

辽河口海域叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素

孙越峰¹⁻³, 秦艳杰¹, 李洪波², 吴 荷⁴

(1. 大连海洋大学水产与生命学院, 辽宁 大连 116000; 2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 116000; 3. 本溪满族自治县发改局, 辽宁 本溪 117000; 4. 本溪市气象局, 辽宁 本溪 117000)

摘要: 2013年8月、2013年10月和2014年5月先后3次对辽河口海域进行航次调查, 对相关数据运用多种分析方法, 研究了浮游植物粒级结构的时空分布特征及其主要环境影响因子。结果表明: 辽河口叶绿素 a 浓度的季节变化特征表现为夏季最大、春季次之、秋季最小。空间分布特征表现为: 春季西北部浓度高, 东南区域浓度较低; 夏秋呈相反分布特征在夏季为近河口区域低、河口外区域高, 且区域之间的浓度差异较大, 最大值出现在西南区域; 秋季表现为近河口区域高, 远离河口区域较低, 叶绿素 a 较大值主要分布在靠近河口的区域。在不同季节, 不同粒径对叶绿素 a 的贡献率也不尽相同, Nano-级对总叶绿素 a 的贡献率在3个季度中均为最大。影响叶绿素 a 浓度变化的环境因素复杂: 在春季, 硝酸盐与叶绿素 a 呈负相关; 在夏季, 硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐以及总氮均与叶绿素 a 呈显著负相关, 悬浮物浓度与叶绿素 a 之间呈显著负相关, 表层水温 (SST) 与叶绿素 a 表现为显著正相关; 在秋季, 悬浮物 (SS) 与叶绿素 a 存在显著正相关。

关键词: 浮游植物; 叶绿素 a; 环境因子; 辽河口海域

中图分类号: X 524

文献标志码: A

DOI: 10.16803/j.cnki.issn.1004-6216.2020.02.009

Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Influencing Factors of Chlorophyll a in the Liaohe Estuary

SUN Yuefeng¹⁻³, QIN Yanjie¹, LI Hongbo², WU He⁴

(1. College of Life Science and Technology, Dalian Ocean University 116000, China; 2. National Marine Environmental Monitoring Center 116000, China; 3. Benxi Manchu Autonomous County Development and Reform Commission 117000, China; 4. Benxi Meteorological Bureau 117000, China)

Abstract: This paper applied several methods to analyze the spatial-temporal characteristics and environmental influencing factors of phytoplankton size-fraction in the Liaohe estuary, based on the sampling results of August, October in 2013 and May in 2014. The results showed that: there were significant differences in Chlorophyll a concentration among four seasons: the highest concentration in summer, spring secondly and the lowest concentration in autumn. The characteristics of spatial distribution showed a higher concentration in the northwest and a lower concentration in the southeast in spring. In summer, the area close to the estuary had a lower concentration and the area outside the estuary had a higher concentration. There were a large difference of the concentration between different regions and the maximum concentration appeared in the southwest region. Meanwhile, the opposite distribution characteristics were in summer and autumn. In different seasons, the contribution of different particle sizes to Chlorophyll a is different, and Nano sizes had the highest contribution in those seasons. There were complex environmental factors affecting the concentration of Chlorophyll a: in spring, nitrate was negatively correlated with Chlorophyll a; in summer, nitrate, phosphate, silicate, total nitrogen and suspended solids concentration were significantly negatively correlated with it. But surface water temperature (SST) showed a significant positive correlation with Chlorophyll a. In autumn, there was a significant positive correlation between suspended solids (SS) and Chlorophyll a.

Keywords: Phytoplankton; Chlorophyll a; Environmental Factors; Liaohe Estuary

CLC number: X 524

收稿日期: 2020-01-17

基金项目: 海洋公益性行业科研专项 (201305030); 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室基金 (MATHAB 201702)

作者简介: 孙越峰 (1988-), 男, 硕士研究生、助理工程师。研究方向: 海洋生物学。E-mail: 494916996@qq.com

通信作者: 李洪波 (1976-), 男, 博士、副研究员。研究方向: 海洋环境与海洋生物。E-mail: marinepico@126.com

引用格式: 孙越峰, 秦艳杰, 李洪波, 等. 辽河口海域叶绿素 a 的时空分布特征及其影响因素[J]. 环境保护科学, 2020, 46(2): 44-48.

