

文章编号: 1004 - 2490(2021)04 - 0473 - 12

# 渤海中部冬夏季叶绿素 a 和营养盐结构 影响因素对比分析

王丽莎<sup>1</sup>, 魏西会<sup>2</sup>, 张海波<sup>3</sup>, 李春川<sup>4</sup>, 唐洪杰<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学化学化工学院, 山东青岛 266100; 2. 青岛市生态环境局城阳分局, 山东青岛 266109;  
3. 国家海洋环境监测中心, 辽宁大连 116023; 4. 中国海洋大学海洋高等研究院, 山东青岛 266100)

**摘要:** 根据 2016 年 1 月(冬季)和 6 月(夏季)渤海中部叶绿素 a(Chl a)、营养盐等数据,对 Chl a 和营养盐的季节特征、影响因素及趋势变化进行分析,结果表明,Chl a 和营养盐呈现明显的季节变化特征( $P < 0.01$ )。冬季受洋流输入、扰动再悬浮及矿化释放等因素影响, DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 含量分别为  $(10.51 \pm 4.52) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.28 \pm 0.14) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(10.63 \pm 2.09) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其中 DIN 主要组分为  $\text{NO}_3^-$ -N(92%), 除部分站位呈现磷潜在限制外,氮硅营养盐限制状况不明显。Chl a 含量较低为  $(0.99 \pm 0.25) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 主要受温度限制( $T < 8^\circ\text{C}$ )。夏季受径流输入、北黄海水交换以及吸收利用等因素影响, DIN、 $\text{PO}_4^{3-}$ -P 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 含量分别为  $(4.72 \pm 4.2) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $(0.04 \pm 0.04) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(3.81 \pm 1.72) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 较冬季分别降低 55.0%、85.7% 和 64.1%, 其中 DIN 以  $\text{NH}_4^{+}$ -N(48%) 和  $\text{NO}_3^-$ -N(45%) 为主。营养盐呈现明显的 P 限制,且部分站位 DIN 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 含量低于阈值,不利于浮游植物的生长。Chl a 含量达  $(4.58 \pm 5.51) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 为冬季的 4.6 倍。在黄河口和莱州湾外高营养盐海域, Chl a 含量高达  $10 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 存在爆发藻华的风险。

**关键词:** 渤海; 叶绿素 a; 营养盐结构; 浮游植物群落; 变化趋势

**中图分类号:** X 55      **文献标志码:** A

海洋中叶绿素 a (Chl a) 是浮游植物体内的主要光合作用色素,其含量可指示海域内浮游植物的生物量和固碳能力,是海洋生态系统中食物网和能量流动的基础,对海洋渔业资源状况和全球气候变化起着重要作用<sup>[1]</sup>。营养盐作为浮游植物繁殖生长所必须的基础物质,其含量和组成比例等影响浮游植物的生长繁殖及群落结构稳定<sup>[2]</sup>。当水体营养盐过剩时,可能会引发赤潮、绿潮等生态灾害<sup>[3]</sup>,进而影响海洋渔业资源<sup>[4]</sup>。近岸海域承载着密集的人口和经济快速发展带来的生态压力,其生态系统稳定性与城市环境变化相互影响<sup>[5]</sup>。受人类活动和陆源输入的影响,

近岸海域浮游植物群落结构易发生转变<sup>[6-8]</sup>,因此关注近海营养盐状况以及浮游植物变化对了解海域生态系统稳定具有重要意义。

渤海是我国的封闭性浅水内海,平均水深约 18 m,主要由辽东湾、渤海湾、莱州湾和中央海区 4 个海区组成,是北方重要的渔业资源产卵场、索饵场和栖息地,具有较高的生态价值。渤海东部通过渤海海峡“北进南出”与北黄海进行水体交换,但其水流小,水交换缓慢。环渤海 40 余条入海径流每年裹挟大量的营养物质进入渤海,近年来受环渤海经济快速发展以及流域内建坝截流等活动的影响,入海径流量减少,硅输入减少<sup>[9]</sup>。

**收稿日期:** 2020 - 11 - 25

**基金项目:** 博士科研启动基金(2021-Z-303);国家重点研发计划课题(2019YFD0901104);国家自然科学基金(41976222,41306175)

**作者简介:** 王丽莎(1981—),女,山东威海人,高级实验师,研究方向为海洋环境化学。E-mail:lishawang@ouc.edu.cn

**通信作者:** 唐洪杰,副教授。E-mail:thjie@ouc.edu.cn

海域内营养盐组成结构发生明显变化(N/P 比值升高, Si/N 比值下降), 近岸富营养化严重, 赤潮频发<sup>[10-11]</sup>, 浮游植物群落由硅藻占绝对优势向非硅藻群落演替<sup>[12-13]</sup>。本文对比冬、夏季节叶绿素 a 和营养盐组成的时空特征, 以期了解渤海营养盐含量及组成变化对生态环境的影响提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 调查区域

分别于2016年1月(冬季)和6月(夏季)对渤海海域进行调查, 受寒潮结冰影响<sup>[14]</sup>, 两次调查范围略有不同, 因此选择相同的海域范围(图1多边形内)比较冬、夏季节间差异。现场使用CTD-Niskin 联用(SeaBird 911plus CTD 与 12 L Niskin 采水器联用, 美国)采集表层、10 m 层(中层)和底层水样, 并测定温度、盐度等参数。

### 1.2 样品采集与分析

水样经 GF/F(Whatman, 450 °C 灼烧 4 h)滤膜过滤, 滤膜和滤液冷冻(-20 °C)保存, 分别用于测定叶绿素 a 和营养盐。滤膜用 90% 丙酮萃取, 分光光度法(岛津 UV-2550, 日本)测定吸光值并计算叶绿素 a 的含量<sup>[15]</sup>。水样使用营养盐分析仪(SEAL-AA3, 德国)按照海洋调查规范方法(GB/T 12763.4-2007)测定各营养盐组分, 其中 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 采用重氮-偶氮法, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用铜-镉还

原法, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用水杨酸钠法, PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 使用磷钼蓝法, SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si 以硅钼蓝法测定。NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P 和 SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>-Si 检出限分别为 0.05、0.02、0.04、0.02 和 0.03 μmol · L<sup>-1</sup>。溶解无机氮(DIN)为 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 3 组分加和。海水中总悬浮颗粒物(total suspended particulate, TSP)使用 0.45 μm 孔径醋酸纤维滤膜过滤, 重量法测定<sup>[16]</sup>。

### 1.3 浮游植物生长的营养盐限制评价方法

浮游植物按照一定比例吸收利用营养盐<sup>[17]</sup>, 其含量和组成比例变化会对浮游植物生长及群落结构产生影响。本文采用水体中氮、磷、硅营养盐的含量及其摩尔比值判断营养盐对浮游植物生长的限制状况。首先根据浮游植物对营养盐需求的阈值<sup>[18-19]</sup>和营养盐组成比例<sup>[20-21]</sup>作为标准, 评价营养盐的限制状况(表1)。

