



春季渤海湾营养盐分布及潜在性富营养化评价

李桂菊¹, 马玉兰¹, 李伟¹, 汪嘉宁², 魏皓¹

(1. 天津科技大学海洋科学与工程学院, 天津 300457; 2. 中国海洋大学海洋环境学院, 青岛 266100)

摘要: 根据2011年5月对渤海湾海域20个站位海水营养盐的调查结果, 分析该海区海水营养盐的分布特征, 并进行了潜在性富营养化评价。研究发现, 调查海域 NO_3^- -N 质量浓度为 150.5~276.3 $\mu\text{g/L}$, NO_2^- -N 质量浓度为 4.072~29.490 $\mu\text{g/L}$, NH_4^+ -N、 PO_4^{3-} -P 和 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度分别为 47.55~194.80 $\mu\text{g/L}$ 、4.73~26.35 $\mu\text{g/L}$ 和 170.2~544.1 $\mu\text{g/L}$ 。整体上, 各类无机氮呈现出表底层差异不大、沿岸浓度高、外海浓度低的特点; 断面分布呈现出由东向西逐渐升高的趋势, SiO_3^{2-} -Si 相反, NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 SiO_3^{2-} -Si 质量浓度呈现出由北向南逐渐升高的趋势, 而 NO_2^- -N、 PO_4^{3-} -P 质量浓度出现北高南低的情形。渤海湾连续站显示出一定的营养盐浓度随潮汐的韵律变化, 其中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 质量浓度变化相对较明显, 低潮较高潮期间营养盐浓度高。营养盐与盐度的相关性不很显著。 NO_3^- -N 是溶解无机氮(DIN)的主要组成形式, 占平均 DIN 含量的 69.56%; 该海区主要以磷限制为主, 并已经逐渐从 P 限制向 P、Si 共同限制方向发展, 这与潜在性富营养化评价结果一致。

关键词: 渤海湾; 营养盐; 分布特征; 潜在性富营养化评价

中图分类号: X834

文献标志码: A

文章编号: 1672-6510(2012)05-0022-06

Distribution of Inorganic Nutrients and Potential Eutrophication Assessment in Bohai Bay in Spring

LI Guiju¹, MA Yulan¹, LI Wei¹, WANG Jianing², WEI Hao¹

(1. College of Marine Science and Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

2. College of Marine Environment, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Based on the nutrient data of 20 stations from Bohai Bay in May 2011, the distribution of major inorganic nutrients in Bohai Bay and seawater potential eutrophication were analyzed. The results show that NO_3^- -N concentration in the investigated sea area ranged from 150.5 to 276.3 $\mu\text{g/L}$, NO_2^- -N concentration ranged from 4.072 to 29.49 $\mu\text{g/L}$, and the concentrations of NH_4^+ -N, PO_4^{3-} -P as well as SiO_3^{2-} -Si ranged from 47.55 to 194.8 $\mu\text{g/L}$, 4.73 to 26.35 $\mu\text{g/L}$ and 170.2 to 544.1 $\mu\text{g/L}$, respectively. In general, nutrient concentrations decreased from near-shore to offshore but exhibited little variations between the surface and bottom within the water column. The concentration of all DIN species gradually increased from the east to the west while the concentration of SiO_3^{2-} -Si displayed an inverse trend. The concentrations of NO_3^- -N, NH_4^+ -N and SiO_3^{2-} -Si progressively went up from the north to the south, opposing the patterns of NO_2^- -N and PO_4^{3-} -P. Time-series of data indicated that the nutrient concentration, particularly that of DIN, synchronized the diurnal tidal fluctuations in the studied area, being lower at high tides and higher at low tides. Nutrient concentrations were not significantly correlated to salinity. NO_3^- -N was the dominant DIN species, accounting for on average 69.56% of the total DIN. The Bohai ecosystem seemed to be evolving from P-limitation to combined P- and Si-limitation, which is in line with our assessment of the potential eutrophication in this area.

