

## 2019年渤海氮磷营养盐季节变化及富营养化状况

王 燕<sup>1,2</sup>, 姚振童<sup>1,2</sup>, 祝艳君<sup>1,2</sup>, 刘学淞<sup>1,2</sup>,  
姚文君<sup>1,2</sup>, 马新东<sup>1,2</sup>, 王 震<sup>1,2</sup>

(1.国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116023; 2.国家环境保护近岸海域生态环境重点实验室, 辽宁 大连 116023)

**摘 要:**本研究采用 2019 年渤海四个季节表层的氮磷营养盐数据, 对渤海氮磷营养盐浓度、N/P 和富营养化状况的季节变化进行了分析和评价。结果表明: DIN 和 PO<sub>4</sub>-P 的季节分布明显不同, DIN 平均浓度表现为秋季最高、冬季和春季次之、夏季最低的季节分布特征, 而 PO<sub>4</sub>-P 平均浓度最高值出现在秋季, 其他季节浓度相近; 空间分布上, DIN 及各组分 (NH<sub>4</sub>-N 除外) 均呈现近岸高、中部低的空间分布, 受河流输入影响显著, 虽然在近岸海域如辽河口出现 PO<sub>4</sub>-P 的高值区, 但 PO<sub>4</sub>-P 各季节分布变化较大, 并在秋、冬季节出现渤海中部浓度升高的情况, 可能是受陆源输入和海洋中磷的内源循环的共同影响; 同一季节近岸海域 N/P 远高于近海海域, 渤海近岸海域呈现显著的磷限制, 近海海域由于出现大片 N/P 小于 16 的区域, 可能出现潜在氮限制的现象; 富营养化指数 (EI) 结果显示, 渤海富营养化区域主要集中在辽河口, 该海域常年为中度富营养化区域, 过量的 DIN 是富营养化的主要原因。

**关键词:**营养盐; N/P; 分布; 富营养化

中图分类号: P734

文献标识码: A

文章编号: 1007-6336(2021)06-0915-07

## Seasonal variation of nutrients and eutrophication of 2019 in Bohai Sea, China

WANG Yan<sup>1,2</sup>, YAO Zhen-tong<sup>1,2</sup>, ZHU Yan-jun<sup>1,2</sup>, LIU Xue-song<sup>1,2</sup>,  
YAO Wen-jun<sup>1,2</sup>, MA Xin-dong<sup>1,2</sup>, WANG Zhen<sup>1,2</sup>

(1.National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 116023, China; 2.State Environmental Protection Key Laboratory of Coastal Ecosystem, Dalian 116023, China)

**Abstract:** Based on the surface nutrient data of Bohai Sea in 2019, seasonal variations of nutrient concentrations, N/P ratio and eutrophication status were analyzed and evaluated. Results showed that seasonal distributions of DIN and phosphate were obviously different. The highest and lowest average concentration of seasonal DIN appeared in autumn and summer respectively. The highest average concentration of seasonal phosphate appeared in autumn and other seasonal concentrations were similar. In terms of spatial distribution, concentration of DIN and its components (except NH<sub>4</sub>-N) decreased from inshore to offshore, which were significantly affected by river input. Although the highest value of phosphate appeared in coastal waters such as Liaohe estuary, the distribution of phosphate varied greatly in each season, indicating that phosphate is jointly affected by land-based input and phosphorus endogenous cycle in the ocean. Compared with offshore, N/P ratios of inshore were much higher, indicating that the nutrition of inshore was P-Limited (N/P<16) while the nutrition of offshore may be N-Limited (N/P<16). Eutrophication status showed that eutrophication areas mainly focused on Liaohe estuary and excessive DIN was the main reason.

收稿日期: 2021-07-26, 修订日期: 2021-09-17

基金项目: 国家重点研发计划专项课题(2018YFC0213103): “黄渤海大气气溶胶沉降通量研究”

作者简介: 王 燕(1984-), 女, 山东泰安人, 硕士, 主要研究方向为海洋环境监测与评价, E-mail: wangyan@nmemc.org.cn

通讯作者: 王 震(1977-), 男, 研究员, 博士, 海洋环境监测技术, E-mail: zwang@nmemc.org.cn

**Key words:** nutrient; N/P ratio; distribution; eutrophication

营养盐是浮游植物生长的物质基础,其浓度和结构显著影响浮游植物的生长繁殖和群落变化<sup>[1-2]</sup>。随着经济的快速发展,工农业生产、生活污水携带了大量的营养物质进入海洋<sup>[3]</sup>,导致近岸海域富营养化不断加剧,赤潮、绿潮等生态灾害频发<sup>[4]</sup>,严重威胁近岸海洋生态和经济的可持续发展<sup>[5]</sup>。