## 2 结果与讨论

### 2.1 营养盐时空分布特征

冬季海水温度低(表2, T < 8 °C), 光照强度弱, 浮游植物对营养盐的吸收利用较少。营养盐分布主要受扰动再悬浮、矿化释放以及北黄海洋流输入的影响<sup>[22]</sup>。DIN 含量为 2.07 ~ 19.51 μmol · L<sup>-1</sup>, 平均值为 (10.51 ± 4.52) μmol · L<sup>-1</sup>, 由图 2-A ~ C 可以看出, DIN 分布呈现由黄河口向中部海区逐渐递减的趋势。各水层 DIN 含量不同, 受再悬浮影响, 底层含量最高,

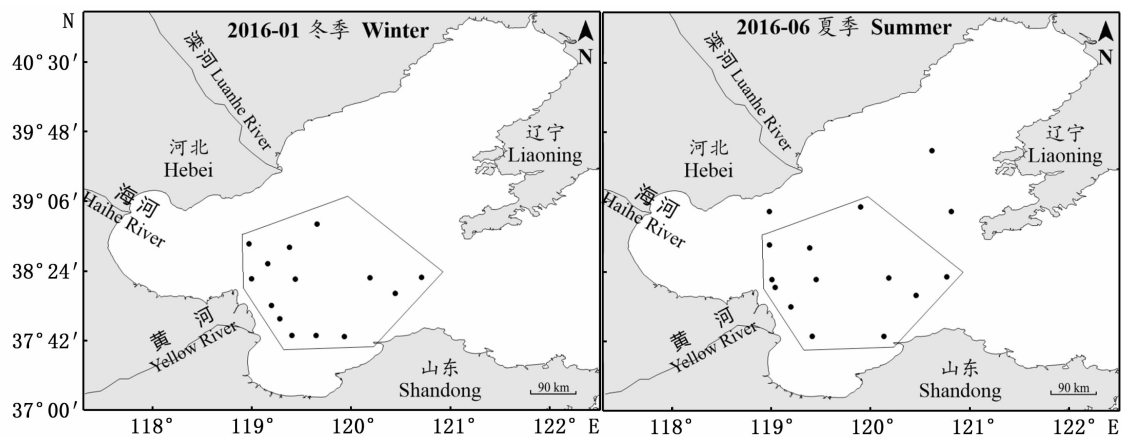


图1 渤海研究区域冬季和夏季站位分布

Fig. 1 Sampling stations in winter and summer in the Bohai Sea

注: 多边形区域为冬夏季对比范围

Note: The polygonal fields are the comparison regions between winter and summer

其次为表层,中层含量最低。DIN 组分特征表现为以  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为主(91%),其次为  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ,各站点 DIN 含量均高于阈值,不存在 N 限制状况。调查海域  $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  平均值为  $(0.28 \pm 0.14) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,其分布受颗粒物吸附沉降,北黄海输入等因素<sup>[23]</sup>影响,呈现近岸低、中部和渤海海峡处高的分布特征(图 2-D ~ F)。 $\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$  垂向分布

同 DIN 相似,底层含量最高。研究海区  $\text{SiO}_3^{2-} \text{-Si}$  平均浓度为  $(10.63 \pm 2.09) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,受黄河输入影响  $\text{SiO}_3^{2-} \text{-Si}$  分布从河口向中部海区逐渐递减(图 2-G ~ I)。黄河口和莱州湾外近岸和中部为高 N/P 和 Si/P 比值区域,比值大于 P 潜在限制标准 22,呈现明显的 P 潜在限制。

表 1 营养盐限制评价标准  
Tab.1 Standards of evaluating nutrient limitation

限制等级 Limited level	评价标准(阈值) Standard(threshold values)	限制等级 Limited level	评价标准(原子比值) Standard(nutrient ratios)
N 绝对限制 Nitrogen threshold limitations	$\text{DIN} < 1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	N 潜在限制 Nitrogen potential limitations	$\text{N/P} < 10, \text{Si/DIN} > 1$
P 绝对限制 Phosphorus threshold limitations	$\text{P} < 0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	P 潜在限制 Phosphorus potential limitations	$\text{N/P} > 22, \text{Si/P} > 22$
Si 绝对限制 Silicon threshold limitations	$\text{Si} < 2 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (硅藻)	Si 潜在限制 Silicon potential limitations	$\text{Si/P} < 10,$ $\text{Si/DIN} < 1$

表 2 调查海域冬夏季不同水层叶绿素 a 及环境参数特征

Tab.2 Chlorophyll-a, nutrients and hydrological parameters in the same study area of the central Bohai Sea

参数 Parameter	2016-01				2016-06			
	表层 Surface layer	10 m 10m layer	底层 Bottom layer	平均 Mean	表层 Surface layer	10 m 10m layer	底层 Bottom layer	平均 Mean
Chl a / $(\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})$	$0.98 \pm 0.29$	$0.98 \pm 0.24$	$1.01 \pm 0.25$	$0.99 \pm 0.25$	$6.11 \pm 7.84$	$4.36 \pm 5.38$	$3.28 \pm 1.27$	$4.58 \pm 5.51$
T/°C	$3.79 \pm 1.65$	$4.81 \pm 1.48$	$6.04 \pm 1.47$	$4.88 \pm 1.76$	$22.32 \pm 1.92$	$21.91 \pm 1.99$	$22.05 \pm 1.87$	$22.10 \pm 1.88$
S	/	/	/	/	$31.45 \pm 0.46$	$31.61 \pm 0.47$	$31.61 \pm 0.46$	$31.56 \pm 0.45$
TSP / $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$92.30 \pm 101.60$	$114.40 \pm 118.60$	$105.80 \pm 111.30$	$104.10 \pm 108.30$	$21.78 \pm 9.51$	$22.12 \pm 9.46$	$24.84 \pm 12.85$	$22.80 \pm 10.34$
DIN/ $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$10.63 \pm 4.59$	$9.76 \pm 4.22$	$11.19 \pm 4.99$	$10.51 \pm 4.52$	$3.90 \pm 4.59$	$5.24 \pm 4.43$	$5.02 \pm 3.78$	$4.72 \pm 4.20$
$\text{PO}_4^{3-} \text{-P}$ / $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$0.28 \pm 0.15$	$0.25 \pm 0.14$	$0.31 \pm 0.14$	$0.28 \pm 0.14$	$0.03 \pm 0.03$	$0.04 \pm 0.03$	$0.05 \pm 0.05$	$0.04 \pm 0.04$
$\text{SiO}_3^{2-} \text{-Si}$ / $(\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$10.44 \pm 2.44$	$10.49 \pm 1.90$	$10.98 \pm 2.02$	$10.63 \pm 2.09$	$3.77 \pm 1.29$	$3.97 \pm 1.95$	$3.70 \pm 1.98$	$3.81 \pm 1.72$
N/P	$70.00 \pm 86.90$	$80.80 \pm 106.60$	$56.00 \pm 65.60$	$69.30 \pm 86.80$	$215.65 \pm 232.02$	$262.33 \pm 274.58$	$344.60 \pm 451.57$	$274.19 \pm 328.06$
Si/P	$65.80 \pm 75.10$	$74.90 \pm 80.00$	$51.80 \pm 49.50$	$64.50 \pm 68.80$	$223.39 \pm 165.72$	$209.31 \pm 218.03$	$173.83 \pm 170.44$	$202.18 \pm 182.07$
Si/N	$1.10 \pm 0.40$	$1.20 \pm 0.50$	$1.10 \pm 0.50$	$1.20 \pm 0.50$	$2.05 \pm 1.25$	$1.10 \pm 0.65$	$1.02 \pm 0.67$	$1.39 \pm 1.00$
N 限制 n (绝对,潜在) N limitation n (threshold, potential)	14(0, 0)	14(0, 0)	14(0, 0)		15(4,0)	15(0,0)	15(0,0)	
P 限制 n (绝对,潜在) P limitation n (threshold, potential)	14(0, 7)	14(0, 8)	14(0, 7)		15(11,0)	15(9,4)	15(9,3)	
Si 限制 n (绝对,潜在) Si limitation n (threshold, potential)	14(0, 0)	14(0, 0)	14(0, 0)		15(2,0)	15(2,0)	15(3,0)	