Key words: Bohai Bay; nutrients; distribution features; potential eutrophication assessment

渤海是我国北方典型的半封闭浅海, 平均水深 18 m, 面积约 77 000 km^2 。其中渤海湾位于渤海西

收稿日期: 2012-01-09; 修回日期: 2012-02-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2010BAC68B04)

作者简介: 李桂菊(1969—), 女, 黑龙江人, 教授, 博士, liguij@tust.edu.cn.

部,北起河北省乐亭县大清河口,南到山东省利津县新黄河口,沿岸有海河、大沽排污河、独流减河、北排河等数条河流入海,为陆地环抱的浅海盆^[1]. 随着沿岸工农业、养殖业、港口的迅速发展及人口的不断增长,使渤海湾海域的营养盐结构发生了巨大变化,生态环境不断恶化,赤潮灾害频繁发生,渔业资源严重衰退,已经引起了各界的广泛关注,有学者甚至发出了渤海面临“荒漠化”的警告^[2].

海水中的营养盐是海洋浮游植物生长和繁殖所必需的,它们在控制海洋植物的生长和海洋初级生产力等方面起着相当重要的作用^[3]. N、P 和 Si 是构成海洋生态系统的基本要素之一,在不同时期不同海域分别作为浮游植物生长的营养盐限制因子,也是反映赤潮的主要特征参数^[4-5]. 因此,调查研究渤海湾海域营养盐含量及分布状况,分析营养要素间的相互关系和变化趋势,为渤海湾生态环境的保护和修复提供科学依据. 近年来,营养盐在含量及结构上都发生了巨大变化. 本文主要是对 2011 年春季营养盐变化情况进行调查,调查范围覆盖渤海湾整体水域(117° 50' E ~ 119° 0' E, 38° 15' N ~ 39° 5' N),这对了解渤海湾营养盐整体变化具有很好的参考价值.

1 调查分析和评价方法

1.1 采样时间和区域

2011 年 5 月在渤海湾海域进行调查,调查范围及站点分布如图 1 所示.

共设 32 个大面站,针对海水营养盐调查了 19 个大面站,1 个 A3 连续站(24 h 连续采样),在调查区域东西向和南北向各设置了一个表层海水监测断面,东西断面主要包括 F1、F2、F3、C1、B2、A4 站位,南北断面主要包括 D3、D5、D6、F2 站位. 调查区以北塘口、海河口两个主要污染物入海口为中心,沿等深

线向外辐射,各站距离大约 7~10 海里.

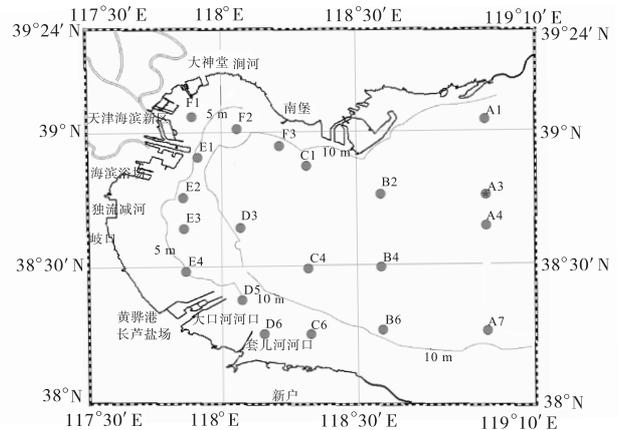


图 1 采样站点分布

Fig. 1 Distribution of investigation stations

1.2 分析项目和方法

水质监测的具体采样、保存及分析方法均参照 GB 17378—2007《海洋监测规范》进行. 每个站点分表、底两层取水,每层取 1 500 mL,现场过 0.45 μm 的醋酸纤维滤膜(450 °C 灼烧 4 h),-20 °C 冷冻保存,带回实验室分析. 水样测定分析项目包括:亚硝酸盐(NO₂⁻-N)、硝酸盐(NO₃⁻-N)、氨氮(NH₄⁺-N)、活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)、活性硅酸盐(SiO₃²⁻-Si)和盐度等. 其中 NO₂⁻-N、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N 三者之和为溶解无机氮(DIN).