渤海是我国面积最小的半封闭型内海,平均水深仅为 17 m,面积为 7.7 万 km<sup>2</sup>。渤海周边几乎均被大陆包围,北、西、南面由人口密集、工业发达的三省一市(辽宁省、河北省、山东省、天津市)环绕,仅在东南方向通过渤海海峡与黄海相连。沿岸有黄河、海河、滦河和辽河等 40 余条河流入海,生态环境受人为因素影响显著<sup>[6]</sup>。一直以来,渤海都是我国海洋研究的热点地区,在营养盐的季节分布及限制情况<sup>[6-8]</sup>、富营养化及生态效应<sup>[9]</sup>、营养盐长时间变化<sup>[10-12]</sup>、营养盐基准<sup>[13]</sup>等方面,都开展了大量的工作。研究显示,近年来渤海溶解无机氮浓度整体呈增加趋势,2002 年以后迅速增加,磷酸盐浓度呈下降趋势,营养盐限制由氮限制向磷限制和硅限制演变<sup>[10, 12, 14]</sup>。

随着《渤海碧海行动计划》《渤海综合治理攻坚战行动计划》等计划的实施,渤海水环境综合治理工作取得了积极进展和良好成效,但局部海域仍存在一定程度的富营养化现象。为进一步了解和发现现阶段渤海水质的总体环境状况,本文对渤海 2019 年四个季度的氮、磷营养盐数据进行了全面分析,并对其富营养化情况进行了探讨。该结果对于全面了解现阶段渤海近岸及近海海域氮、磷营养盐的空间分布特征、季节特征及结构特征具有重要的参考意义,也为下一步开展渤海海洋生态环境业务监测提供借鉴。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域与指标

数据资料来源于 2019 年渤海海洋生态环境监测,监测站位 351 个,覆盖渤海近岸和近海海域,监测时间为 2019 年 3 月、5 月—6 月、7 月—

8 月和 10 月—11 月,分别代表冬季、春季、夏季和秋季。监测过程中,在样品采集、保存、运输和测试的全过程中采取了现场空白、现场平行、实验室平行、实验室标样等一系列质控措施,可以保证监测数据的有效性和准确性。为便于数据比较,文中数据均为渤海表层数据,包括化学需氧量(chemical oxygen demand, COD)、硝酸盐(NO<sub>3</sub>-N)、亚硝酸盐(NO<sub>2</sub>-N)、氨氮(NH<sub>4</sub>-N)和活性磷酸盐(PO<sub>4</sub>-P)。

### 1.2 样品采集和分析

样品采集和分析严格按照《海洋监测规范第 4 部分:海水分析》(GB 17378.4—2007)和《海洋监测技术规范第 1 部分:海水》(HY/T 147.1—2013)执行。其中,COD 采用碱性高锰酸钾法进行测定;NO<sub>2</sub>-N 使用重氮-偶氮法进行测定;NO<sub>3</sub>-N 采用镉铜还原法进行测定;NH<sub>4</sub>-N 使用次溴酸盐氧化法或靛酚蓝法进行测定;PO<sub>4</sub>-P 使用磷钼蓝法进行测定。溶解无机氮为 NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 三组分之和,N/P 为 DIN 和 PO<sub>4</sub>-P 的摩尔比值。

### 1.3 富营养化评价

常用的富营养化评价方法包括单因子指数法、潜在性富营养化评价<sup>[15]</sup>、富营养化指数法(EI)<sup>[16]</sup>、营养状态质量指数法(NQI)<sup>[17]</sup>等。本文选用富营养化指数(EI)法进行评价,计算公式如下:

$$EI = \frac{COD \times DIN \times DIP}{4500} \times 10^6$$

式中:EI 为富营养化指数,无量纲;COD 为化学需氧量浓度,mg/L;DIN 为无机氮浓度,mg/L;DIP 为无机磷浓度,文中以 PO<sub>4</sub>-P 替代,mg/L。EI ≥ 1 为富营养化,其中,1 ≤ EI ≤ 3 时为轻度富营养化,3 < EI ≤ 9 时为中度富营养化,EI > 9 为重度富营养化。

## 2 结果与讨论

### 2.1 渤海表层营养盐的季节变化特征

渤海表层水体中 DIN 的组成如表 1 所示,NO<sub>3</sub>-N 是 DIN 的主要组成部分,除夏季占比较低(54%)外,其他季节占比均高于 80%;NH<sub>4</sub>-N