注:Chl a,叶绿素 a; TSP,总悬浮颗粒物;n,水样数目;冬季盐度(S)受寒潮结冰影响,未获得实时数据

Note: Chl a, chlorophyll a; TSP, total suspended particulate; n: number of water samples; the real-time salinity (S) data in the winter is unavailable for the frozen seawater

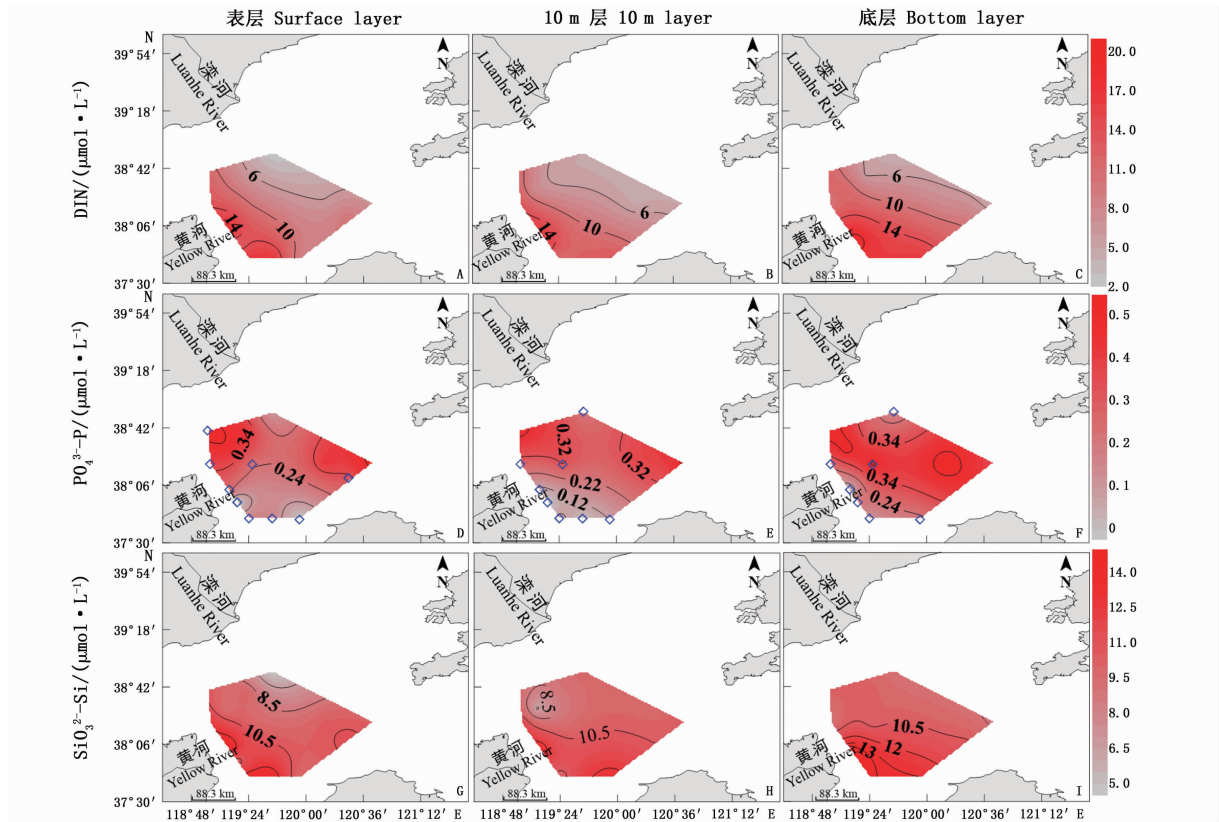


图2 冬季调查海域各水层营养盐含量及限制状况分布

Fig. 2 Horizontal distribution of nutrient concentrations and limitations in winter in the study area

注: ◇表示潜在限制的站点

Note: ◇ means potential limitation station

夏季温度(表2,  $T > 20^{\circ}\text{C}$ )和光照适宜浮游植物生长,水体中浮游植物含量多且具有较强的新陈代谢活动,其吸收利用较多的营养盐。受陆源输入影响<sup>[24]</sup>,DIN在黄河口以及莱州湾外呈现明显的高值区(图3-A~C),最高值达  $15.96 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ (图4-D),在北部和渤海海峡处呈现低值,其主要组分为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ (48%)和  $\text{NO}_3^--\text{N}$ (45%)。受生物吸收利用影响,表层DIN含量最低,平均值为  $(3.90 \pm 4.59) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,且东部海域部分站点含量低于阈值图(4-D,图3-A),该海域浮游植物的生长受氮元素限制。 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 受“磷负荷削减”影响,陆源输入减少,同时受黄河口外近岸区域高生物量的浮游植物对磷吸收转化、悬浮颗粒物的吸附作用以及北黄海冷流<sup>[25]</sup>输入影响,调查区域  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 浓度呈由黄河口及近岸海域向渤海中部和渤海海峡逐渐升高的趋势(图3-D~F)。 $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 垂向分布从表层向底层逐渐增加,在近岸和中部海域较多站点含量低于

阈值( $0.03 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )(图3-D~F),呈现明显的磷限制。 $\text{SiO}_3^{2-}-\text{Si}$ 平均含量为  $(3.81 \pm 1.72) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,在黄河口外呈现高值(图3-G~I),受生物吸收利用影响, $\text{SiO}_3^{2-}-\text{Si}$ 在莱州湾湾口和海峡处部分站点含量低于阈值(图4-F,图3-G~I),不利于渤海优势藻种硅藻<sup>[6]</sup>的生长。

对比冬、夏季营养盐结构发现(表2,图4),夏季浮游植物具有较强的光合作用,且对营养盐的吸收转化率高,营养盐各组分含量较冬季均明显降低。夏季DIN浓度平均值为  $(4.72 \pm 4.2) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,较冬季降低55.0%;  $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$ 平均浓度为  $(0.04 \pm 0.04) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,较冬季降低85.7%;  $\text{SiO}_3^{2-}-\text{Si}$ 平均含量为  $(3.81 \pm 1.72) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,较冬季下降64.2%。冬、夏两季DIN主要组分不同,冬季DIN主要组分为  $\text{NO}_3^--\text{N}$ ,而夏季为  $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 和  $\text{NO}_3^--\text{N}$ 。此外,冬、夏季营养盐对浮游植物生长影响不同,冬季营养盐对浮游植物生长不存在N限制,但在黄河口和莱州湾外