1.3 潜在性富营养化评价方法

选用郭卫东等^[6]以潜在性富营养化的概念为基础,参照我国海水水质标准以及有关实验结果,提出的分类分级潜在性富营养化评价模式,为了突出营养盐的限制特征,选取对浮游植物生长起瓶颈制约作用的溶解无机氮、活性磷酸盐(PO₄³⁻-P)作为评价参数. 分类分级潜在性富营养化评价模式的营养级划分原则见表 1.

表 1 潜在性富营养化评价模式营养级的划分原则

Tab. 1 Principles for classification of nutrient levels with the potential eutrophication assessment model

级别	营养级	$c(\text{DIN})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	$c(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	$n(\text{N}):n(\text{P})$
I	贫营养	<14.28	<0.97	8~30
II	中度营养	14.28~21.41	0.97~1.45	8~30
III	富营养	>21.41	>1.45	8~30
IV _P	磷限制中度营养	14.28~21.41	—	>30
V _P	磷中等限制潜在性富营养	>21.41	—	30~60
VI _P	磷限制潜在性富营养	>21.41	—	>60
IV _N	氮限制中度营养	—	0.97~1.45	<8
V _N	氮中等限制潜在性富营养	—	>1.45	4~8
VI _N	氮限制潜在性富营养	—	>1.45	<4

2 结果与讨论

2.1 营养盐平面分布特征

溶解无机态营养盐质量浓度($\mu\text{g/L}$)平面分布如图2所示,相关数据见表2.渤海湾海水中硝酸盐表层的质量浓度略高于底层,较高值均出现在E1和F1站位及南部海域.表层质量浓度分布由湾口西北部的低浓度区向湾内一直延伸到南部沿岸海域并沿周边

递减,湾中部和东北部海区硝酸盐浓度较低;底层质量浓度整体上表现出与表层类似的分布,但中部海域低于表层.南岸等值线走向基本与海岸线平行,湾口处等值线密集,形成很大的梯度.由于E1和F1站位位于海河、北塘排污河和永定新河等河流交汇入海处,入海河流携带大量污染物,使其严重受到陆源冲淡水作用的影响.调查期间,温度较低,生物活动能力较弱,生物消耗较弱,使水域表层硝酸盐含量较高^[7].

