

DOI:10.19663/j.issn2095-9869.20200715001

http://www.yykxjz.cn/

由丽萍, 赵玉庭, 孙珊, 苏博, 马元庆, 王立明, 齐延民, 李佳蕙, 董晓晓. 2018 年春季和夏季莱州湾营养盐结构及限制特征. 渔业科学进展, 2021, 42(6): 15-24

YOU L P, ZHAO Y T, SUN S, SU B, MA Y Q, WANG L M, QI Y M, LI J H, DONG X X. Characteristics of nutrient structures and limitations in Laizhou Bay in the spring and summer of 2018. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(6): 15-24

## 2018 年春季和夏季莱州湾营养盐结构及限制特征\*

由丽萍<sup>#</sup> 赵玉庭<sup>#</sup> 孙珊<sup>①</sup> 苏博 马元庆  
王立明 齐延民 李佳蕙 董晓晓

(山东省海洋资源与环境研究院 山东省海洋生态修复重点实验室 山东 烟台 264006)

**摘要** 根据 2018 年 5、8 月莱州湾的生态调查资料, 采用营养盐限制法则及潜在性富营养化评价模式等方法, 对莱州湾无机氮(DIN)、活性磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )和硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ )的平面分布、结构及限制特征进行了分析。结果显示, 2018 年 5、8 月莱州湾的 DIN 浓度范围为 1.64~106.36  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 24.18  $\mu\text{mol/L}$ , 5 月明显高于 8 月;  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  浓度范围为 0~2.010  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 0.182  $\mu\text{mol/L}$ , 8 月明显高于 5 月;  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  浓度变化范围为 0.97~78.93  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 18.30  $\mu\text{mol/L}$ , 8 月明显高于 5 月。DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、N/P 高值区主要位于莱州湾西部的小清河口和黄河口附近海域;  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、Si/N、Si/P 高值区主要位于湾底部、龙口-莱州近岸海域。对营养盐结构的分析表明, 莱州湾存在明显的磷限制和枯水期的硅限制, 陆源输入是莱州湾营养盐的主要来源。营养盐结构限制平面分布表明, 春季莱州-招远养殖区和夏季东营-潍坊养殖区易引发赤潮, 夏季莱州-招远养殖区初级生产力受到一定限制, 对养殖业造成一定的影响。

**关键词** 莱州湾; 无机氮; 活性磷酸盐; 硅酸盐; 营养盐结构; 限制特征  
**中图分类号** S949 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)06-0015-10

海水中的营养盐是海洋浮游植物生长繁殖所必需的成分, 营养盐浓度、形态和结构的变化会引起初级生产力的变化, 进而产生相应的生态环境效应, 影响整个海洋生物资源(颜秀丽等, 2012; Ning *et al.*, 2010; 孙萍等, 2008; Tang *et al.*, 2003)。

莱州湾位于山东半岛北部、渤海南部, 三面环陆, 沿岸有黄河、小清河、白浪河等多条河流注入(刘慧等, 2003; 刘义豪等, 2011), 入海径流为其带来丰富的营养物质, 是多种水生动物索饵、产卵、栖息场所, 是我国北方重要渔场之一(米铁柱等, 2001; 马彩华等, 2017; Jin *et al.*, 2013; 张锦峰等, 2015)。近年来, 无机

氮(DIN)污染及营养盐结构失衡已成为莱州湾环境的突出问题(杜培培等, 2017; 张锦峰等, 2015), 但对于指导莱州湾养殖业生产的研究极少。因此, 研究莱州湾营养盐结构特征及限制状况分布区域, 对了解莱州湾养殖生态系统具有重要的指导意义(刘爱英等, 2017)。

本研究基于 2018 年 5、8 月在莱州湾的生态调查资料, 分析了该海域春、夏季营养盐平面分布, 并对其结构状况及限制特征进行了探讨, 旨在了解莱州湾营养盐状况及养殖风险区域, 为莱州湾环境保护及海水养殖业健康发展提供科学依据。

\* 国家重点研发计划(2018YFC1407601; 2018YFC1407605)和山东省重点研发计划(2019JZZY020705)共同资助 [This work was supported by National Key Research and Development Program (2018YFC1407601; 2018YFC1407605), and Shandong Provincial Key Research and Development Program (2019JZZY020705)].

<sup>#</sup>共同第一作者: 由丽萍, E-mail: youliping521@163.com; 赵玉庭, E-mail: zhaoyutingnihao@126.com

<sup>①</sup> 通讯作者: 孙珊, 副研究员, E-mail: sunsan18@163.com

收稿日期: 2020-07-15, 收修改稿日期: 2020-08-04

## 1 材料与方法

### 1.1 调查时间与站位

2018年5、8月在莱州湾海域(37.2°~37.8°N, 119.0°~120.2°E)进行2个航次的生态调查,共布设调查站位107个(图1)。

### 1.2 调查项目与分析方法

样品采集按照海洋监测规范(GB 17378-2007)和海洋调查规范(GB 12763-2007)进行。样品分析按照海洋监测技术规范(GB/T 147-2013)进行。分析项目包括氨氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ )、亚硝酸盐氮( $\text{NO}_2^-\text{-N}$ )、硝酸盐氮( $\text{NO}_3^-\text{-N}$ )、活性磷酸盐( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ )和硅酸盐( $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ ),均采用流动分析法测定,其中, $\text{DIN}=\text{NO}_3^-\text{-N}+\text{NO}_2^-\text{-N}+\text{NH}_4^+\text{-N}$ ,数据均采用表层水样数据。