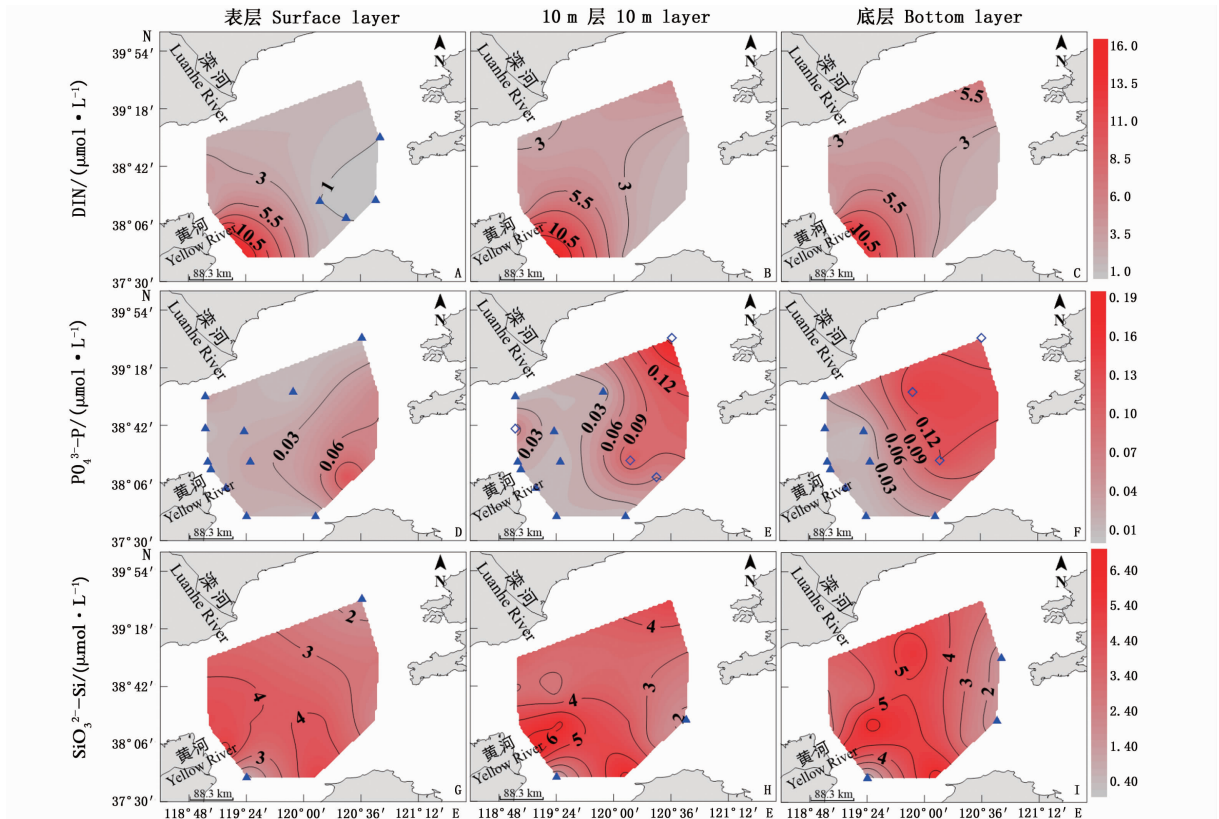


图 3 夏季调查海域各水层营养盐含量及限制状况分布

Fig. 3 Horizontal distribution of nutrient concentrations and limitations in summer in the study area

注: ▲表示绝对限制的站点; ◇表示潜在限制的站点

Note: ▲ indicates threshold limitation station; ◇ indicates potential limitation station

近海存在明显的 P 潜在限制;而夏季部分站位存在 N 限制(东部海域表层水体)以及明显的 P 限制(渤海海峡以东海域)。

### 2.2 冬夏季叶绿素分布特征及影响因素分析

冬季受温度 ( $T < 8^{\circ}\text{C}$ )、光照等因素影响,浮游植物生长繁殖受到抑制,Chl a 含量为  $0.54 \sim 1.37 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均  $(0.99 \pm 0.25) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,高值区在黄河口外海域(图 5-A ~ C),受混合影响垂向差异较小(表 2)。夏季水温 ( $T > 20^{\circ}\text{C}$ )及光照条件适宜,浮游植物快速繁殖生长,Chl a 含量为  $(4.58 \pm 5.51) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (表 2),是冬季 Chl a 含量的 4.6 倍,变化明显 ( $P < 0.01$ ),其高值区与黄河口和莱州湾外高 DIN 和  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  含量区域基本一致(图 5-D,图 3-A, G),高值区 Chl a 含量高于  $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,存在发生赤潮的风险<sup>[26]</sup>。

### 2.3 渤海海域营养盐以及浮游植物群落变化趋势研究

对比渤海中部 2016 年冬、夏季叶绿素含量和营养盐结构发现(表 2):冬季浮游植物生长受限<sup>[7, 27]</sup>,Chl a 平均含量较低,营养盐消耗较少且受有机物矿化分解影响,水体营养盐含量较高(表 2)。N/P 和 Si/P 平均值分别为  $69.30 \pm 86.80$  和  $64.50 \pm 68.80$ ,呈现明显的 P 潜在限制,而氮、硅含量较高,不存在限制的状况。夏季浮游植物生长旺盛,消耗大量营养盐,叶绿素 Chl a 平均含量较高,各营养盐含量较冬季均明显降低。受浮游植物“过度消费”吸收储存影响,表层  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  平均含量仅  $(0.03 \pm 0.03) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , N/P 和 Si/P 平均值分别达到  $274.19 \pm 328.06$  和  $202.18 \pm 182.07$ ,P 限制明显。在海峡口表层和莱州湾外部分站位 DIN 和 Si 含量低于阈值,限制浮游植物尤其是硅藻的生长繁殖。