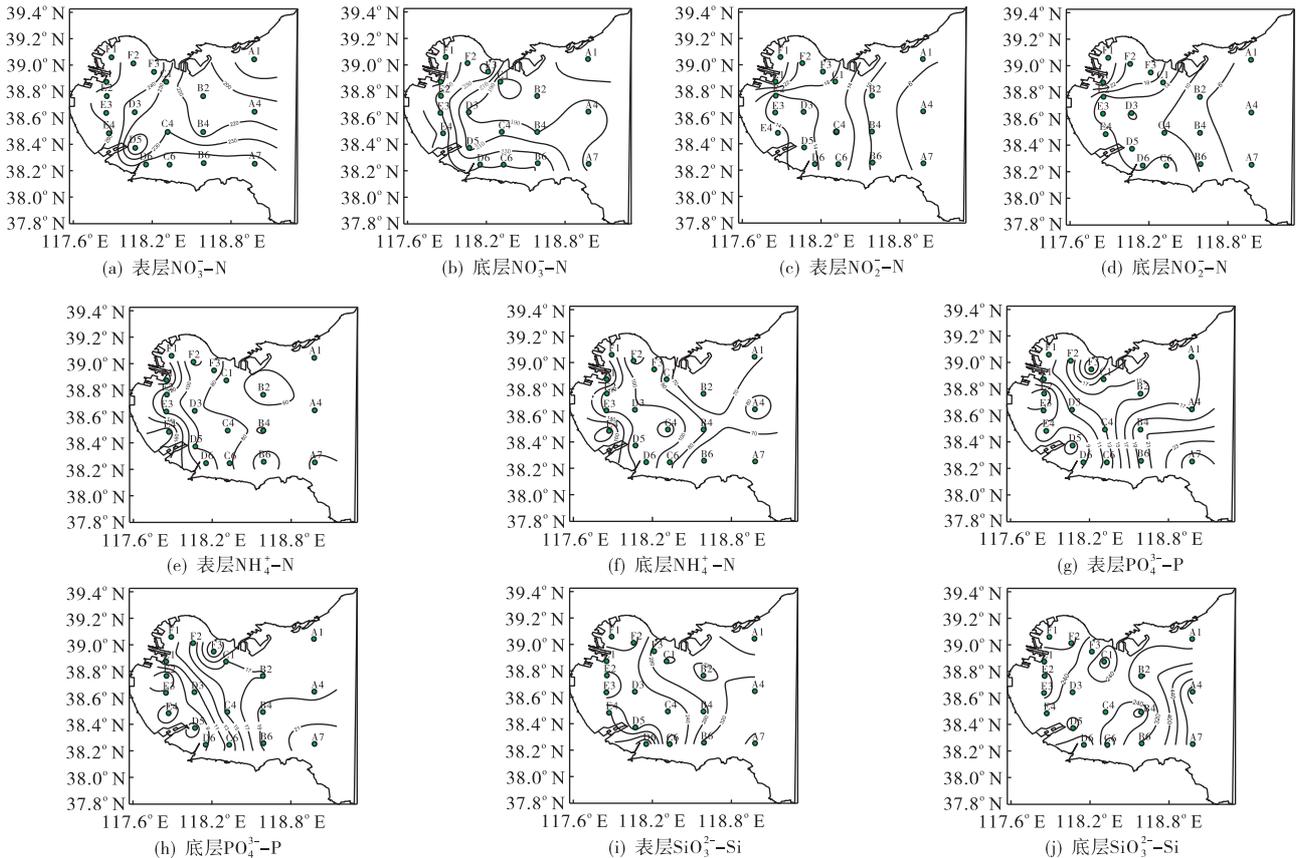


图2 溶解无机态营养盐的平面分布

Fig. 2 Horizontal distributions of dissolved inorganic nutrients

表2 表底层海水中营养盐调查结果($n=19$)

Tab. 2 Investigation results of nutrients in surface and bottom waters ($n=19$)

项目	分层	质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)	平均质量浓度/ ($\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)
$\text{NO}_3^- - \text{N}$	表层	160.2 ~ 276.3	236.8
	底层	150.5 ~ 276.1	221.8
$\text{NO}_2^- - \text{N}$	表层	4.077 ~ 29.490	14.27
	底层	4.072 ~ 29.450	12.30
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$	表层	47.55 ~ 194.30	96.16
	底层	47.62 ~ 194.80	99.18
$\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$	表层	4.73 ~ 26.35	14.05
	底层	4.68 ~ 27.93	14.14
$\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$	表层	170.2 ~ 414.7	261.7
	底层	172.1 ~ 544.1	278.4

亚硝酸盐表、底层质量浓度基本相当,垂向上较均匀.高值区出现的区域与硝酸盐一致,但整体质量浓度明显比硝酸盐质量浓度低.这是由于亚硝酸盐本身是不稳定的,容易进一步氧化为高价态的硝酸盐.表层质量浓度分布与底层较一致,呈现出西北部近岸海域质量浓度较高,并呈舌状向南部延伸,同时向中部海域逐渐递减的趋势.表明近岸海域,亚硝酸盐主要来源于陆源径流输入和氨化作用,中东部地区除主要受到由潮汐、海流等导致的外海水稀释作用的影响以外,还与调查期间海水的物理化学性质有关.