### 1.3 数据统计及评价方法

平面分布图采用 Surfer 8.0 软件绘制,双变量相

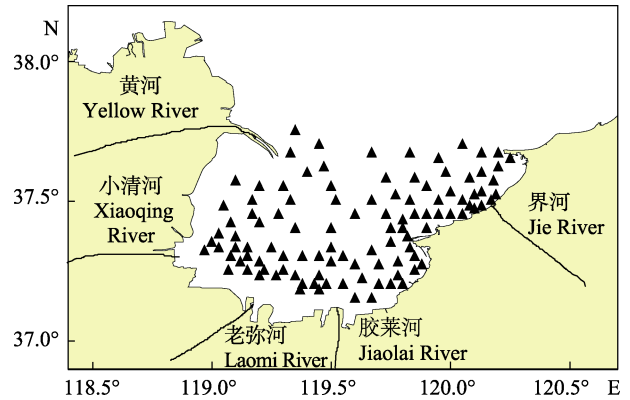


图1 莱州湾调查站位

Fig. 1 Location of sampling stations in Laizhou Bay

关性采用 SPSS 19.0 软件分析。

本研究采用 Nelson 等(1990)提出的营养盐绝对限制法则、Justic 等(1995)提出的相对限制法则和郭卫东等(1998)提出的潜在性富营养化评价模式(表1)对莱州湾营养状况进行评价。

表1 潜在性富营养化评价标准

Tab.1 Potential eutrophication assessment standards

等级 Grade	营养级 Nutrient level	无机氮 $\text{DIN}/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	活性磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}/(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	氮/磷 N/P
I	贫营养 Poor nutrient	<14.28	<0.97	8~30
II	中度营养 Medium nutrient	14.28~21.41	0.97~1.45	8~30
III	富营养 Rich nutrient	>21.41	>1.45	8~30
IV <sub>P</sub>	磷限制中度营养 Medium nutrient with phosphorous limiting	14.28~21.41	/	>30
V <sub>P</sub>	磷中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium phosphorous limiting	>21.41	/	30~60
VI <sub>P</sub>	磷限制潜在性富营养 Potential eutrophication with phosphorous limiting	>21.41	/	>60
IV <sub>N</sub>	氮限制中度营养 Medium nutrient with nitrogen limiting	/	0.97~1.45	<8
V <sub>N</sub>	氮中等限制潜在性富营养 Potential eutrophication with medium nitrogen limiting	/	>1.45	4~8
VI <sub>N</sub>	氮限制潜在性富营养 Potential eutrophication with nitrogen limiting	/	>1.45	<4

## 2 结果

### 2.1 营养盐平面分布特征

**2.1.1 DIN的平面分布特征** 5月, DIN浓度范围为7.52~106.36  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为(29.33±17.95)  $\mu\text{mol/L}$ , 基本呈西南部近岸海域高、东北部海域低的分布特征, 高值区主要位于小清河口附近海域; 8月, DIN浓度范围为1.64~88.98  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为(19.02±22.54)  $\mu\text{mol/L}$ 。8月明显低于5月, 基本呈现西部近岸海域高、中部低的分布特征。2个高值区主要位于

小清河口及黄河口附近海域, 浓度均超过42.9  $\mu\text{mol/L}$ , 受入海径流及莱州湾潮流影响(郭富等, 2017), DIN含量自西向东逐渐降低(图2)。

**2.1.2  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 的平面分布特征** 5月,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度为0~0.545  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为(0.148±0.129)  $\mu\text{mol/L}$ , 研究海域  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度整体较低, 无明显的高值区; 8月,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 浓度范围为0~2.010  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为(0.216±0.319)  $\mu\text{mol/L}$ , 呈西南部近岸海域高、东部海域低的分布特征, 丰水期  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 受河流输入增加明显, 在小清河口附近海域出现了1个高值区(图3)。

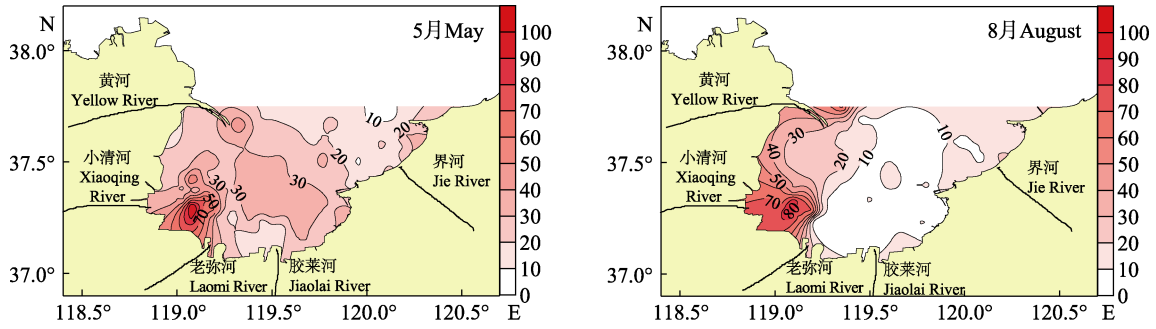


图 2 2018 年莱州湾 DIN 平面分布

Fig.2 Horizontal distribution of inorganic nitrogen in Laizhou Bay, 2018 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )

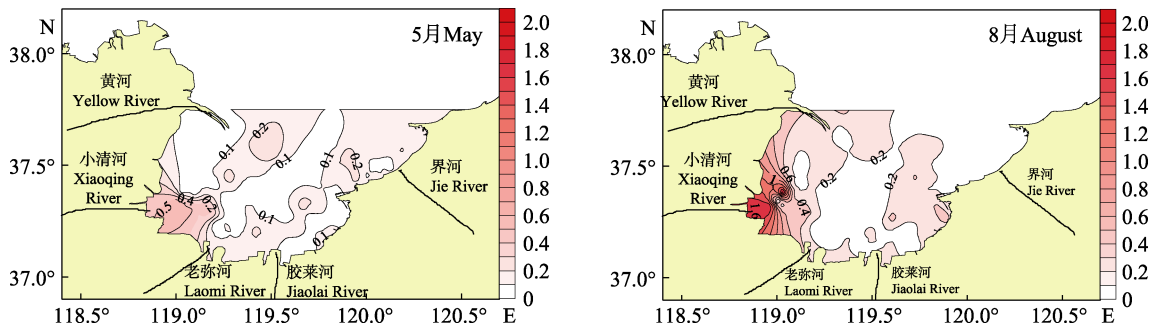


图 3 2018 年莱州湾  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平面分布

Fig.3 Horizontal distribution of phosphorus in Laizhou Bay, 2018 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )

**2.1.3  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  的平面分布特征** 5 月,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  浓度范围为  $0.97\sim 33.89 \mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(10.64\pm 10.21) \mu\text{mol/L}$ , 无明显高值区, 基本呈东部、南部海域较高, 其他海域较低的特征; 8 月,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  浓度范围为  $1.71\sim 78.93 \mu\text{mol/L}$ , 平均值为  $(25.95\pm 20.48) \mu\text{mol/L}$ 。8 月明显高于 5 月, 基本呈南部海域较高、北部海域低的分布特征, 高值区主要位于莱州湾底部海域, 较 5 月有明显增高(图 4)。

**2.2 营养盐结构平面分布特征**

**2.2.1 N/P 值平面分布特征** 5 月, N/P 值范围为  $38\sim 2446$ , 平均值为  $355\pm 411$ 。平面分布基本呈斑块状分布, 高值区主要分布在黄河口附近海域。8 月, N/P 值范围为  $9\sim 1287$ , 平均值为  $166\pm 247$ , 平面分布

基本呈东北部海域高、其他海域低的分布特征, 高值区主要分布在东北部海域, 明显低于 5 月。表明丰水期河流输入有利于莱州湾 N/P 值的降低(图 5)。

**2.2.2 Si/N 值平面分布特征** 5 月, Si/N 值范围为  $0.02\sim 2.71$ , 平均值为  $0.573\pm 0.716$ , 平面分布与  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  分布特征相似, 基本呈东部海域较高、其他海域较低的特征, 高值区主要位于招远-龙口近岸海域; 8 月, Si/N 值范围为  $0.09\sim 31.3$ , 平均值为  $4.02\pm 6.55$ , 平面分布基本呈南部海域高、其他海域较低的特征, 高值区主要位于湾底部海域, 较 5 月有明显增高(图 6)。

**2.2.3 Si/P 值平面分布特征** 5 月, Si/P 值范围为  $4.09\sim 751$ , 平均值为  $115\pm 154$ , 平面分布与  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  平面分布特征相似, 基本呈东部、南部海域较高, 西北

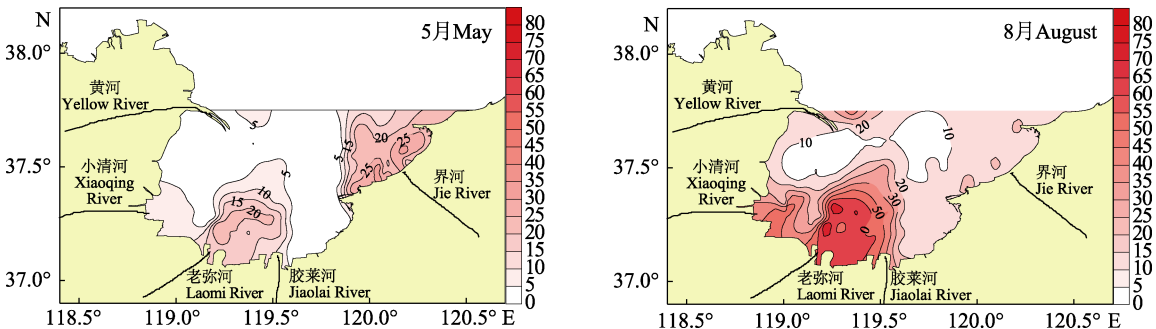


图 4 2018 年莱州湾  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  平面分布

Fig.4 Horizontal distribution of silicate in Laizhou Bay, 2018 ( $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ )

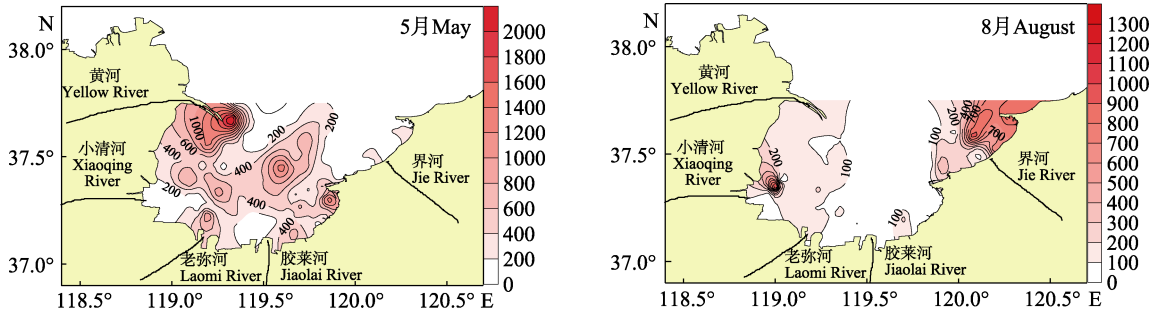


图5 2018年莱州湾N/P平面分布

Fig.5 Horizontal distribution of N/P in Laizhou Bay, 2018

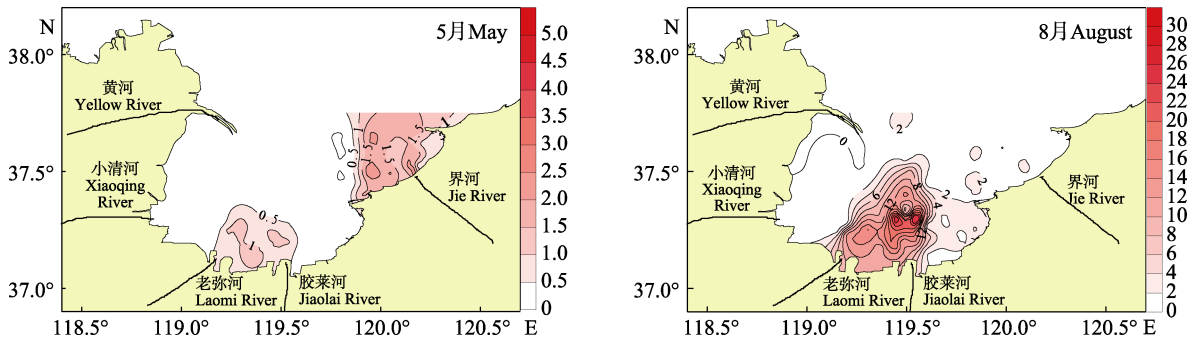


图6 2018年莱州湾Si/N平面分布

Fig.6 Horizontal distribution of Si/N in Laizhou Bay, 2018

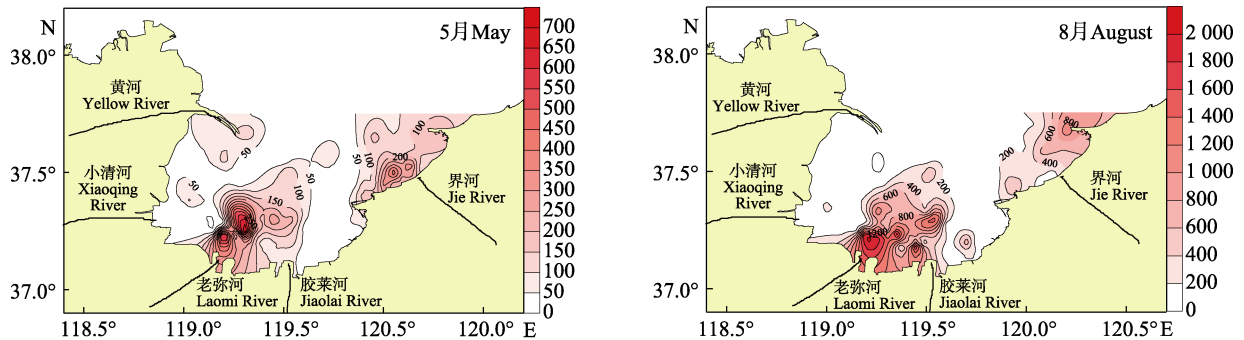


图7 2018年莱州湾Si/P平面分布

Fig.7 Horizontal distribution of Si/P in Laizhou Bay, 2018

部海域较低的特征, 高值区主要位于莱州湾底部海域; 8月, Si/P 值范围为 7.43~2259, 平均值为  $339 \pm 498$ 。8月平面分布与5月相似, 高值区主要位于莱州湾底部海域, 明显高于5月(图7)。

### 2.3 营养盐结构及限制特征

**2.3.1 营养盐限制特征** 根据营养盐的绝对限制法则(Nelson *et al.*, 1990), 浮游植物生长所需的 DIN 最低阈值为  $1 \mu\text{mol/L}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  最低阈值为  $0.1 \mu\text{mol/L}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  最低阈值为  $2 \mu\text{mol/L}$ 。若海水中某种营养盐浓度低于最低阈值, 则表明该种营养盐是初级生产力的限制因子。

从表2可以看出, 5月, 莱州湾 DIN 均高于最低

阈值; 有 51 个站点  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  低于阈值, 占比为 47.66%; 有 36 个站点  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  低于阈值, 占比为 33.64%; 有 22 个站点  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  同时低于阈值, 占比为 20.56%; 在 65 个站位中, 有 1 项营养盐低于阈值, 占比为 60.75%。8月, 莱州湾 DIN 均高于最低阈值; 有 42 个站点  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  低于阈值, 占比为 39.25%; 1 个站点  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  低于阈值, 占比为 0.93%(图8)。

根据营养盐的相对限制法则(Justic *et al.*, 1995), 当  $\text{N/P} < 10$  (原子数比, 下同)、 $\text{Si/N} > 1$  时, DIN 为限制因子; 当  $\text{Si/P} > 22$ 、 $\text{N/P} > 22$  时,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  为限制因子; 当  $\text{Si/P} < 10$ 、 $\text{Si/N} < 1$  时,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  为限制因子。

从表3可以看出, 5月, 14个站点的  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  受限制, 占比为 13.08%; 20个站位无限制, 占比为

18.69%; 73 个站位  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  受限制, 占比为 68.22%。8 月, 1 个站位 DIN 受限制, 占比为 0.93%; 2 个站位  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  受限制, 占比为 1.87%; 15 个站位无限制, 占比为 14.02%; 89 个站位  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  受限制, 占比为 83.18%。

依据杨东方等(2001)对营养盐限制的判断方法, 要确定浮游植物生长限制的营养盐元素, 必须同时满足绝对限制法则和相对限制法则, 才能确定浮游植物

生长限制的营养盐元素。

从表 4 可以看出, 5 月, 11 个站位  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  受限制, 占比为 10.28%, 主要分布在莱州湾东南部海域及小清河口外海海域; 55 个站位无限制, 占比为 51.40%, 主要分布在近岸海域; 41 个站位  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  受限制, 占比为 38.32%, 分布在莱州湾中部海域。8 月, 1 个站位  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  受限制, 占比为 0.93%; 64 个站位无限制, 占比为 59.81%, 主要分布在莱州湾西南部及中部海域;

表 2 莱州湾  $\text{DIN}$ 、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  与最低阈值比较

Tab.2 Comparison between the  $\text{DIN}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  and the minimum threshold in Laizhou Bay

限制因子 Limiting factors	阈值 Threshold value/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	比较情况 Comparison	5 月 May	8 月 August		
无机氮 $\text{DIN}$	1.0	最低值 Minimum/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	7.520	1.640		
		低于阈值站位个数 Number of stations below threshold value /ind.	0	0		
		低于阈值站位占比 Proportion of stations below threshold/%	0	0		
		活性磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.1	最低值 Minimum/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	未检出 Not detected	未检出 Not detected
活性磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$	0.1	低于阈值站位个数 Number of stations below threshold value/ind.	51	42		
		低于阈值站位占比 Proportion of stations below threshold/%	47.660	39.250		
		硅酸盐 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	2.0	最低值 Minimum/ $(\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1})$	0.968	1.710
		低于阈值站位个数 Number of stations below threshold value/ind.	36	1		
硅酸盐 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$	2.0	低于阈值站位占比 Proportion of stations below threshold/%	33.640	0.930		

