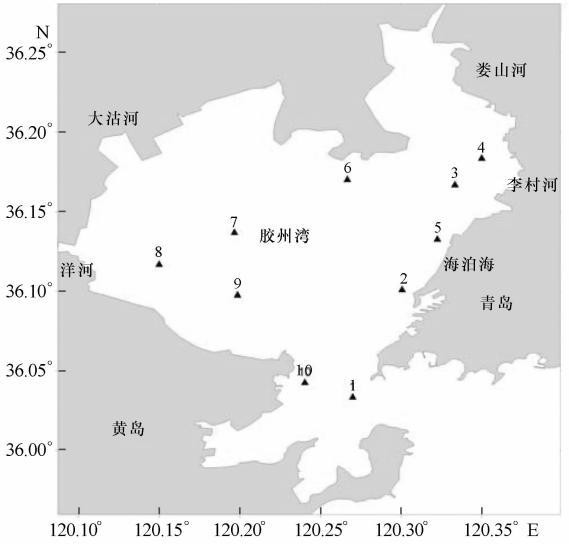

图 1　调查海域和站位

2　结果与讨论

2.1　营养盐的空间变化特征

通过对整个胶州湾的营养盐进行数据分析得出（数据未列出），胶州湾营养盐呈现从湾底向湾口下降的空间变化。为反映胶州湾海域营养盐的空间变化特征，选用变异系数 C_V 来表示其空间分布情况，计算公式[6]为：

$$C_V = S^2/\overline{X}$$

式中：S^2 表示 N、P 和 Si 质量浓度空间序列的标准偏差；$\overline{X}$ 表示各类营养盐质量浓度空间序列的平均值。通过空间特征分析，N、P 和 Si 的浓度在站位间存在明显差异（图 2）。其中，PO_4-P 空间变异最大，说明胶州湾内 PO_4-P 浓度受站位分布的影响最大；DIN 空间变异最小，说明 DIN 浓度各站位间比较均匀。营养盐空间变异系数在月际存在显著差异，7 月为青岛雨季，沿海径流输入可能对营养盐的空间变化造成较大影响。

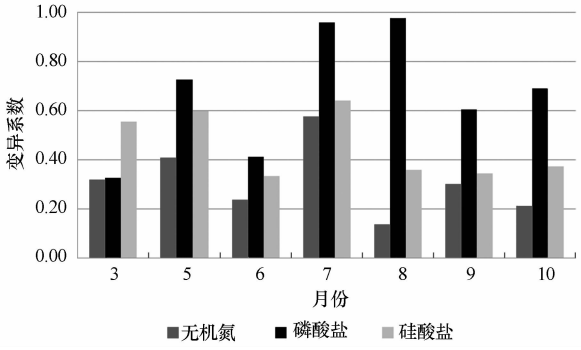

图 2　营养盐空间变异系数

2.2　营养盐的时间变化特征

海水中的氮、磷主要受海域周边工业污水和生活污水的排放、农业施肥的径流携带、海水养殖自身产生的营养物质以及浮游植物的生长消耗等方面的影响[7]。硅主要受河流径流输入、浮游植物消耗和沉积物释放等方面的影响[8]。

胶州湾海域营养盐具有明显的季节变化特征（图 3）。调查期间 DIN 季节变化较小，整体保持较高的浓度，其中 7 月含量较低，表明 DIN 除受沿岸径流影响外，还与浮游植物数量有很大关联，6 月、7 月随着水温升高、光照加强，浮游植物再次开始增长[9]，消耗部分无机氮等营养盐，因此夏季 DIN 含量出现降低的现象。

PO_4-P 和 SiO_3-Si 的变化基本一致，出现明显的双峰变化序列，5 月、9 月含量较高，3 月、10 月含量较低。5 月随着雨季的到来，沿岸径流携带的营养盐使其浓度升高，而随着夏季浮游植物的大量繁殖又消耗掉部分营养盐；9 月在养殖和降水输入营养盐的同时，浮游植物的光合作用减弱，降低浮游生物对营养盐的吸收，加上浮游植物死亡的再释放使得湾内营养盐浓度再次呈现高值。此外，变化较为剧烈说明受外源影响较大。