和  $\text{NO}_2\text{-N}$  在 DIN 中占比较低,其中  $\text{NH}_4\text{-N}$  比例略高于  $\text{NO}_2\text{-N}$ 。营养盐浓度统计结果显示(表2):  $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 浓度呈现秋季最高、冬季和春季次之、夏季最低的季节特征。 $\text{NO}_2\text{-N}$  作为氮元素氧化还原的中间价态,各季节平均浓度为 0.006 ~ 0.022 mg/L, 呈现秋季最高、夏季次之、冬春最低的季节特征,这可能与夏季和秋季温度较高,细菌活动较为活跃,氮元素硝化作用和反硝化作用较强有关。 $\text{NH}_4\text{-N}$  是氮元素的还

原形态,各季节平均浓度为 0.018 ~ 0.041 mg/L, 呈现夏季最高、其他季节浓度相近的特征。

表1 渤海表层水体 DIN 组成

季节	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$
春季	12%	83%	5%
夏季	33%	54%	13%
秋季	11%	81%	9%
冬季	11%	86%	3%

表2 渤海表层水体中各类营养盐的浓度结果(mg/L)

Tab.2 Concentration of different nutrients in surface water of Bohai Sea (mg/L)

季节	浓度	$\text{NH}_4\text{-N}$	$\text{NO}_3\text{-N}$	$\text{NO}_2\text{-N}$	DIN	$\text{PO}_4\text{-P}$
春季	范围	ND ~ 0.152	ND ~ 1.19	ND ~ 0.163	ND ~ 1.23	0.0005 ~ 0.062
	平均值	0.018±0.021	0.121±0.165	0.008±0.013	0.147±0.183	0.0054±0.0067
夏季	范围	ND ~ 0.29	ND ~ 0.846	ND ~ 0.227	0.003 ~ 1.002	0.0008 ~ 0.058
	平均值	0.041±0.062	0.069±0.113	0.016±0.028	0.126±0.153	0.0062±0.0076
秋季	范围	ND ~ 0.159	0.005 ~ 0.838	0.001 ~ 0.118	0.037 ~ 0.951	0.0007 ~ 0.044
	平均值	0.027±0.027	0.207±0.161	0.022±0.02	0.256±0.174	0.0144±0.0084
冬季	范围	ND ~ 0.158	0.001 ~ 1.313	0.001 ~ 0.048	0.015 ~ 1.354	0.0009 ~ 0.033
	平均值	0.021±0.019	0.166±0.185	0.006±0.006	0.194±0.192	0.0064±0.0051

渤海表层水体中  $\text{PO}_4\text{-P}$  平均浓度为 0.005 ~ 0.014 mg/L, 季节变化总体呈秋季最高、其他季节差异较小的特征(表2)。受我国“控磷”“禁磷”等磷负荷削减政策的影响<sup>[18-19]</sup>, 近年来渤海表层水体  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度一直处于较低水平。

## 2.2 渤海表层营养盐的空间分布特征

DIN 及各组分营养盐( $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4\text{-N}$ )的空间分布如图1所示。 $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 呈现近岸高、中部低的特征,受河流、排污口等陆源输入的影响显著(图1a和图1b)。由于辽河、大辽河、海河、黄河和小清河等河流携带了大量营养物质进入海洋, $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 高值区集中在辽东湾、渤海湾和莱州湾的湾顶区域<sup>[20-22]</sup>。春季,受河流输入的大量营养盐影响, $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 在小清河口-黄河口、辽河口和海河口出现明显高值区,浓度分别超过 0.50、1.0 和 0.2 mg/L,并呈现由河口向海洋迅速降低的变化特征;渤海湾大部分海域、渤海中部和辽东湾南部海域浓度较低,小于 0.2 mg/L。夏季,由于浮游植物对营养盐的吸收利用, $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 浓度进一步降

低,最高浓度出现在辽河口(>0.8 mg/L),其次为莱州湾西侧和黄河口周边海域。秋季,浮游植物的生长活动减弱, $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 浓度较夏季进一步升高,在辽河口、海河口和黄河口均出现明显高值区,呈现近岸高、中部低的分布特征。冬季, $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 浓度较秋季降低,在莱州湾和辽东湾呈现从近岸向外海迅速降低的变化特征;渤海湾浓度分布均匀,但普遍高于中部海域。渤海  $\text{NO}_3\text{-N}$  和 DIN 浓度冬季低于秋季的现象,主要原因是冬季监测在海冰融化后开展,监测时间接近初春(2019年3月),浮游植物的生长活动逐渐复苏,水体中的营养盐已缓慢消耗。