表 3 莱州湾相对限制法则营养状况

Tab.3 Nutritional status of relative restriction rule in Laizhou Bay

限制因子 Limiting factors	5 月 May		8 月 August	
	站位数 Number of stations /ind.	占比 Proportion /%	站位数 Number of stations /ind.	占比 Proportion /%
无限制 Unlimited	20	18.69	15	14.02
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 限制 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ limiting	73	68.22	89	83.18
DIN 限制 DIN limiting	0	0	1	0.93
$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 限制 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ limiting	14	13.08	2	1.87

表 4 莱州湾营养状况

Tab.4 Nutritional status in Laizhou Bay

限制因子 Limiting factors	5 月 May		8 月 August	
	站位数 Number of stations /ind.	占比 Proportion /%	站位数 Number of stations /ind.	占比 Proportion /%
无限制 Unlimited	55	51.40	64	59.81
$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 限制 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ limiting	41	38.32	42	39.25
DIN 限制 DIN limiting	0	0	0	0
$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 限制 $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ limiting	11	10.28	1	0.93

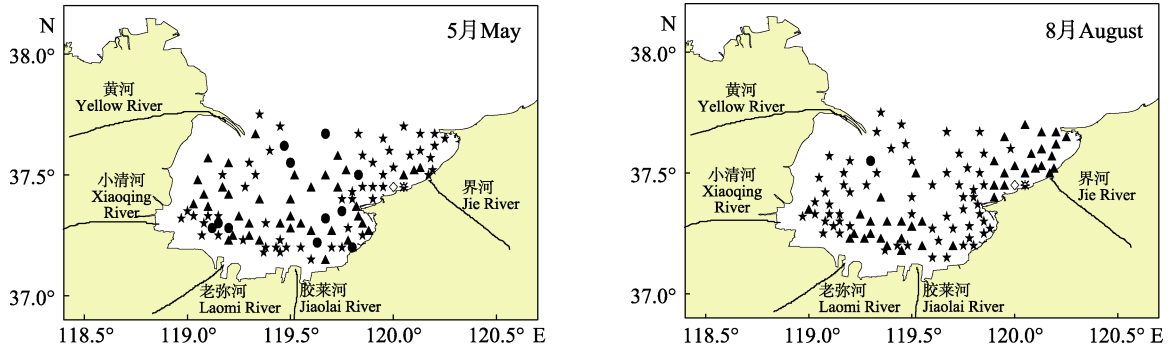


图8 莱州湾营养盐限制特征

Fig.8 Characteristics of nutrient limitation in Laizhou Bay

★: 无限制; ▲:  $PO_4^{3-}$ -P 限制; ●:  $SiO_3^{2-}$ -Si 限制  
 ★: Unlimited; ▲:  $PO_4^{3-}$ -P limiting; ●:  $SiO_3^{2-}$ -Si limiting

42个站位  $PO_4^{3-}$ -P 受限制, 占比为 39.25%, 分布在莱州湾底部海域及东北部海域。5月, 莱州湾营养盐限制因子为磷限制与硅限制; 8月, 限制因子为磷限制。

**2.3.2 潜在性富营养化评价营养盐限制特征** 潜在性富营养化评价模式见表5。从表5可以看出, 5月, 11个站位无限制, 占比为 10.28%, 主要分布在莱州湾东北部海域; 74个站位磷限制潜在性富营养, 占比为 69.16%, 主要分布在莱州湾中部、西部海域; 22个站位磷限制中度营养, 占比为 20.56%, 分布在莱州湾大部分海域。8月, 40个站位无限制, 占比为 37.38%, 主要分布在莱州湾东、南部海域; 23个站位贫营养, 占比为 21.50%, 主要分布在莱州湾东南部及中部海域; 1个站位富营养, 占比为 0.93%; 21个站位磷限制中度营养, 占比为 19.63%, 主要分布在莱州湾中部及东北部海域; 1个站位磷中等限制潜在性富营养, 占比为 0.93%; 21个站位磷限制潜在性富营养, 占比为 19.63%, 主要分布在莱州湾西南部海域(图9)。

表5 莱州湾潜在性富营养化状况

Tab.5 Potential eutrophication in Laizhou Bay

等级	5月 May		8月 August	
	站位数 Number of stations /ind.	占比 Proportion /%	站位数 Number of stations/ind.	占比 Proportion /%
无限制 Unlimited	11	10.28	40	37.38
I	0	0	23	21.50
II	0	0	0	0
III	0	0	1	0.93
IV <sub>P</sub>	74	69.16	21	19.63
V <sub>P</sub>	0	0	1	0.93
VI <sub>P</sub>	22	20.56	21	19.63
IV <sub>N</sub>	0	0	0	0
V <sub>N</sub>	0	0	0	0
VI <sub>N</sub>	0	0	0	0

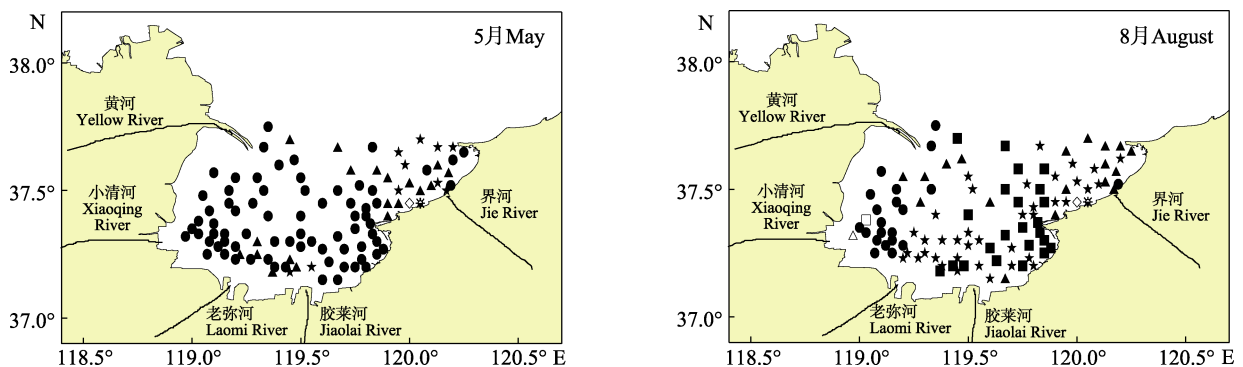


图9 潜在性富营养化评价营养盐限制特征

Fig.9 Characteristics of nutrient limitation by potential eutrophication

★: 无限制; ▲: 磷限制中度营养; ●: 磷限制潜在性富营养; ■: 贫营养; □: 富营养; △: 磷中等限制潜在性富营养  
 ★: Unlimited; ▲: Medium nutrient with phosphorous limiting; ●: Potential eutrophication with phosphorous limiting; ■: Poor nutrient; □: Rich nutrient; △: Potential eutrophication with medium nitrogen limiting