渤海湾氨氮表、底层质量浓度差别不大.高值区均出现在湾口周边的近岸海域.氨氮在质量浓度分

布上, 没有明显的规律, 表、底层氨氮质量浓度呈现出多个采样点高低值交叉分布的情形, 且多呈块状分布. 这表明氨氮质量浓度与陆源径流输入状况有关.

磷酸盐质量浓度表、底层没有明显差异, 垂向分布较均匀, 个别站位出现高低起伏的情形. 生物活动对磷酸盐的吸收和释放作用可能是造成磷酸盐分布规律性较差的原因之一^[8]. 高值区出现在 F3 站位和 A7 站位的邻近海域, 西南近岸海域则相对较低. 表明西南近岸海域受陆地径流冲淡水作用的影响不大.

硅酸盐质量浓度底层高于表层, 这不仅与生物体下沉溶解有关, 而且与底层硅酸盐矿物质的直接溶解有关. 高值区主要集中在 D6 和 A7 站位的附近海域. 表层分布呈现出由东南近岸海域, 呈舌状向西南沿海延伸的趋势, 中南部海区质量浓度较低且呈现一定的块状分布的特点, 底层分布大体上与表层类似. 由于 D6 站位靠近套儿河河口, 受河口冲淡水作用的影响, A7 站位与陆源污染物的输入及底层沉积物的释放作用有关, 中部低值区的形成可能是由于进湾后流经中部, 被大量养殖的海带和硅藻类浮游植物吸收所造成^[9].

2.2 营养盐断面分布

东西断面和南北断面的营养盐变化情况分别如图 3、图 4 所示.

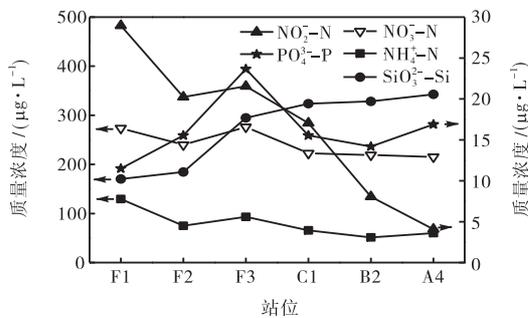


图 3 东西断面营养盐变化

Fig. 3 Variation of nutrients along the east-west transect

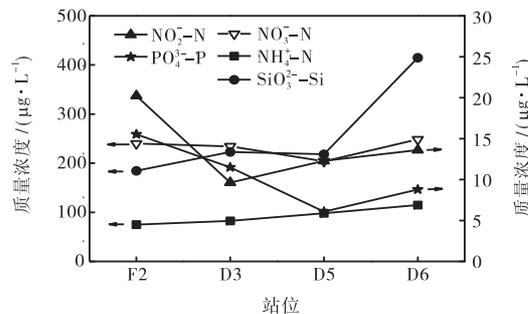


图 4 南北断面营养盐变化

Fig. 4 Variation of nutrients along the south-north transect

表层海水中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 质量浓度由西向东呈现出明显的降低趋势, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 除 F3 站位外, 表现出类似的趋势; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 整体变化不大, 但 F3 站位 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度与其他站位相比较高; $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 则相反, 显示出由西向东逐渐增加的趋势. 由于 F3 站位靠近南堡和京唐港, 受沿岸工农业活动的影响较大. 表层海水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 质量浓度呈现出由北向南逐渐升高的趋势, 在 D6 站位质量浓度均较高; 相反, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 质量浓度出现北高南低的情形. 整体来看, 南北断面近岸处通常表现出较高的营养盐质量浓度.

2.3 A3 连续站营养盐周日变化

A3 站位位于渤海湾中东部, 于 2011-05-06 至 2011-05-07 在该站位作 24 h 连续采样监测, 分析营养盐的周日质量浓度变化, 结果如图 5 所示.