$\text{NO}_2\text{-N}$  的空间分布整体上也表现为近岸高、中部低的特征(图1c),高值同样出现在渤海湾、黄河口和辽河口等区域,这表明  $\text{NO}_2\text{-N}$  是从近岸向海洋扩散<sup>[23]</sup>。与其他 DIN 组分不同, $\text{NH}_4\text{-N}$  在全海域的分布基本均匀,近岸海域  $\text{NH}_4\text{-N}$  浓度略高于中部,受入海河流的影响较小(图1d)。分析原因,一方面,“氨氮”是陆源氮削减的主要控制指标,入海河流水体中的  $\text{NH}_4\text{-N}$

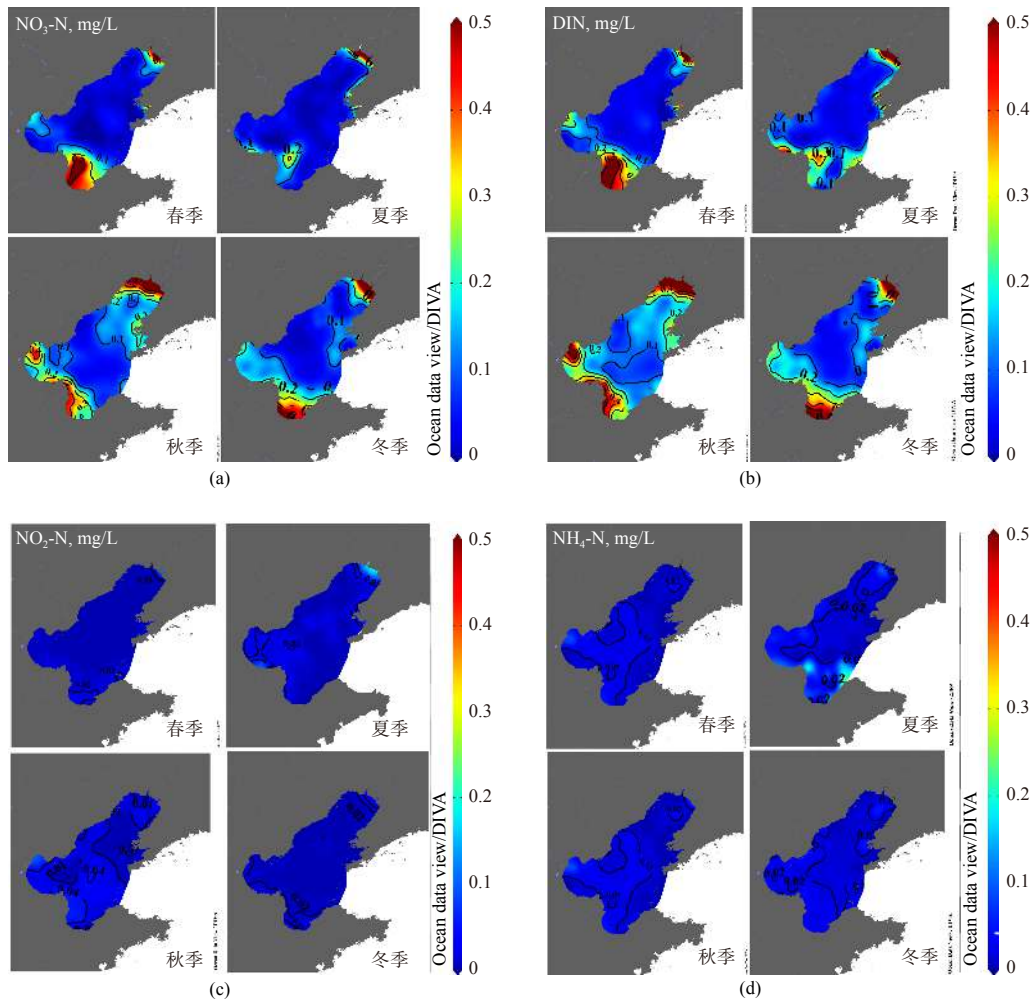


图1 渤海表层水体中  $\text{NO}_3\text{-N}$ (a)、 $\text{NO}_2\text{-N}$ (b)、 $\text{NH}_4\text{-N}$ (c) 和 DIN(d) 的空间分布特征