### 3 讨论

通过不同模式评价,莱州湾整体表现为明显的磷限制和枯水期的硅限制,且 N/P 值较高。研究发现,从 20 世纪 80 年代开始,莱州湾海域 N/P 值逐渐升高,营养盐结构由氮限制演化为现今的磷限制(赵玉庭等, 2016),主要原因首先是限磷政策的出台导致陆源排磷量大幅降低(山东省环境保护局, 2000),其次是氮肥在农业中大量使用,导致陆源氮输入量的增加(王修林等, 2008)。N/P 值夏季明显低于春季,8 月,虽然陆源输入较高,但由于夏季水温及光照的影响,导致浮游植物生长旺盛。8 月莱州湾浮游植物密度为  $1.14 \times 10^6$  cells/m<sup>3</sup>,是 5 月的 15 倍。浮游植物的暴发会大量消耗 DIN,导致 DIN 浓度较 5 月下降明显;同时,浮游植物间的化感效应和藻间竞争作用等引起噬氮浮游植物大量繁殖,需磷浮游植物受到限制(彭喜春等, 2007; 康燕玉等, 2006; Yuh *et al*, 2004; 李丽等, 2018),这也可能是造成夏季 N/P 值下降的主要原因。

研究发现,莱州湾呈枯水期的硅限制。莱州湾东南部海域有较多站位的  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 低于阈值,且  $\text{Si/P} < 10$ 、 $\text{Si/N} < 1$ ,均符合硅限制特征,这不利于硅藻生长,从而间接地助长甲藻繁殖,易引发赤潮,这也是该区域春季赤潮频发的原因之一(姜会超等, 2018),对春季莱州湾东南岸养殖业造成一定的风险。受丰水期陆源输入  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 补充的影响,8 月硅限制得到了有效的缓解,说明陆源输入是缓解莱州湾硅限制的重要因素。

对莱州湾盐度及叶绿素 *a* (Chl-*a*)与营养盐相关性分析,结果显示,5 月,盐度与 DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 呈显著正相关( $P < 0.05$ );在 8 月,盐度与 DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 均呈极显著负相关( $P < 0.01$ ),与 5 月相比,相关系数增高。表明河流陆源输入对莱州湾营养盐浓度影响较大,且在丰水期尤其明显,这与小清河口、黄河口等河口区域营养盐浓度较高相一致(表 6)。

Chl-*a* 在 5 月与 Si/P 值呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),表明  $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 是 5 月初级生产力的主要限制因子;Chl-*a* 在 8 月与 DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 相比呈极显著正相关( $P < 0.01$ )(表 6)。8 月,在莱州湾中北部海域,DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 含量均较低,有 23 个站位呈贫营养化状态,成为限制 8 月初级生产力的主要原因。

莱州湾内海水养殖区分别位于湾东南岸的莱州-招远-龙口养殖区和西南岸的东营-潍坊养殖区。春季,莱州-招远养殖区营养盐结构基本为磷限制和硅限制特征,易引发甲藻赤潮,对该海域养殖业造成一定的风险。招远-龙口养殖区基本为无限制或磷限制特征;东营-潍坊养殖区基本为无限制或磷限制特征,少数为硅限制特征。夏季,莱州-招远养殖区营养盐结构基本为无限制或贫营养特征,该海域初级生产力受到一定限制,对其海水养殖业造成一定的影响;招远-龙口养殖区基本为磷限制;东营-潍坊养殖区基本为无限制或磷限制特征,富营养化程度较高,易引发硅藻赤潮(山东省生态环境厅, 2019),对该海域养殖业造成一定的风险。

表 6 营养盐与盐度及 Chl-*a* 相关性分析

Tab.6 Pearson correlation coefficient between nutrients with salinity and Chl-*a*

项目 Items	时间 Time	无机氮 DIN	活性磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}$ -P	硅酸盐 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si	氮/磷 N/P	硅/氮 Si/N	硅/磷 Si/P
盐度 Salinity	5 月 May	-0.339**	-0.595**	0.219*	0.035	0.255**	0.190*
	8 月 August	-0.690**	-0.545**	-0.262**	-0.201*	0.115	0.074
叶绿素 <i>a</i> Chl- <i>a</i>	5 月 May	0.079	0.011	-0.073	0.144	-0.157	0.291**
	8 月 August	0.456**	0.495**	0.100	0.143	-0.153	-0.154

注: \*\*表示  $P < 0.01$ , \*表示  $P < 0.05$

Note: \*\*indicates  $P < 0.01$ , \*indicates  $P < 0.05$

### 4 结论

2018 年春、夏季莱州湾 DIN 的浓度变化范围为 1.64~106.36  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 24.18  $\mu\text{mol/L}$ , 5 月明显高于 8 月。 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 浓度变化范围为 0~2.010  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 0.182  $\mu\text{mol/L}$ , 8 月明显高于 5 月。 $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si

浓度变化范围为 0.97~78.93  $\mu\text{mol/L}$ , 平均值为 18.30  $\mu\text{mol/L}$ , 8 月明显高于 5 月。

2018 年莱州湾 N/P 值的范围为 9~2 446, 平均值为 261, 5 月明显高于 8 月; Si/N 值的范围为 0.02~31.3, 平均值为 2.30, 8 月明显高于 5 月; Si/P 值的变化范围为 4.09~2259, 平均值为 227, 8 月明显高于