叶绿素 a 是浮游植物光合作用的主要色素^[1],也是衡量海洋中浮游植物现存量的一个重要指标^[2-3],在海洋调查中具有重要地位。对叶绿素 a 的调查和研究对海洋生态系统的研究至关重要。黄、东海是我国生产力较高的海域^[4],在全球气候异常大背景下逐渐成为热点研究海域。自 20 世纪 60 年代开始,我国对海洋浮游植物叶绿素和初级生产力就已经开展了大量研究^[5-6],取得大量研究成果,主要研究区域集中于近海、近岸等区域,为黄海、东海叶绿素的研究奠定了重要基础^[7-8]。

浮游植物粒径的大小对海洋生态系统中各营养级间的相互作用及有机体的沉降速率有重要作用^[9]。研究表明,海洋浮游植物粒径的大小影响着相关粒径的新陈代谢(如合成代谢、分解代谢等)、光合作用和能量利用等生理特性^[10-12]。浮游植物对营养盐吸收、温度和酸化胁迫等存在一定程度的粒径效应,浮游植物的粒级结构及演变规律是许多生物和非生物环境因素共同作用的结果^[13-14]。因此,研究不同环境因子对浮游植物粒级结构的影响,对了解海洋生态系统的微食物环以及浮游植物的生物泵效率具有重要的意义^[15]。

辽河口区位于辽宁省盘锦市境内,辽河口地区湿地面积大,物种多,自然资源丰富,属珍贵的生态保护区,具有重要的生态学和气候学意义^[16-17]。辽河口区近岸海域是我国北方重要的渔场,也是我国海洋污染较为严重的海域^[18-20]。自 1984 年起,国家海洋局就开始对辽河口滨海湿地进行生态环境监测,至 2002 年初,国家海洋环境监测中心进一步对辽河口近海海域实施了长期生态监测^[21]。目前针对辽河口海域的研究主要集中在环境评估、湿地退化和生物群落等方面^[15-23],对海域中叶绿素 a 浓度的季节变化,及浮游植物粒径结构的影响因素研究较少。因此,本文通过对 2013~2014 年辽河口海域叶绿素 a 浓度的走航调查,掌握不同季节浮游植物中叶绿素 a 浓度的分布特征,分析影响其变化的主要因素,旨在为评估我国黄、渤海河流生态系统可持续发展提供科学依据,为创建新型健康养殖模式及养殖容量评估提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 调查站位

分别于 2013 年 8 月(夏季)、2013 年 10 月(秋季)

和 2014 年 5 月(春季)先后 3 次对辽河口海域进行了走航调查,采样站位共 32 个。由于 2014 年 2 月该区域海水结冰,无法进行样品采集,冬季没有开展调查。

1.2 样品采集及测定

3 次航次每次在相同的点位进行样品采集,采集方法参照国家《海洋监测规范》规定的标准水层水样^[23]。所有航次中的所有采集水样经 20 μm 绢,2 μm 筛绢和 0.65 μm 的玻璃纤维滤膜逐级过滤后,收集不同粒径的浮游植物,包括小型浮游植物(Micro-, >20 μm)、微型浮游植物(Nano-, 2~20 μm)和微微型浮游植物(Pico-, <2 μm)。水样过滤体积为 1 L,将滤膜置于-20 $^{\circ}\text{C}$ 冷冻保存并带回实验室分析。叶绿素 a 的测定采用美国产 Turner-Designs Trilogy 荧光仪进行测定。

1.3 数据处理

实验数据采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS17.0 统计分析软件进行分析,ANOVA 单因子方差分析检验组间差异,等值线的绘制采用 ArgGis 软件。