Fig. 1 Spatial characteristics of  $\text{NO}_3\text{-N}$ (a),  $\text{NO}_2\text{-N}$ (b),  $\text{NH}_4\text{-N}$ (c) and DIN(d) in surficial water of Bohai Sea

浓度较低<sup>[24-25]</sup>;另一方面,在光合作用浮游植物固氮的过程中, $\text{NH}_4\text{-N}$ 是同化反应中最先被吸收利用的组分<sup>[26]</sup>。

$\text{PO}_4\text{-P}$ 的空间分布与 DIN 近岸高、中部低的分布特征存在明显不同(图2)。春季,渤海表层  $\text{PO}_4\text{-P}$  分布相对均匀,仅在辽河口、渤海湾湾顶和莱州湾湾顶出现浓度大于 0.015 mg/L 的高值区。夏季,除辽河口和渤海湾南部出现  $\text{PO}_4\text{-P}$  等值线密集的高值区外,其他海域  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度均符合第一类海水水质标准,表现为渤海湾北部、莱州湾湾顶和辽东湾东部海域略高的分布特征。秋季,渤海表层水体中  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度显著升高,高值区出现在辽河口海域;以海河-大连连线为界,界线以北海域  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度较高,普遍高于 0.015 mg/L,界线以南海域浓度较低,基本符合第一类海水水

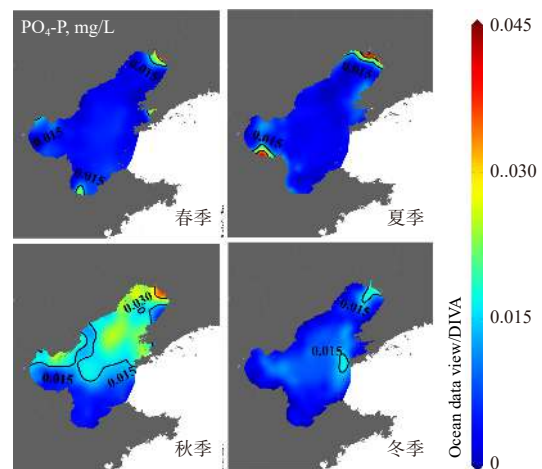


图2 渤海表层水体中  $\text{PO}_4\text{-P}$  的分布(mg/L)

Fig. 2 Spatial characteristics of  $\text{PO}_4\text{-P}$  in surficial water of Bohai Sea

质标准。冬季,  $\text{PO}_4\text{-P}$  呈现近岸低、中部高的分布特征, 辽河口和大连近岸浓度略高于  $0.015 \text{ mg/L}$ 。空间分布表明, 渤海  $\text{PO}_4\text{-P}$  受辽河和大辽河等影响显著, 海洋内源循环如夏季浮游植物对磷的“奢侈消费”吸收储存作用<sup>[27]</sup>以及水体颗粒物中磷的吸附、解吸作用<sup>[28]</sup>, 可能是影响  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度的重要因素。

### 2.3 渤海表层水体中营养盐的 N/P 结构

N/P 的季节变化特征如图 3 所示。各季节

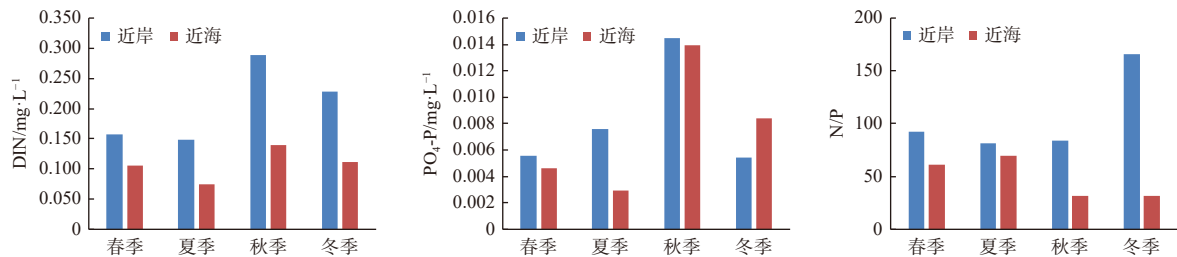


图3 渤海近岸和近海水体中 DIN、 $\text{PO}_4\text{-P}$  和 N/P 的季节特征

Fig. 3 Seasonal characteristics of DIN,  $\text{PO}_4\text{-P}$  and N/P ratio in surficial water of Bohai Sea