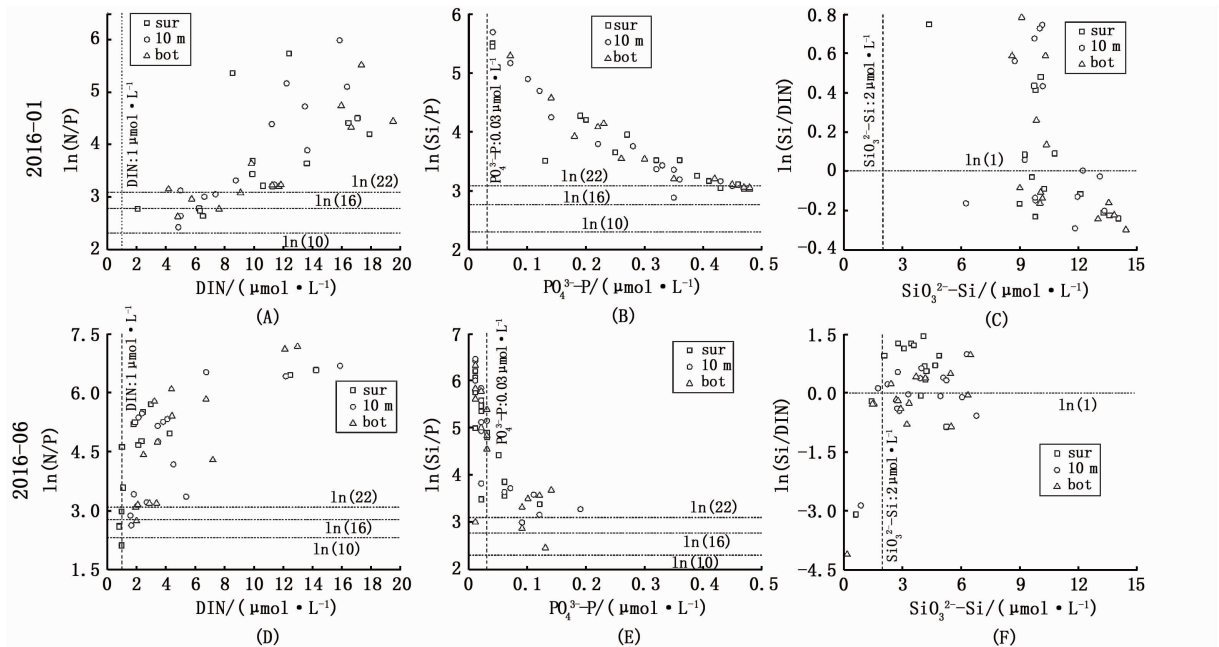


图4 调查海域冬夏季各水层营养盐含量及结构变化特征

Fig.4 Spatial and seasonal variations of nutrients and nutrient structure in the study area

注:竖虚线为绝对限制阈值,横虚线为潜在限制原子比值。sur:表层;10 m:10 m层; bot: 底层

Note: Vertical dotted lines represent threshold values of threshold limitations, horizontal dotted lines represent atomic ratios of potential limitations. sur: surface layer; 10 m:10 m layer; bot: bottom layer

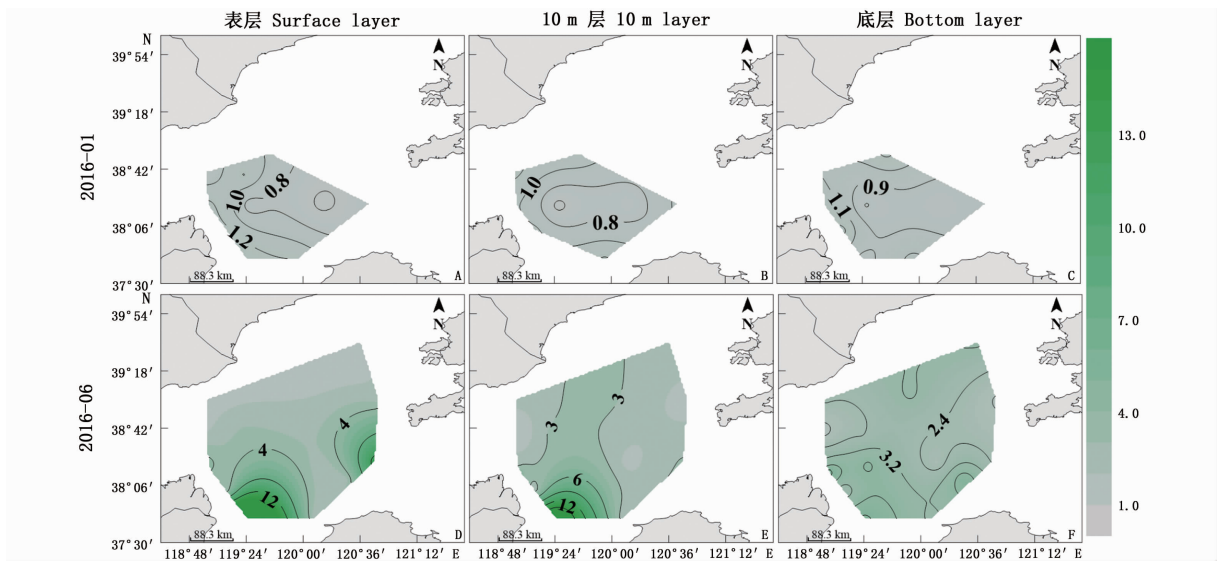


图5 冬夏季调查海域各水层叶绿素 a 分布特征 ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )

Fig.5 Horizontal and seasonal distribution characteristics of Chl a in the study area

对比长时间尺度下渤海各海区营养盐浓度及组成、叶绿素水平以及浮游植物群落结构(表2~表5)发现,受人类活动影响,氮、磷、硅输入量差异较大<sup>[30]</sup>,各海区中辽东湾和莱州湾营养盐来源丰富,含量较高,其次为渤海湾和渤海中部海

域<sup>[28-40]</sup>。近几十年来建坝截流等人类活动使得渤海中部海域硅、磷输入量相对减少,营养盐比例失衡(偏离 Redfield 比值),虽然水体中 Chl a 含量没有明显的变化,但群落结构由硅藻占绝对优势向硅藻-甲藻共存的趋势发展,这种变化趋势

也是对近岸氮元素超标引起甲藻赤潮发展特征的一个佐证<sup>[41-48]</sup>。比较发现,春、夏季生产力水平高,各营养盐被快速吸收、储存、利用,尤其是对磷的“奢侈吸收”,致使 N/P 和 Si/P 比值明显高于秋、冬季节。秋、冬季节细胞丰度减少,浮游

植物对营养盐吸收利用减少,同时受有机物矿化分解以及沉积物扰动释放的影响,各营养盐含量较春、夏季明显升高,营养盐组成结构更趋近于 Redfield 比值。

表 3 渤海内不同海域营养盐状况比较

Tab. 3 Comparison of nutrient structure in different areas of the Bohai Sea

海域 Area	时间 Date	月份 Month	水层 Layer	DIN /( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ /( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	$\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ /( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	N/P	Si/P	Si/N	数据来源 Data source
	2002	8	全部水层	4.66	0.24	8.18	19.40	34.10	1.75	郭全 <sup>[28]</sup>
	2012	5	全部水层	2.32~9.05	ND~0.25	0.12~8.36	25.00~1287.00	4.30~263.00	0.03~1.34	刘丽雪等 <sup>[29]</sup>
渤海中部 Central Bohai Sea	2013	7	全部水层	10.33	0.07	3.94	147.60	56.30	0.40	张海波等 <sup>[30]</sup>
	2013	11	全部水层	16.44	0.54	16.94	30.40	31.40	1.00	张海波等 <sup>[30]</sup>
	2015	4	表层	9.92	0.70	6.56	14.40	10.08	0.91	YAN 等 <sup>[31]</sup>
	2015	6	表层	9.71	0.33	4.03	30.09	12.57	0.51	YAN 等 <sup>[31]</sup>
	2015	8 (降水)	表层	7.90	0.50	6.00	19.80	13.90	0.90	PAN 等 <sup>[32]</sup>
	2015	10	表层	9.90	0.30	4.20	47.47	17.50	0.40	PAN 等 <sup>[32]</sup>
	2018	4	全部水层	7.10	0.50	5.90	13.50	12.10	0.90	ZHENG 等 <sup>[33]</sup>
	渤海湾 Bohai Bay	2002	8	全部水层	12.32	0.26	1.18	47.40	4.50	0.10
	2011	5	表层	24.80	0.45	9.35	55.10	20.80	0.40	李桂菊等 <sup>[35]</sup>
	2016	6	全部水层	7.57	0.07	5.45	108.10	77.90	0.70	张海波等 <sup>[36]</sup>
辽东湾 Liaodong Bay	2007	5	表层	37.00	0.57	21.00	64.90	36.80	0.60	吴金浩等 <sup>[37]</sup>
	2013	10	表层	27.56	1.18	6.13	24.83	6.70	0.27	PEI 等 <sup>[38]</sup>
莱州湾 Laizhou Bay	2001	5	全部水层	12.42	0.10	3.32	124.20	33.20	0.30	孙丕喜等 <sup>[39]</sup>
	2017	8	表层	24.32	0.17	19.39	143.10	114.10	0.79	张欣泉等 <sup>[40]</sup>