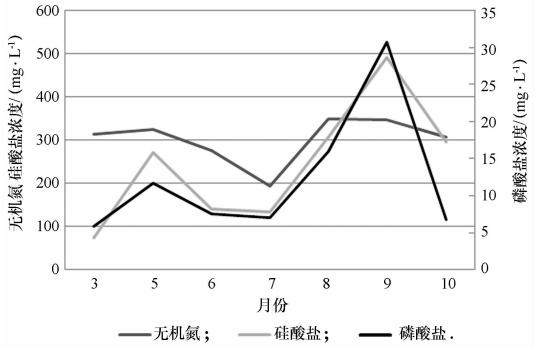

图 3 胶州湾营养盐月平均变化

2.3 无机氮的结构特征

海水中 DIN 包括 NH_4-N、NO_2-N 和 NO_3-N 等 3 种形态，在海洋生物饵料循环中起着非常重要的作用，其中 NH_4-N 被吸收后直接进入浮游植物细胞内的 N 代谢系统，NO_3-N 则在细胞内先经过硝酸还原酶还原为 NH_4-N 再被利用，当海水中高含量的 NH_4-N 和 NO_3-N 共同存在时，浮游植物对 NO_3-N 的摄取受 NH_4-N 控制[10]。调查期间，NH_4-N 和 NO_3-N 是胶州湾海域 DIN 的主要存在形态。在氧充足情况下，当达到热力学平衡时水体中的 DIN 应以 NO_3-N 为主要存在形态[11]，当未达到热力学平衡时以 NH_4-N 为主要存在形态，而 NO_2-N 属于热力学不稳定状态，含量通常较低；NH_4-N 可通过硝化反应转化为 NO_3-N，而且这种硝化反应随温度的增加而加强[12]，同时又与水体含氧量有一定关系。

2.4 营养盐绝对限制

根据 Justic 等[13]的相关研究，浮游植物生长所需溶解无机氮、硅酸盐和磷酸盐的最低阈值分别为 1.0 μmol/L、2.0 μmol/L、0.1 μmol/L。根据 2013 年 7 个月的监测结果分析，胶州湾海域 2013 年 3 月和 7 月部分站位存在 Si 的绝对限制，5 月、7 月、8 月和 10 月部分站位存在 P 的绝对限制。分析监测数据得出，1、2 和 10 号站位出现绝对限制的概率较高，间接表明湾内海水交换能力较弱，较高浓度的营养盐不易输运到湾口，海水交换是影响胶州湾海域营养盐分布的重要因素。

2.5 营养盐相对限制

海水中 Si、N、P 适宜的比例有利于浮游植物的生长和繁殖，反之某种营养盐的缺乏将限制其生长和繁殖[14]。Justic 等[13]考虑各种藻类对营养盐的吸收，提出相应限制标准：若 Si∶P＞22 和 N∶P＞22，则 PO_4-P 为限制因素；若 N∶P＜10 和 Si∶N＞1，则 DIN 为限制因素；若 Si∶P＜10 和 Si∶N＜I，则 SiO_3-Si 为限制因素。

根据 2013 年 7 个月的监测结果，胶州湾内海域 N∶P 基本高于 22，各月均值变化范围为 34.4～162.3，其中 10 月最高、9 月最低；除部分站位外，监测区域 Si∶P 基本高于 22，各月均值变化范围为 15.7～64.0，其中 10 月最高、3 月最低；除部分站位外，监测区域 Si∶N 基本小于 1，各月均值变化范围为 0.11～0.72，其中 9 月最高、3 月最低(图 4)。

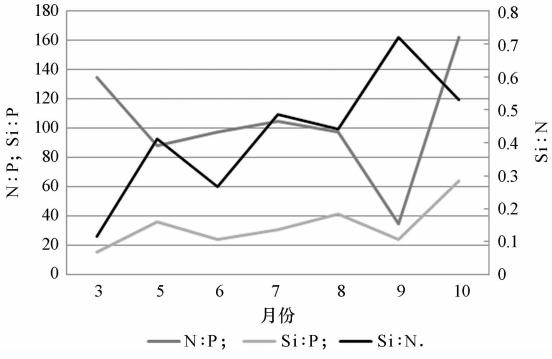

图 4 胶州湾营养盐比值月变化

分析结果显示(表 1)，胶州湾调查区域不存在 DIN 限制，存在 P 与 Si 的绝对限制和相对限制，其中 P 限制更加显著。3 月、7 月和 8 月部分站位存在 Si 限制，说明在枯水期和浮游生物大量生长期间，SiO_3－Si 得不到有效补充或被浮游植物大量消耗，这与历史研究结果相一致[2－4]。