5 月; DIN、 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 、N/P 高值区主要位于莱州湾西部的小清河口和黄河口附近海域;  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ 、Si/N、Si/P 高值区主要位于莱州湾底部、龙口-莱州近岸海域。

对营养盐结构的分析表明,莱州湾存在明显的磷限制和枯水期的硅限制;河流的陆源输入对莱州湾营养盐有较大贡献,且这种贡献在丰水期尤其明显。 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  和  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  是 5 月初级生产力的主要限制因子,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  是 8 月初级生产力的主要限制因子。

营养盐结构限制平面分布表明,春季莱州-招远养殖区和夏季东营-潍坊养殖区易引发赤潮,对相关海域海水养殖业造成一定的风险;夏季莱州-招远养殖区初级生产力受到一定限制,对该海域海水养殖业造成一定的影响。

## 参 考 文 献

- Department of Ecological Environment of Shandong Province. Bulletin on marine ecological environment of Shandong Province in 2018. Jinan: Department of Ecological Environment of Shandong Province, 2019 [山东省生态环境厅. 2018 年山东省海洋生态环境状况公报. 济南: 山东省生态环境厅, 2019]
- DU P P, WU X Q, DU X Y, *et al.* Situation evaluation on the marine spatial development and utilization in the Laizhou Bay. *Marine Science Bulletin*, 2017, 36(1): 19–26 [杜培培, 吴晓青, 都晓岩, 等. 莱州湾海域空间开发利用现状评价. *海洋通报*, 2017, 36(1): 19–26]
- GUO F, WANG B D, XIN M, *et al.* Nutrient distributions in the Laizhou Bay in spring and summer of 2015. *Advances in Marine Science*, 2017, 35(2): 258–266 [郭富, 王保栋, 辛明, 等. 2015 年春、夏季莱州湾营养盐分布特征. *海洋环境科学*, 2017, 35(2): 258–266]
- GUO W D, ZHANG X M, YANG Y P, *et al.* Potential eutrophication assessment for Chinese coastal waters. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1998, 17(1): 64–70 [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. *台湾海峡*, 1998, 17(1): 64–70]
- HUTCHINS D A, BRULAND K W. Iron-limited diatom growth and Si:N uptake ratios in a coastal upwelling regime. *Nature*, 1998, 339(6685): 561–564
- JIANG H C, WANG Y J, LI J H, *et al.* Annual variation and spatial distribution of nutrients in the Laizhou Bay. *Marine Science Bulletin*, 2018, 37(4): 411–423 [姜会超, 王玉珏, 李佳蕙, 等. 莱州湾营养盐空间分布特征及年际变化趋势. *海洋通报*, 2018, 37(4): 411–423]
- JIN X S, SHAN X J, LI X S, *et al.* Long-term changes in the fishery ecosystem structure of Laizhou Bay, China. *Science China Earth Sciences*, 2013, 56(3): 366–374
- JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Marine Pollution Bulletin*, 1995, 30(1): 41–46
- KANG Y Y, LIANG J R, GAO Y H, *et al.* Influence of N/P ratio on the growth and competition of two red tide algae. *Acta Oceanologica Sinica (in Chinese)*, 2006, 28(5): 117–122 [康燕玉, 梁君荣, 高亚辉, 等. 氮、磷比对两种赤潮藻生长特性的影响及藻间竞争作用. *海洋学报(中文版)*, 2006, 28(5): 117–122]
- LI L, ZANG J Y, LIU J, *et al.* Phosphate distribution, variation and its relationship with phytoplankton changes in the Qiantang River estuary. *Advances in Marine Science*, 2018, 36(2): 279–289 [李丽, 臧家业, 刘军, 等. 钱塘江口磷酸盐分布、变化与浮游植物的响应. *海洋科学进展*, 2018, 36(2): 279–289]
- LIU A Y, YU G L, HE J L, *et al.* Distribution and structure of nitrogen and phosphorus nutrients of 15 sea water culture areas in Shandong Province, 2016. *Ocean Development and Management*, 2017(s2): 130–137 [刘爱英, 于广磊, 何健龙, 等. 2016 年山东省 15 个海水增养殖区氮磷分布及其结构特征. *海洋开发与管理*, 2017(s2): 130–137]
- LIU H, FANG J G, DONG S L, *et al.* Annual variation of major nutrients and limiting factors in Laizhou Bay and Sanggou Bay. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2003, 10(3): 227–234 [刘慧, 方建光, 董双林, 等. 莱州湾和桑沟湾养殖海区主要营养盐的周年变动及限制因子. *中国水产科学*, 2003, 10(3): 227–234]
- LIU Y H, YANG X L, JIN Y, *et al.* Distribution and inter-annual variation of nutrients in Laizhou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2011, 32(4): 1–5 [刘义豪, 杨秀兰, 靳洋, 等. 莱州湾海域营养盐现状及年际变化规律. *渔业科学进展*, 2011, 32(4): 1–5]
- MA C H, SONG B H, YOU K. Research on Laizhou Bay's marine fishery industrial structure based on gray correlation analysis. *Chinese Fisheries Economics*, 2017, 35(2): 87–95 [马彩华, 宋百慧, 游奎. 基于灰色关联分析法的莱州湾海洋渔业产业结构研究. *中国渔业经济*, 2017, 35(2): 87–95]
- MI T Z, YU Z G, YAO Q Z, *et al.* Dissolved nutrient in the South of Laizhou Bay in spring. *Marine Environmental Science*, 2001, 20(3): 14–18 [米铁柱, 于志刚, 姚庆祯, 等. 春季莱州湾南部溶解态营养盐研究. *海洋环境科学*, 2001, 20(3): 14–18]
- NELSON D M, BREZEZINSKI M A. Kinetics of silicic acid uptake by natural diatom assemblages in two gulf stream warm core rings. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 62: 283–292
- 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. *Deep-Sea Research II*, 2010, 57: 1079–1091
- NUCCIO C, MELILLO C, MASSI L, *et al.* Phytoplankton abundance, community structure and diversity in the eutrophicated Orbetello lagoon (Tuscany) from 1995 to 2001. *Oceanologica Acta*, 2003, 26: 15–25