N/P 的空间变化特征(图 4)表明, 渤海近岸海域磷限制严重, 中部海域 N/P 低至 3.87(春季表层), 呈现潜在氮限制的特征。其中, 春季, 莱州湾、渤海湾、滦河口及辽东湾东侧海域 N/P 高于 Redfield 比值, 高值出现在黄河口外部海域、渤海湾湾顶、滦河口及盖州—鲅鱼圈近岸海域, 营养盐结构表现为磷限制; 辽东湾西部海域和渤海中部海域 N/P 小于 Redfield 比值, 海域可能出

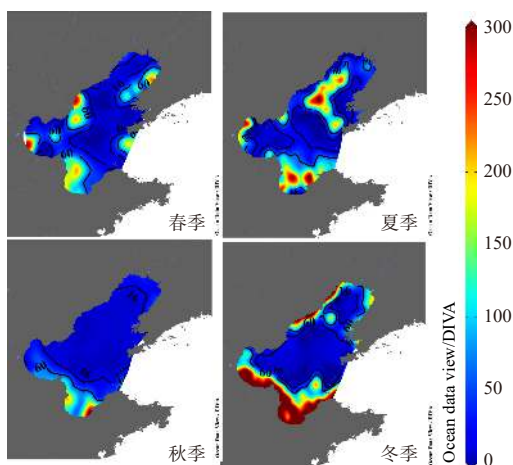


图4 2019年表层水体中 N/P 比的分布(摩尔比)

Fig. 4 Spatial characteristics of N/P ratio in surface water in Bohai Sea

N/P 平均值为  $72 \sim 121$ , 远高于 Redfield 比值(16), 且 DIN 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  平均浓度均高于 Nelson 提出的浮游植物生长最低阈值(DIN= $0.014 \text{ mg/L}$ ,  $\text{PO}_4\text{-P}=0.0031 \text{ mg/L}$ )<sup>[29]</sup>, 海域呈现明显的磷限制。以海洋功能区划为界, 近岸和近海海域 N/P 平均值分别为  $81 \sim 166$  和  $31 \sim 70$ , 同一季节近岸海域 N/P 远高于近海海域, 近岸海域磷限制程度高于近海海域。

现氮限制。夏季, 浮游植物生长繁殖大量消耗水体中的营养盐, DIN 和  $\text{PO}_4\text{-P}$  的浓度均显著降低,  $\text{PO}_4\text{-P}$  经常出现未检出或在检出限附近的情况; N/P 显著升高, 除渤海中部小于 Redfield 比值(16), 可能出现氮限制外, 其他海域均表现为磷限制, 磷成为浮游植物生长的限制因素。秋季, 随着  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度的升高, N/P 小于 16 的范围增大, 除辽东湾湾顶、渤海湾和莱州湾仍为磷限制外, 渤海中部和辽东湾南部海域 N/P 均小于 16, 可能出现氮限制。冬季, 磷限制海域集中在渤海近岸, 莱州湾全部、渤海湾南部和辽东湾西侧近岸海域出现大片等值线密集的高值区; N/P 小于 16 的区域进一步向辽东湾湾顶扩张, 渤海中部海域可能出现氮限制。

### 2.4 富营养化状况评价

COD 季节变化不明显, 季度平均值为  $1.23 \sim 1.37$ , 除秋季近岸和近海海域 COD 相近外, 其他季节均表现为近岸海域 COD 普遍高于近海海域的分布特征。富营养化指数(EI)季度变化如图 5 所示, 秋季最高(1.43), 夏季次之(0.76), 春季、冬季最低(分别为 0.48 和 0.46)。其中, 近岸富营养化程度远高于近海, 除秋季近岸海域富营养化程

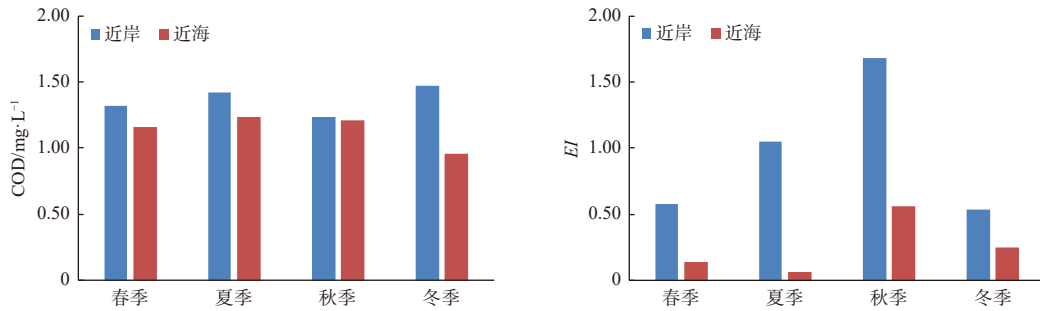


图5 渤海近岸及近海表层水体中化学需氧量和富营养化指数的季节特征

Fig. 5 Seasonal characteristics of COD and *EI* indexes in surficial water of Bohai Sea