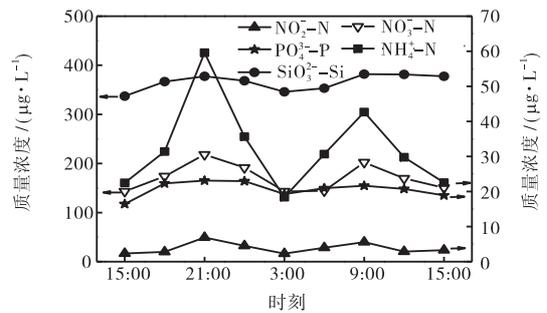


图 5 A3 连续站营养盐周日变化

Fig. 5 Diel distributions of nutrients at A3 continuous stand

由图 5 可知, 在渤海湾连续站显示出一定的营养盐质量浓度随潮汐的韵律变化. $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 周日变化不大, 在一定的范围内上下波动, 3:00 时三者质量浓度较其他时刻略低. 而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化相对较明显, 基本上呈现出一天内两起两落的趋势, 受潮汐影响相对较大. 高潮时外海水的入侵, 对水体中的营养盐有一定稀释作用^[10], 使得水体中营养盐质量浓度在 3:00 左右高潮时出现最低值, 在低潮时 (22:00 和 10:30 左右) 相对较高, 即低潮较高潮期间营养盐质量浓度高.

2.4 营养盐与盐度的相关性

渤海湾海域水系复杂, 观测要素除了相互影响、相互制约外, 还与海水动力、冲淡水、海水理化条件及浮游生物有着较密切关系. 该海域具有水浅、透明度低 (黄河入海水影响)、受河水影响较大、盐度低 (半封闭海域及蒸发量少)、季节水温变化大等特点^[11]. 由下列各要素之间的相关分析 (表 3) 可知:

NO_3^- -N、 NO_2^- -N 和 NH_4^+ -N 质量浓度与海水盐度呈现一定的负相关关系, PO_4^{3-} -P 和 SiO_3^{2-} -Si 呈现正相关关系, 但是整体上, 相关性并不是很明显, 这跟调查期间复杂的海陆交互作用有关. 这与黄河口海域及乳山湾海域有关营养盐与盐度相关性的研究结果相一致^[12-13].

表 3 表层海水营养盐与盐度的关系

Tab. 3 Correlation analysis of nutrients and salinity in surface seawater

相关关系	自由度	相关系数
NO_3^- -N 与盐度	19	-0.218 3
NO_2^- -N 与盐度	19	-0.398 1
NH_4^+ -N 与盐度	19	-0.202 7
PO_4^{3-} -P 与盐度	19	0.311 9
SiO_3^{2-} -Si 与盐度	19	0.143 4

2.5 营养盐结构特征及潜在性富营养化评价

溶解无机氮的结构组成如图 6 所示. 由图 6 可知, NO_3^- -N 是无机氮的主要存在形式, 占 69.56%, 其次是 NH_4^+ -N 占 DIN 的 26.55%, 而 NO_2^- -N 所占比例

最低, 只有 3.89%. 这与之前石海明等^[14]对渤海湾赤潮监控区的相关研究是一致的.

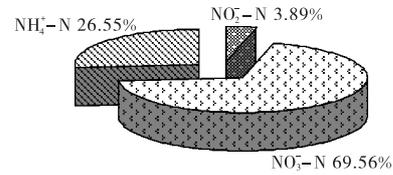


图 6 溶解无机氮的结构组成

Fig. 6 Species composition of dissolved inorganic nitrogen

DIN、 PO_4^{3-} -P、 SiO_3^{2-} -Si 之间的物质的量比, 是调查区营养盐结构的重要指标. 因此在总结前人工作的基础上, Justic 等^[15]提出了一种系统评估各种营养盐化学计量限制标准: 当 $n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) > 22$ 、 $n(\text{DIN}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) > 22$ 时为 PO_4^{3-} -P 限制; 当 $n(\text{DIN}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) < 10$ 、 $n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{DIN}) > 1$ 时为 DIN 限制; 当 $n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P}) < 10$ 、 $n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{DIN}) < 1$ 时为 SiO_3^{2-} -Si 限制. 表 4 给出了监控区各站位不同营养盐的物质的量比.