- PENG X C, YANG W D, LIU J S. Allelopathic effects in algal blooms. *Marine Sciences*, 2007, 31(2): 84–88 [彭喜春, 杨维东, 刘洁生. 赤潮期间藻类的化感效应. *海洋科学*, 2007, 31(2): 84–88]
- Shandong Environmental Protection Bureau. Notice concerning restrictions on the production and sale of phosphorous sashing goods. 2000-09-26 [山东省环境保护局. 关于限制生产和禁止销售使用含磷洗涤用品的通知. 2000-09-26]
- SUN P, LI R X, LI Y, *et al.* The net-phytoplankton community structure of the Bohai Sea in late summer, 2005. *Advances in Marine Science*, 2008, 26(3): 354–363 [孙萍, 李瑞香, 李艳, 等. 2005 年夏末渤海网采浮游植物群落结构. *海洋科学进展*, 2008, 26(3): 354–363]
- TANG Q S, JIN X S, WANG J, *et al.* Decadal-scale variations of ecosystem productivity and control mechanisms in the Bohai Sea. *Fisheries Oceanography*, 2003, 12(4/5): 223–233
- WANG X L, CUI Z G, LI K Q, *et al.* Study on the photochemical degradation of crude oil in aqueous solutions. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2008, 38(4): 619–622, 626 [王修林, 崔正国, 李克强, 等. 环渤海三省一市溶解态无机氮容量总量控制. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2008, 38(4): 619–622, 626]
- YAN X L, ZHAI W D, HONG H S, *et al.* Distribution, fluxes and decadal changes of nutrients in the Jiulong River estuary, Southwest Taiwan Strait. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 57(17): 1575–1587 [颜秀利, 翟惟东, 洪华生, 等. 九龙江口营养盐的分布、通量及其年代际变化. *科学通报*, 2012, 57(17): 1575–1587]
- YANG D F, ZHANG J, CHEN Y, *et al.* The uniqueness of nutrient limitation. *Marine Sciences*, 2001, 25(12): 49–51 [杨东方, 张经, 陈豫, 等. 营养盐限制的唯一性因子探究. *海洋科学*, 2001, 25(12): 49–51]
- YU Z G, MI T Z, XIE B D, *et al.* Changes of the environmental parameters and their relationship in recent twenty years in the Bohai Sea. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(1): 15–19 [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. *海洋环境科学*, 2000, 19(1): 15–19]
- YUHL L C. Nitrogen modulates phytoplankton growth in spring in the South China Sea. *Continental Shelf Research*, 2004, 24: 527–541
- ZHAO Y T, LIU X, LI J H, *et al.* Distribution and seasonal variation in nutrients in Laizhou Bay, 2013. *Advances in Marine Science*, 2016, 35(1): 95–99 [赵玉庭, 刘霞, 李佳蕙, 等. 2013 年莱州湾海域营养盐的平面分布及季节变化规律. *海洋环境科学*, 2016, 35(1): 95–99]
- ZHANG J F, GAO X L, LI P M, *et al.* Nutrient distribution characteristics and long-term trends in the southwest of the Laizhou Bay and its adjacent rivers. *Marine Science Bulletin*, 2015, 34(2): 222–232 [张锦峰, 高学鲁, 李培苗, 等. 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. *海洋通报*, 2015, 34(2): 222–232]

(编辑 陈 严)

## Characteristics of Nutrient Structures and Limitations in Laizhou Bay in the Spring and Summer of 2018

YOU Liping<sup>#</sup>, ZHAO Yuting<sup>#</sup>, SUN Shan<sup>①</sup>, SU Bo, MA Yuanqing,  
WANG Liming, QI Yanmin, LI Jiahui, DONG Xiaoxiao  
(Shandong Marine Resource and Environment Research Institute,  
Shandong Key Lab of Marine Ecological Restoration, Yantai Shandong 264006, China)

**Abstract** Based on field data of nutrients observed in Laizhou Bay during May and August 2018, using the methods of nutrient restriction and potential eutrophication assessment standards, the distribution characteristics of nitrogen, phosphorus, and silicate in the Laizhou Bay were analyzed and discussed. The results showed that the concentrations of DIN ranged from 1.64  $\mu\text{mol/L}$  to 106.36  $\mu\text{mol/L}$  with an average content of 24.18  $\mu\text{mol/L}$  and were significantly higher in May. The concentrations of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  ranged from “not detected” to 2.010  $\mu\text{mol/L}$  with an average content of 0.182  $\mu\text{mol/L}$ , and were significantly higher in August. The concentrations of  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  ranged from 0.97  $\mu\text{mol/L}$  to 78.93  $\mu\text{mol/L}$  with an average content of 18.30  $\mu\text{mol/L}$  and were also significantly higher in August. The areas with higher values for DIN,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ , and N/P ratio were mainly located within the sea area near the Xiaoqing River and Yellow River estuaries in the west of Laizhou Bay. The areas with higher values for  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ , Si/N ratio, and Si/P ratio were mainly located at the bottom of Laizhou Bay and near the coast of Longkou-Laizhou. The nutrient structure analysis indicated that availability of  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  was limited in May and August while that of  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  was limited in May. The spatial distribution of nutrients in the Laizhou Bay was mainly influenced by the terrestrial inputs, especially during periods of high water levels. This observation aligns with the higher nutrient content of the Xiaoqing River and Yellow River estuaries.  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  were the main limiting factors of primary productivity in May, while DIN and  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  were the main limiting factors of primary productivity in August. The horizontal distribution of nutrient structure restriction indicated that it was easy to cause red tide in Laizhou-Zhaoyuan culture area in spring and Dongying-Weifang culture area in summer. The limited primary productivity in the Laizhou-Zhaoyuan area during summer could substantially influence the aquaculture in this area.

**Key words** Laizhou Bay; Inorganic nitrogen; Phosphorus; Silicate; Characteristics of nutrient structures; Limitation

① Corresponding author: SUN Shan, E-mail: sunsan18@163.com