度较高外,其他季节近岸和近海海域基本未出现富营养化。

COD浓度和*EI*的空间分布如图6所示。春季,中度富营养化区域出现在辽河口( $EI > 5$ ),轻度富营养化区域出现在渤海湾湾顶、莱州湾湾顶和复州湾( $EI > 1$ );夏季,高值区出现在辽河口邻近海域及渤海湾南部海域( $EI > 5$ ),为中度富

营养化,黄河口邻近海域出现轻度富营养化( $EI > 1$ );秋季,富营养化程度较高,中度富营养化区域在辽东湾和渤海湾湾顶,基本与DIN的高值区重合,体现了DIN对水体环境的影响;冬季,富营养化程度略有降低,仅在辽东湾湾顶出现中度富营养化海域,其他海域均未出现富营养化。

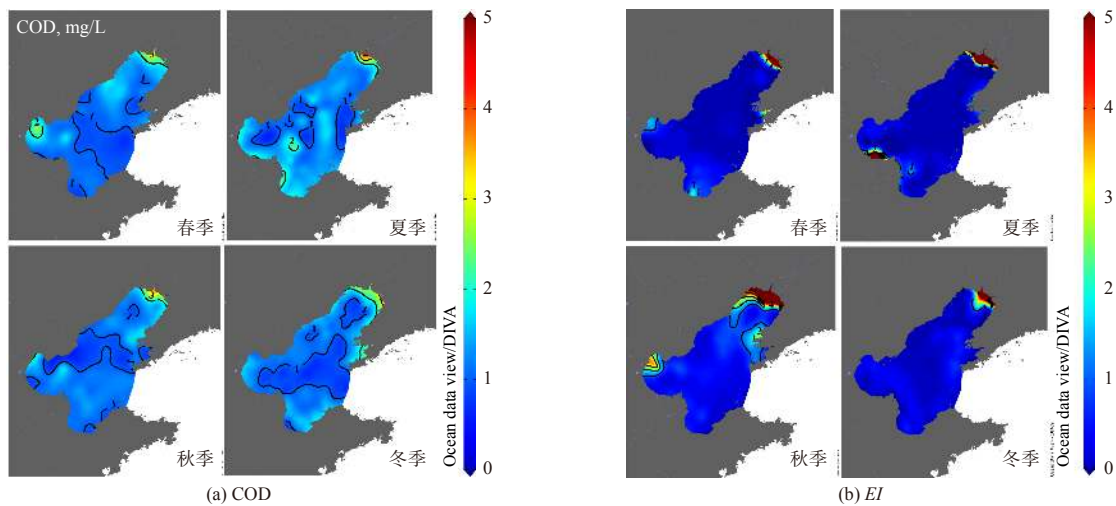


图6 渤海表层水体化学需氧量和富营养化指数的空间分布特征

Fig. 6 Spatial characteristics of COD and *EI* in surface water of Bohai Sea

### 3 结论

(1)渤海表层水体中DIN浓度呈现近岸高、中部低的空间分布特征,受辽河、大辽河、海河、黄河和小清河等陆源输入的影响显著,高值区集中在辽东湾、渤海湾和莱州湾的湾顶区域,且DIN浓度表现出明显的季节变化特征。