表 4 各站位表层海水中 N、P 和 Si 的物质的量比及评价结果

Tab. 4 Assessment results and mole ratio of N, P and Si in surface seawater at different stations

站位	$n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$	$n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{DIN})$	$n(\text{DIN}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$	营养级
A1	16.18	0.510 2	31.72	IV _P
A4	22.47	0.613 6	36.62	IV _P
A7	15.38	0.548 7	28.04	V _P
B2	25.62	0.589 3	43.48	IV _P
B4	14.06	0.434 4	32.37	V _P
B6	18.56	0.536 0	34.62	V _P
C1	23.05	0.530 2	43.48	V _P
C4	17.98	0.306 0	58.74	V _P
C6	16.86	0.251 2	67.12	VI _P
D3	21.48	0.339 9	63.19	VI _P
D5	39.71	0.346 8	114.50	VI _P
D6	52.27	0.550 3	94.99	VI _P
E1	20.88	0.251 1	83.12	VI _P
E2	43.21	0.256 4	168.54	VI _P
E3	25.35	0.224 6	112.88	VI _P
E4	31.14	0.299 1	104.10	VI _P
F1	16.40	0.196 9	83.30	VI _P
F2	13.15	0.275 4	47.75	V _P
F3	13.80	0.267 5	51.58	V _P

结果显示: $n(\text{DIN}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 均大于 22, 其中 E2 站位最大为 168.54, 表明调查区 DIN 含量较高, 磷相对缺乏; $n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{PO}_4^{3-}\text{-P})$ 除 A4、B2、C1、D5、D6、E2、E3 和 E4 外均小于并接近 22; $n(\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}) : n(\text{DIN})$ 均小于 1, SiO_3^{2-} -Si 相对不足. 根据营养盐化学计量限制标准, 分析结果表明: A4、B2、C1、D5、D6、E2、E3 和 E4 明显受磷限制, 其

他站位正从硅供给相对充足向着硅相对不足的方向发展. 渤海湾近岸海域营养盐结构已逐渐从 P 限制为主向 P、Si 共同限制方向发展. 若此趋势继续发展, 会导致 P、Si 供给的相对不足, 相应的会使生态系统对 P、Si 的质量浓度变化十分敏感. 这与阚文静等^[16]对近年来渤海湾营养盐变化的相关研究结果相一致.

由于海水中营养盐的限制,必然有一部分氮(对磷限制水体而言)或磷(对氮限制水体而言)相对过剩.而根据现行富营养化评价标准或评价模式,这部分过剩的氮或磷可使海区的营养化水平提高,甚至出现通常意义上的富营养化,但实质上却并不能全被浮游植物所利用.这部分过剩的营养盐不应被视为对实质上的富营养化作了贡献,而应看作只具有一种潜在性.即只有在水体得到适量的磷(对磷限制水体而言)或氮(对氮限制水体而言)的补充,使N、P值接近Redfield值,这部分氮或磷对富营养化的贡献才能真正体现出来.这种现象可称为潜在性富营养化^[6].评价结果(表4)表明渤海湾表层海水基本都处于磷限制状态,其中近岸海域为磷限制潜在性富营养,中部海域处于磷中等限制潜在性富营养,东部较开阔海域处于磷限制中度营养状态.

3 结 论

(1)渤海湾近岸海域营养盐平面分布差异不大,呈现垂向比较均匀,近海岸质量浓度高,外海质量浓度低的特点.其中 NO_2^- -N、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N质量浓度表层略高于底层, PO_4^{3-} -N没有明显的规律,个别站位表、底层出现高低起伏的情形, SiO_3^{2-} -Si底层质量浓度明显高于表层.整体上,海水营养盐呈现出由近岸海域向开阔海洋逐渐降低的趋势.