调查期间所有月份均存在 P 限制，表明 P 为胶州湾的主要限制因子，其次为 Si。

胶州湾营养盐的结构特征与我国很多近海区域是相似的。近年来我国沿海多处海域出现海水氮磷比升高、磷限制等现象，如辽东湾、渤海湾等[1,15]。本次调查结果显示，P 为胶州湾的主要限制因子，胶州湾水域 P 限制的可能性增大。P 限制的出现，可能是由于农业生产方式的转变。根据青岛统计年鉴(表 2)，近 10 年来无论是化肥施用总量还是磷肥施用量都在降低，使农业污水排放量降低。此外，不含磷洗涤剂的广泛使用，使得磷污染入海量相应有所减小。

而胶州湾 Si 限制作用的减少可能与近年青岛城市建设加快、混凝土用量增加有关[16]。

表 1　胶州湾各站位营养盐限制因子出现概率

限制因子	营养盐限制因子	限制因子出现概率/%，$n=10$						
		3 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
N 为限制因子	N∶P＜10，Si∶N＞1							
	cDIN＜1 μmol/L，N∶P＜10，Si∶N＞1							
P 为限制因子	Si∶P＞22，N∶P＞22	20	70	60	60	70	30	100
	cP＜0.1 μmol/L，Si∶P＞22，N∶P＞22		30		30	10		20
Si 为限制因子	Si∶P＜10，Si∶N＜1	40			20	10		
	cSi＜2 μmol/L，Si∶P＜10，Si∶N＜1	40			10			

表 2　青岛地区化肥施用量　　万 t

年份	磷肥	化肥总量
2004	2.368 5	32.45
2005	2.183 5	33.01
2006	2.065 4	32.64
2007	2.030 9	33.89
2008	1.858 3	31.05
2009	1.586 1	30.17
2010	1.460 2	29.89
2011	1.457 9	29.37
2012	1.401 1	29.09
2013	1.394 5	29.12
2014	1.349 5	28.94

参考文献

[1] 吴金浩，徐雪梅，杨爽，等. 2007 年春、秋辽东湾北部营养盐及影响因素[J]. 海洋科学进展，2012，30(4)：477－486.

[2] 姚云，沈志良. 胶州湾东北部营养盐的季节和多年变化[J]. 水科学进展，2007，18(3)：379－385.

[3] 杨东方，高振会，孙培艳，等. 胶州湾水温和营养盐硅限制初级生产力的时空变化[J]. 海洋科学进展，2006，24(2)：203－212.

[4] LIU S M，ZHANG J，CHEN H T，et al. Factors influencing nutrient dynamics in the eutrophic Jiaozhou Bay，North China [J]. Progress in Oceanography，2005，66(1)：66－85.

[5] 张哲，王江涛. 胶州湾营养盐研究概述[J]. 海洋科学，2009，33(11)：90－94.

[6] 崔党群. 生物统计学[M]. 北京：中国科学技术出版社，1994：34－35.

[7] 赖俊翔，陈宪云，柯珂，等. 广西防城港市近岸海域营养盐分布及富营养化研究[J]. 海洋技术，2013，32(3)：63－69，91.

[8] 孙丕喜，张朝晖，郝林华，等. 桑沟湾海水营养盐的分布与潜在富营养化研究[J]. 海洋科学进展，2007，25(4)：436－445.

[9] 李超伦，张芳，申欣，等. 胶州湾叶绿素的浓度、分布特征及其周年变化[J]. 海洋与湖沼，2005，36(6)：499－506.

[10] 郑小宏. 闽江口海域氮磷营养盐含量的变化及富营养化特征[J]. 台湾海峡，2010，29(1)：42－46.

[11] 王键，陈岚. 泉州安海湾营养盐特征及富营养化程度[J]. 海洋环境科学，2011，30(4)：525－532.

[12] 石晓勇，王修林，韩秀荣，等. 长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究[J]. 应用生态学报，2003，14(7)：1086－1092.

[13] JUSTIC D，RABALAIS N N，TURNER R E. Stoichimetry nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. Marine Pollution Bulletin，1995，30：41－46.

[14] 周淑青，沈志良，李峥，等. 长江口最大浑浊带及邻近水域营养盐的分布特征[J]. 海洋科学，2007，31(6)：34－42.

[15] 尹翠玲，张秋丰，阚文静，等. 天津近岸海域营养盐变化特征及富营养化概况分析[J]. 天津科技大学学报，2015，30(1)：56－61.

[16] 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.