2 结果与分析

2.1 总叶绿素 a 分布特征

2.1.1 叶绿素 a 的季节变化 辽河口海域叶绿素 a 含量在不同季节的变化见表 1。

表 1 3 个季节的叶绿素 a 含量

季节	叶绿素 a 含量/ $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$		
	最小值	最大值	平均值
夏季	0.60	53.29	15.17
秋季	1.67	4.46	2.87
春季	1.35	8.85	5.55

表 1 可知,辽河口海域叶绿素 a 含量在不同季节有明显变化,辽河口叶绿素 a 浓度在 3 个季节的变化表现为夏季>春季>秋季。夏季平均值是秋季的 5 倍叶绿素 a 在全年表现为单峰型,夏季最高。夏季调查期间,在部分站位发现有赤潮发生,这可能是引起夏季叶绿素 a 较高的原因。

2.1.2 叶绿素 a 的空间分布特征 辽河口水体春季、夏季、秋季叶绿素 a 分布情况,见图 1。

图 1 可见,辽河口夏季的叶绿素 a 分布特征为近河口区域低,河口外区域高,尤其西南区域出现叶绿素 a 的最大值,且区域之间的浓度差异较大。最大值为 53.29 $\mu\text{g}/\text{L}$,最小值为 0.60 $\mu\text{g}/\text{L}$,最大值约

为最小值的 90 倍,这与部分区域发生赤潮有密切相关。而秋季叶绿素 a 的平面分布与夏季恰好相反,近河口区域高,远离河口区域较低。叶绿素 a 较大值主要分布在靠近河口的区域。辽河口春季

叶绿素 a 的平面分布与夏秋季又有差异。叶绿素 a 的分布分为 2 个区域,河口西北部叶绿素 a 浓度较高,东南部区域浓度较低,尤其是中间一个断面出现叶绿素 a 的最低值区域。

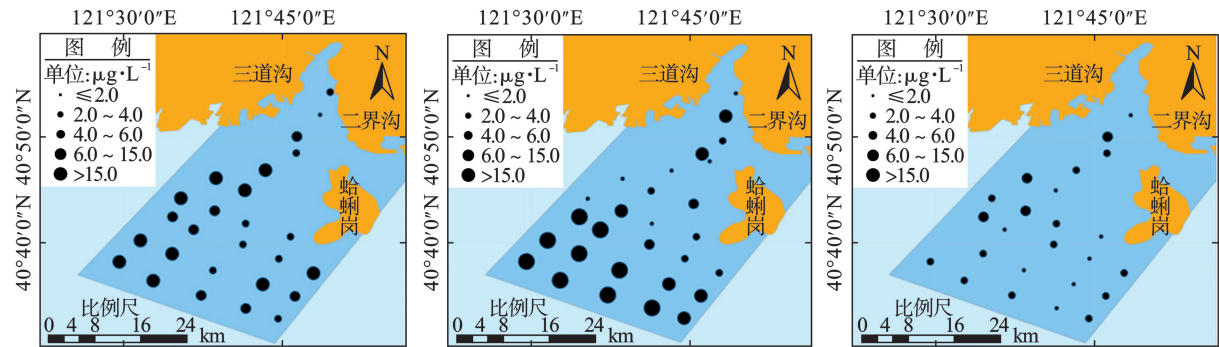


图 1 辽河口水体春季 (a)、夏季 (b)、秋季 (c) 叶绿素 a 分布图

2.2 分级叶绿素 a 分布特点

2.2.1 分级叶绿素 a 的贡献率 不同季节各粒径对总叶绿素 a 的贡献率见表 2。

表 2 不同季节各粒径对总叶绿素 a 的贡献

季节	粒径贡献率/%		
	Micro-	Nano-	Pico-
夏季	38.71	44.64	16.65
秋季	16.88	73.71	9.41
春季	10.56	75.36	14.08
平均	22.05	64.57	13.38