注:ND 表示未检出  
Note: ND indicates not detected

表 4 不同时间渤海中部浮游植物群落结构比较

Tab. 4 Comparison of phytoplankton community structure in the central Bohai Sea in different time

时间 Date	优势浮游植物 Dominant species	细胞丰度 /( $10^4 \text{个} \cdot \text{m}^{-3}$ ) Cell abundance	来源 Data source
1998.09	硅藻(78%)	160.86	孙军等 <sup>[43]</sup>
2001.01	硅藻(86.9%)	628.85	孙军等 <sup>[7]</sup>
2013.05		200.14	孙雪梅等 <sup>[41]</sup>
2013.07	硅藻向硅-甲	16.32	孙雪梅等 <sup>[41]</sup>
2013.11	藻联合趋势	7.43	孙雪梅等 <sup>[41]</sup>
2013.12		12.77	孙雪梅等 <sup>[41]</sup>
2014.05	硅藻(圆筛藻属)	25.47 (渤海)	张雪等 <sup>[46]</sup>
2014.10	硅藻(角毛藻属)	13.88 (渤海)	张雪等 <sup>[46]</sup>
2015.06	硅藻(44%)- 甲藻(48%)	1 165	郑耀洋 <sup>[48]</sup>
2015.08	硅藻(37%)- 甲藻(52%)	1 414	郑耀洋 <sup>[48]</sup>
2015.10	硅藻(74%)- 甲藻(24%)	3 679	郑耀洋 <sup>[48]</sup>

表 5 不同时间渤海中部叶绿素 a 影响因素比较

Tab. 5 Comparison of chlorophyll-a and main influence factor in the central Bohai Sea in different time

时间 Date	Chl a /( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	影响因素 Influence factor	来源 Data source
1997.05	0.71		宁修仁等 <sup>[8]</sup>
1998.09	1.89	光照、营养盐	孙军等 <sup>[44]</sup>
1999.04	1.62		孙军等 <sup>[44]</sup>
2000.08	0.96	摄食	赵骞等 <sup>[45]</sup>
2001.01	1.15	摄食	赵骞等 <sup>[45]</sup>
2002.08	1.53		郭全等 <sup>[28]</sup>
2012.05	0.63~3.75		刘丽雪等 <sup>[29]</sup>
2013.07	3.05	磷-温度	张莹 <sup>[47]</sup>
2015.06	0.26		郑耀洋 <sup>[48]</sup>
2015.08	0.46	磷-温度	郑耀洋 <sup>[48]</sup>
2015.10	1.10		郑耀洋 <sup>[48]</sup>

### 3 小结

冬季营养盐含量高, DIN 以  $\text{NO}_3^-$ -N 为主。N/P 和 Si/P 值较高, 呈现明显的 P 潜在限制。浮游植物主要受低温限制, Chl a 平均含量为  $(0.99 \pm 0.25) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

夏季 Chl a 平均含量为  $(4.58 \pm 5.51) \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 明显高于冬季, 且高值区集中在黄河口及莱州湾外高 DIN 和  $\text{SiO}_3^{2-}$ -Si 海域。受吸收利用影响, 各营养盐含量较冬季明显降低, 且在中西部海域呈现明显的 P 限制。

#### 参考文献:

- [1] CHASSOT E, BONHOMMEAU S, DULVY N K, *et al.* Global marine primary production constrains fisheries catches [J]. *Ecology Letters*, 2010, 13 (4): 495–505.
- [2] SMITH V H. Responses of estuarine and coastal marine phytoplankton to nitrogen and phosphorus enrichment [J]. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 377–384.
- [3] ANDERSON D M, CEMBELLA A D, HALLEGRAEFF G M. Progress in understanding harmful algal blooms: Paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2012, 4: 143–176.
- [4] 李大鹏, 张 硕, 黄 宏. 海州湾海洋牧场的长期环境效应研究 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38 (1): 303–310.
- LI D P, ZHANG S, HUANG H. Study on long-term environmental effects of marine ranching in Haizhou Bay [J]. *China Environmental Sciences*, 2018, 38 (1): 303–310.
- [5] BERNARDT J R, LESLIE H M. Resilience to climate change in coastal marine ecosystems [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2013, 5 (1): 371–392.
- [6] 杨世民, 董树刚, 李 锋, 等. 渤海湾海域生态环境的研究 I. 浮游植物种类组成和数量变化 [J]. *海洋环境科学*, 2007, 26(5): 442–445.
- YANG S M, DONG S G, LI F, *et al.* Study on ecological environment in Bohai Bay I. Species composition and abundance of phytoplankton [J]. *Marine Environmental Science*, 2007, 26(5): 442–445.
- [7] 孙 军, 刘东艳, 白 洁, 等. 2001 年冬季渤海的浮游植物群落结构特征 [J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2004, 34(3): 413–422.
- SUN J, LIU D Y, BAI J, *et al.* Phytoplankton community of the Bohai Sea in winter 2001 [J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2004, 34(3): 413–422.
- [8] 宁修仁, 刘子琳, 蔡昱明, 等. 渤海晚春浮游植物粒度分级生物量与初级生产力 [J]. *海洋科学集刊*, 2002(00): 30–41.
- NING X R, LIU Z L, CAI Y M, *et al.* Size-fractionated phytoplankton standing stock and primary production in Bohai Sea during late spring [J]. *Collections of Marine Science*, 2002(00): 30–41.
- [9] 陈沛沛, 刘素美, 张桂玲, 等. 黄河下游营养盐浓度、入海通量月变化及“人造洪峰”的影响 [J]. *海洋学报*, 2013, 35(2): 59–71.
- CHEN P, LIU S M, ZHANG G L, *et al.* Monthly variation of nutrient concentrations and fluxes in the lower Huanghe River; Under the influence of artificial floods [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2013, 35 (2): 59–71.
- [10] 宋南奇, 王 诺, 吴 暖, 等. 基于 GIS 的我国渤海 1952—2016 年赤潮时空分布 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(3): 1142–1148.
- SONG N Q, WANG N, WU N, *et al.* Temporal and spatial distribution of harmful algal blooms in the Bohai Sea during 1952—2016 based on GIS [J]. *China Environmental Sciences*, 2018, 38(3): 1142–1148.
- [11] NING X R, LIN C L, SU J, *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): 1079–1091.
- [12] RIEGMAN R, BOER M D, DOMIS L D S. Growth of harmful marine algae in multispecies cultures [J]. *Journal of Plankton Research*, 1996, 18(10): 1851–1866.
- [13] EGGE J K. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? [J]. *Journal of Marine Systems*, 1998, 16(3): 191–198.
- [14] 自然资源部北海局北海区海洋灾害公报 [R/OL]. 2016, <http://ncs.mnr.gov.cn/n1/upload/180207171729424158/180207172142394444.PDF>. Department of Natural Resources the North Sea Bureau bulletin on marine hazards in the North Sea [R]. 2016, <http://ncs.mnr.gov.cn/n1/upload/>