(2) NO_2^- -N、 NO_3^- -N和 NH_4^+ -N断面分布呈现出由西向东逐渐降低的趋势, SiO_3^{2-} -Si断面分布则相反; NO_3^- -N、 NH_4^+ -N、 SiO_3^{2-} -Si质量浓度呈现出由北向南逐渐升高的趋势,而 NO_2^- -N、 PO_4^{3-} -P质量浓度出现北高南低的情形.

(3)连续站呈现出营养盐质量浓度随潮汐的韵律变化,其中 NO_3^- -N、 NO_2^- -N和 NH_4^+ -N质量浓度变化相对较明显,基本上呈现出一天内两起两落趋势,低潮较高潮期间营养盐质量浓度高.

(4)渤海湾近岸海域 NO_3^- -N、 NO_2^- -N和 NH_4^+ -N质量浓度与海水盐度呈现一定的负相关关系, PO_4^{3-} -N和 SiO_3^{2-} -Si呈现正相关关系,但不十分明显.

(5)该海区营养盐结构主要以磷限制为主,并已经逐渐从P限制向P、Si共同限制方向发展;表层海水处于磷限制状态,其中近岸海域为磷限制潜在性富营养,中部海域处于磷中等限制潜在性富营养,东部较开阔海域处于磷限制中度营养状态.

参考文献:

- [1] 阚文静,张秋丰,胡延忠,等.渤海湾水体富营养化与有机污染状况初步评价[J].海洋通报,2010,29(2):172-175.
- [2] 于志刚,米铁柱,谢宝东,等.二十年来渤海生态环境参数的演化和相互关系[J].海洋环境科学,2000,19(1):15-19.
- [3] 蒋红,崔毅,陈碧鹃,等.渤海近20年来营养盐变化趋势研究[J].海洋水产研究,2005,26(6):61-67.
- [4] 张洁帆,陶建华,李清雪,等.渤海湾氮磷营养盐年际变化规律研究[J].安徽农业科学,2007,35(7):2063-2064.
- [5] 崔毅,宋云利.渤海海域营养现状研究[J].海洋水产研究,1996,17(1):57-62.
- [6] 郭卫东,章小明,杨逸萍,等.中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J].台湾海峡,1998,17(1):64-70.
- [7] 高生泉,林以安,金明明,等.春、秋季东、黄海营养盐的分布变化特征及营养结构[J].东海海洋,2004,22(4):38-50.
- [8] 董兆选,娄安刚,崔文连.胶州湾海水营养盐的分布及潜在性富营养化研究[J].海洋湖沼通报,2010,13(3):149-156.
- [9] 孙丕喜,王波,张朝晖,等.莱州湾海水中营养盐分布与富营养化的关系[J].海洋科学进展,2006,24(3):329-335.
- [10] 赵霞,谭丽菊,王江涛,等.山东近海溶解态无机营养盐的分布特征研究[J].中国海洋大学学报:自然科学版,2009,39(4):799-804.
- [11] 冯士筵,张经,魏皓.渤海环境动力学导论[M].北京:科学出版社,2007:1-87.
- [12] 崔毅,马绍赛,陈聚法,等.乳山湾东流区海水营养盐消长与盐度的关系[J].海洋水产研究,1997,18(2):73-78.
- [13] 张继民,刘霜,张琦,等.黄河口附近海域营养盐特征及富营养化程度评价[J].海洋通报,2008,27(5):65-72.
- [14] 石海明,尹翠玲,张秋丰,等.近年来渤海湾赤潮监控区营养盐变化及其结构特征分析[J].海洋环境科学,2010,29(2):246-249.
- [15] Justic D, Rabalais N N, Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, 30(1):41-46.
- [16] 阚文静,张秋丰,石海明,等.近年来渤海湾营养盐变化趋势研究[J].海洋环境科学,2010,29(2):238-241.

责任编辑:周建军