(2) $PO_4\text{-P}$ 浓度呈现秋季浓度最高、其他季节相近的分布特征,受辽河和大辽河影响显著。

海洋内源循环如夏季浮游植物对磷的“奢侈消费”吸收储存作用以及水体颗粒物中磷的吸附解吸作用,可能是影响水体中 $PO_4\text{-P}$ 浓度的一个重要因素。

(3)N/P总体呈现近岸高、中部低的空间分布特征,近岸和中部海域呈现出不同的营养盐限制特征,其中近岸海域主要为磷限制,中部海域可能出现潜在氮限制。

(4)富营养化程度为秋季最高,夏季次之,春

季、冬季最低,辽河口是渤海表层水体富营养化的主要区域,主要影响因素为DIN。

**致谢:** 本研究受国家重点研发计划专项(2018YFC0213103)和全国海洋生态环境监测质量业务工作资助!

#### 参考文献:

- [1] JIN J, LIU S M, REN J L, et al. Nutrient dynamics and coupling with phytoplankton species composition during the spring blooms in the Yellow Sea[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2013, 97: 16-32.
- [2] ZHOU L M, SUN Y, ZHANG H H, et al. Distribution and characteristics of inorganic nutrients in the surface microlayer and subsurface water of the Bohai and Yellow Seas[J]. *Continental Shelf Research*, 2018, 168: 1-10.
- [3] 刘钦普. 中国化肥施用强度及环境安全阈值时空变化[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(6): 214-221.
- [4] 刘成, 王兆印, 何耘, 等. 环渤海湾诸河口潜在生态风险评估[J]. *环境科学研究*, 2002, 15(5): 33-37.
- [5] NING X R, LIN C L, SU J L, et al. Long-term environmental changes and the responses of the ecosystems in the Bohai Sea during 1960-1996[J]. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 2010, 57(11/12): 1079-1091.
- [6] 张海波, 王丽莎, 石晓勇, 等. 渤海中部营养盐季节变化及限制统计分析[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(4): 1579-1588.
- [7] 隋琪, 夏斌, 谢寒冰, 等. 2014年春季和冬季渤海海水营养盐时空变化特征及富营养化评价[J]. *渔业科学进展*, 2016, 37(2): 10-15.
- [8] LIU X H, LIU D Y, WANG Y J, et al. Temporal and spatial variations and impact factors of nutrients in Bohai Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2019, 140: 549-562.
- [9] 孙培艳. 渤海富营养化变化特征及生态效应分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2007.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] WANG J J, YU Z G, WEI Q S, et al. Long-term nutrient variations in the Bohai Sea over the past 40 years[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2019, 124(1): 703-722.
- [13] XIE L P, XU H Y, XIN M, et al. Regime shifts in trophic status and regional nutrient criteria for the Bohai Bay, China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2021, 170: 112674.
- [14] 李伯志, 赵亮, 魏诗晏. 渤海和北黄海溶解氧与营养盐年际变化特征[J]. *天津科技大学学报*, 2019, 34(4): 45-55.
- [15] 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.
- [16] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. *海洋环境科学*, 1983, 2(2): 41-54.
- [17] 李保石, 厉丞烜, 金玉休, 等. 广海湾海域营养盐时空分布及富营养化评价[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(5): 657-663.
- [18] 杨扬, 熊丽, 刘明清, 等. 洗涤剂禁(限)磷对流域水质影响预测[J]. *湖泊科学*, 2001, 13(4): 361-366.
- [19] 季耿善. 关于水域富营养化及对我国洗涤剂“禁磷”的讨论[J]. *中国环保产业*, 2007(11): 9-11.
- [20] 祝雅轩, 裴绍峰, 张海波, 等. 莱州湾营养盐和富营养化特征与研究进展[J]. *海洋地质前沿*, 2019, 35(4): 1-9.
- [21] 祝雅轩. 莱州湾与辽东湾营养盐特征及其对生态环境的影响: 对比研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [22] 刘西汉. 渤海湾营养盐与浮游植物群落结构的变化特征及关系分析[D]. 烟台: 中国科学院大学(中国科学院烟台海岸带研究所), 2019.
- [23] ZHANG J, YU Z G, RAABE T, et al. Dynamics of inorganic nutrient species in the Bohai seawaters[J]. *Journal of Marine Systems*, 2004, 44(3/4): 189-212.
- [24] 谷文艳, 陈洪涛, 姚庆祯, 等. 黄河下游溶解态营养盐季节变化及入海通量研究[J]. *中国海洋大学学报*, 2017, 47(3): 74-79, 86.
- [25] 于立霞, 简慧敏, 王兆锴, 等. 夏季辽河口各形态营养盐的河口混合行为[J]. *海洋科学*, 2011, 35(12): 68-74.
- [26] MILLERO F J. 化学海洋学[M]. 刘岚, 译. 广州: 中山大学出版社, 2019: 319.
- [27] 金杰, 刘素美. 海洋浮游植物对磷的响应研究进展[J]. *地球科学进展*, 2013, 28(2): 253-261.
- [28] 李俊杰. 大亚湾和胶州湾颗粒磷的分布、输出与转化研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2019.
- [29] NELSON D M, BRZEZINSKI M A. Kinetics of silicic acid uptake by natural diatom assemblages in two Gulf Stream warm-core rings[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 62(3): 283-292.