- 180207171729424158/180207172142394444. PDF.
- [15] JEFFREY S W, HUMPHREY G F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c 1 and c 2 in higher plants, algae and natural phytoplankton[J]. *Biochemie Und Physiologie Der Pflanzen*, 1975, 167(2): 191 - 194.
- [16] GRASSHOFF K, KREMLING K, EHRHARDT M. *Methods of seawater analysis*. [M]. third edition. Weinheim: Wiley-VCH, 2007:229 - 251.
- [17] REDFIELD A C. The influence of organisms on the composition of sea-water[J]. *Sea*, 1963, 40(6): 640 - 644.
- [18] LAWS E A, PEI S, BIENFANG P. Phosphate-limited growth of the marine diatom *Thalassiosira weissflogii* (Bacillariophyceae): Evidence of non-monod growth kinetics [J]. *Journal of Phycology*, 2013, 49(2): 241 - 247.
- [19] 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*, 1990, 62(3): 283 - 292.
- [20] JUSTIC D, RABALAIS N N, TURNER R E, *et al.* Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stechiometric nutrient balance and its consequences [J]. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 1995, 40(3): 339 - 356.
- [21] DORTCH Q, WHITLEDGE T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? [J]. *Continental Shelf Research*, 1992, 12(11): 1293 - 1309.
- [22] 姜胜辉,王楠,成海燕,等. 渤海海峡水动力分布特征研究[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(S1): 66 - 73.
- JIANG S H, WANG N, CHENG H Y, *et al.* The study on hydrodynamic distribution characteristics of the Bohai Strait[J]. *Periodical of Ocean University of China(Natural Science Edition)*, 2019, 49(S1): 66 - 73.
- [23] 石晓勇,史致丽,余恒,等. 黄河口磷酸盐缓冲机制的探讨——I. 黄河口悬浮物对磷酸盐的吸附-解吸研究[J]. *海洋与湖沼*, 1999, 30(2): 192 - 198.
- SHI X Y, SHI Z L, YU H, *et al.* Phosphate buffer mechanisms in the Huanghe River estuary I. Theadsorption and desorption of phosphate by suspended matter[J]. *Oceans and Lakes*, 1999, 30(2): 192 - 198.
- [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(自然科学版)*, 2017, 47(3): 74 - 79.
- GU W Y, CHEN H T, YAO Q Z, *et al.* Seasonal variation and fluxes of dissolved nutrients in the lower reaches of the Huanghe [J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2017, 47(3): 74 - 79.
- [25] 林霄沛,吴德星,鲍献文,等. 渤海海峡断面温度结构及流量的季节变化[J]. *中国海洋大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(3): 355 - 360.
- LIN X P, WU D X, BAO X W, *et al.* Study on seasonal temperature and flux variation of the Bohai Strait [J]. *Journal of Ocean University of China (Natural Science Edition)*, 2002, 32(3): 355 - 360.
- [26] 齐雨藻. 中国沿海赤潮[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- QI Y Z. Red tide off the coast of China [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [27] 张丹,黄渤海浮游植物与生物硅的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.
- ZHANG D, The study of phytoplankton and biosilicon in the Yellow Sea and the Bohai Sea [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2018.
- [28] 郭全,渤海夏季营养盐和叶绿素分布特征及富营养化状况分析[D]. 青岛: 中国海洋大学:, 2005.
- GUO Q. Features in distributions of nutrients and chlorophyll and eutrophication in the Bohai Sea in summer[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2005.
- [29] 刘丽雪,王玉珏,邸宝平,等. 2012年春季渤海中部及邻近海域叶绿素 a 与环境因子的分布特征[J]. *海洋科学*, 2014, 38(12): 8 - 15.
- LIU L X, WANG Y Y, DI B P, *et al.* Spatial distribution of chlorophyll a and environmental factors in the Bohai Sea in spring of 2012 [J]. *Marine Science*, 2014, 38(12): 8 - 15.
- [30] 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.
- ZHANG H B, WANG L S, SHI X Y, *et al.* Spatial distributions and seasonal variations of nutrients and statistical analysis of nutrient limitation in the center of the Bohai Sea, China. [J]. *China Environmental*

- Sciences, 2019, 39(4): 1579 – 1588.
- [31] YAN G, JIANG T, ZHANG Y, *et al.* Determining temporal and spatial distribution of autotrophic picoplankton community composition through HPLC-pigment method and flow cytometry in the central Bohai Sea (China) [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.11261>.
- [32] PAN H, LI A, CUI Z, *et al.* A comparative study of phytoplankton community structure and biomass determined by HPLC-CHEMTAX and microscopic methods during summer and autumn in the central Bohai Sea, China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111172>.
- [33] ZHENG L W, ZHAI W D, WANG L F, *et al.* Improving the understanding of central Bohai Sea eutrophication based on wintertime dissolved inorganic nutrient budgets: Roles of north Yellow Sea water intrusion and atmospheric nitrogen deposition [J]. *Environmental Pollution*, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.115626>.
- [34] WANG X, CUI Z, GUO Q, *et al.* Distribution of nutrients and eutrophication assessment in the Bohai Sea of China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(1): 177 – 183.
- [35] 李桂菊, 马玉兰, 李 伟, 等. 春季渤海湾营养盐分布及潜在性富营养化评价 [J]. *天津科技大学学报*, 2012(5): 22 – 27.
- LI G J, MA Y L, LI W, *et al.* Distribution of inorganic nutrients and potential eutrophication assessment in Bohai Bay in spring [J]. *Journal of Tianjin University of Science and Technology*, 2012(5): 22 – 27.
- [36] 张海波, 裴绍峰, 祝雅轩, 等. 初夏渤海湾营养盐结构特征及其限制状况分析 [J]. *中国环境科学*, 2018, 38(9): 3524 – 3530.
- ZHANG H B, PEI S F, ZHU Y X, *et al.* Nutrient structure and nutrient limitation for phytoplankton growth in Bohai Bay in the early summer [J]. *China Environmental Sciences*, 2018, 38(9): 3524 – 3530.
- [37] 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.
- WU J H, XU X M, YANG S, *et al.* Nutrients status and its influencing factors in north part of Liaodong Bay in Spring and Autumn of 2007 [J]. *Advances in Marine Science*, 2012, 30(4): 477 – 486.
- [38] PEI S, LAWS E A, ZHANG H, *et al.* Study on chemical hydrography, chlorophyll-a and primary productivity in Liaodong Bay, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2018, 202: 103 – 113.
- [39] 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.
- SUN P X, WANG B, ZHANG Z H, *et al.* Relationship between nutrient distributions and eutrophication in seawater of the Laizhou Bay [J]. *Advances in Marine Science*, 2006, 24(3): 329 – 335.
- [40] 张欣泉, 姜会超, 马元庆, 等. 2017 年丰水期莱州湾环境因子分布特征及网采浮游植物的响应 [J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(4): 614 – 621, 629.
- ZHANG X Q, JIANG H C, MA Q Y, *et al.* The spatial distribution of environmental factors and the response of net-phytoplankton in the Laizhou Bay during wet-season in 2017 [J]. *Marine Environmental Science*, 2020, 39(4): 614 – 621, 629.
- [41] 孙雪梅, 徐东会, 夏 斌, 等. 渤海中部网采浮游植物种类组成和季节变化 [J]. *渔业科学进展*, 2016, 37(4): 19 – 27.
- SUN X M, XU D H, XIA B, *et al.* Species composition and seasonal variation of net-phytoplankton in the central Bohai Sea [J]. *Advances in Fishery Science*, 2016, 37(4): 19 – 27.
- [42] 郭 皓. 我国海域赤潮甲藻孢囊形态与分布特征研究 [D]. 大连: 大连海事大学, 2016.
- GUO H. Studies on the characteristics of morphology and distribution of red-tide dinoflagellate cysts in China [D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2016.
- [43] 孙 军, 刘东艳, 王 威, 等. 1998 年秋季渤海中部及其邻近海域的网采浮游植物群落 [J]. *生态学报*, 2004, 24(8): 1643 – 1655.
- SUN J, LIU D Y, WANG W, *et al.* The net-phytoplankton community of the central Bohai Sea and its adjacent waters in autumn, 1998 [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1643 – 1655.
- [44] 孙 军, 刘东艳, 柴心玉, 等. 1998—1999 年春季渤海中部及其邻近海域叶绿素 a 浓度及初级生产力估算 [J]. *生态学报*, 2003, 23(3): 517 – 517.

- SUN J, LIU D Y, CHAI X Y, *et al.* The chlorophyll a concentration and estimating of primary productivity in the Bohai Sea in 1998—1999[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(3): 517–517.
- [45] 赵 骞, 田纪伟, 赵仕兰, 等. 渤海冬夏季营养盐和叶绿素 a 的分布特征[J]. *海洋科学*, 2004(4): 34–39.
- ZHAO Q, TIAN J, ZHAO S, *et al.* Winter and summer chlorophyll a and nutrient distribution and characteristics in the Bohai Sea [J]. *Marine Sciences*, 2004(4): 34–39.
- [46] 张 雪, 王 俊, 高 燕, 等. 2014 年春季渤海浮游植物群落结构[J]. *海洋科学*, 2020, 44(6): 45–55.
- ZHANG X, WANG J, GAO Y, *et al.* The net-phytoplankton community structure in the Bohai Sea in autumn 2014[J]. *Marine Science*, 2020, 44(6): 45–55.
- [47] 张 莹. 渤海中部浮游植物与环境因子的空间关系及季节差异分析[D]. 烟台: 中国科学院海岸带研究所, 2016.
- ZHANG Y. Spatial correlation and seasonal variation of phytoplankton and environmental factors in the central Bohai Sea [D]. Yantai: Institute of Coastal Zone, Chinese Academy of Sciences, 2016.
- [48] 郑耀洋. 渤海中部海域浮游植物种群结构、光合色素和粒径特征研究[D]. 广州: 暨南大学, 2016.
- ZHENG Y Y. Studies on phytoplankton in the central Bohai Sea: Community structure, photosynthetic pigments and size characteristics [D]. Guangzhou: Jinan University, 2016.

## Comparative study on the influence factors of chlorophyll-a and nutrient structure between winter and summer in the central Bohai Sea

WANG Lisha<sup>1</sup>, WEI Xihui<sup>2</sup>, ZHANG Haibo<sup>3</sup>, LI Chunchuan<sup>4</sup>, TANG Hongjie<sup>1</sup>

(1. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China;

2. Chengyang Branch of Qingdao Municipal Bureau of Ecology and Environment, Qingdao Shandong 266109,

China; 3. National Marine Environment Monitoring Center, Dalian Liaoning 116023, China;

4. Institute for Advanced Ocean Study, Ocean University of China, Qingdao Shandong 266100, China)

**Abstract:** Based on the data of chlorophyll a (Chl a), nutrients, and hydrological environment parameters of the central Bohai Sea in January (winter) and June (summer) of 2016, we studied spatial and temporal variations of Chl a, nutrient structure, analyzed the influence factors for the phytoplankton growth and the changing trend of the phytoplankton community structure over long-time scale. The results showed that nutrient structure and Chl a had significant seasonal variation characteristics ( $P < 0.01$ ). In winter, the concentrations of dissolved inorganic nitrogen (DIN), active phosphate ( $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ) and silicate ( $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$ ) were  $(10.51 \pm 4.52) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $(0.28 \pm 0.14) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , and  $(10.63 \pm 2.09) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectively, and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  (92%) was the main form of DIN, and all nutrient contents were above the threshold, meanwhile the nutrient ratios of N/P, Si/P, and Si/N were  $69.30 \pm 86.80$ ,  $64.50 \pm 68.80$ , and  $1.20 \pm 0.50$ , respectively, the N and Si limitations were not obvious except that some stations showed P potential limitations because of input of the Northern Yellow Sea cold flow, the sediment resuspension, and the release by the mineralization of organic matters. Affected by seawater temperature ( $T < 8^\circ\text{C}$ ), the phytoplankton reproduction and growth were restricted and the content of Chl a ( $0.99 \pm 0.25$ )  $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  was low. In summer, influenced by the Yellow River dilute water, the Northern Yellow Sea cold flow, and phytoplankton uptake. The concentrations of DIN,  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  and  $\text{SiO}_3^{2-}\text{-Si}$  were  $(4.72 \pm 4.20) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ,  $(0.04 \pm 0.04) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , and  $(3.81 \pm 1.72) \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , and decreased by 55.0%, 85.7% and 64.1%, respectively,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  (48%) and  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  (45%) became the main forms of DIN, compared to those in the winter. The nutrient ratios of N/P, Si/P and Si/N were  $274.19 \pm 328.06$ ,  $202.18 \pm 182.07$  and  $1.39 \pm 1.00$ , respectively, increased significantly compared with that of winter. The nutrient limitations showed obvious P limitation, and the contents were below the threshold of DIN and Si in some stations, which would limit the growth of phytoplankton, especially the diatoms. The content of Chl a was  $(4.58 \pm 5.51) \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  with the seawater temperature of  $(22.1 \pm 1.88)^\circ\text{C}$ , 4.6 times higher than that in winter, there were some stations in the Yellow River Estuary, the content was beyond  $10 \text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$  and showed an outbreak risk of algal bloom.

**Keywords:** Bohai Sea; chlorophyll a; nutrient structure; phytoplankton community; variation trend