表 2 可见,春秋季 Nano-级叶绿素 a 对总叶绿素 a 的贡献达到 70% 以上。而在夏季尽管也是 Nano-级贡献率最高,但与 Micro-级的贡献差别不大。3 种粒径对叶绿素 a 的贡献夏季为 Nano->Micro->Pico-; 秋季同夏季一致,但秋季中 Nano-的贡献远远高于夏季的贡献;春季则表现为 Nano->Pico->Micro-。

3 个季节的平均来看,辽河口区域对总叶绿素 a 浓度的贡献主要以细胞粒径 2~20 μm 主要的微型浮游植物(Nano-)占优势;其次是粒径>20 μm 的小型浮游植物(Micro-);粒径 0.2~2 μm 的微微型浮游植物(Pico-)的贡献最小。Nano+Pico-级(N+P)浮游植物占浮游植物生物的绝对优势。

2.2.2 微型浮游植物 (Nano-) 的粒径组成 3 个航次的调查结果显示, Nano-级对总叶绿素 a 的贡献率在 3 个季度中均为最大,分别为 44.64%(夏季)、73.71%(秋季)和 75.36%(春季)。因此对 Nano-级浮游植物(2~20 μm)再进行细分,分为

2~5、5~10 和 10~20 μm 部分。
微型浮游植物(Nano-)叶绿素 a 构成见表 3。

表 3 3 个季节中 Nano-级叶绿素 a 构成

季节	Nano-级中的各粒径贡献率/%		
	10~20 μm	5~10 μm	2~5 μm
夏季	48.11	35.60	16.29
秋季	26.07	30.96	42.97
春季	13.15	58.81	28.04
平均	29.11	41.79	29.10

分析得出在 2013 年夏季,对 Nano-级叶绿素 a 贡献最大的是粒径在 10~20 μm 的浮游植物,其次是 5~10 μm,最后是 2~5 μm; 2013 年秋季中,对 Nano-级叶绿素 a 贡献最大的是 2~5 μm 的浮游植物,其次是 5~10 μm,最后是 10~20 μm; 而 2014 年春季中,对 Nano-级叶绿素 a 贡献最大的则是 5~10 μm 的浮游植物,其次是 2~5 μm,最后是 10~20 μm。不同季节,不同粒径的浮游植物对 Nano-级叶绿素 a 的贡献差异较大,但全年来看 5~10 μm 的浮游植物是 Nano-级叶绿素 a 的主要贡献者,2~5 μm 和 10~20 μm 的浮游植物贡献相当。

2.2.3 影响不同粒径浮游植物对叶绿素 a 贡献因素 春季分级叶绿素的贡献率表现为 Nano->Pico->Micro-,而夏秋季则表现为 Nano->Micro->Pico-(表 2),说明春季升温对 Pico-的影响大于对 Micro-的影响,从而导致该区域的 Pico 级浮游植物急剧增加,引起 Pico-级浮游植物在总叶绿素 a 中所占比例升高。有研究表明在中营养海域,聚球藻蓝细菌和微微型真核藻类受益于升温过程,蓝细菌和微微型真

核藻类生长率的活化能分别是 0.53 和 0.62 eV, 高于大体积的浮游植物的 0.36eV^[24]。这可以证实春季升温过程中, 微微型浮游植物的生产速率要大于粒径大的浮游植物的生长率。微微型浮游植物经常在高温低营养盐的环境中起主导作用, 在海洋变暖情况中很可能受惠^[25]。

微微型浮游植物具有较高的表面积-体积比, 可以在低浓度营养盐条件下更好的生存, 低浓度营养盐可更好的刺激微微型浮游植物的生长, 这也可能是春季 Pico-级对总叶绿素 a 的贡献会高于 Micro-级的原因之一。AGAWIN et al^[25] 的研究表明在贫营养的温暖海域微微型浮游植物对总浮游植物生物量的贡献在营养盐浓度非常低的情况下($\text{NO}_3 + \text{NO}_2 < 1 \mu\text{mol/L}$)达到最大值, 而后随着营养盐浓度升高而降低。

微微型浮游植物 (Pico-) 对总叶绿素 a 的贡献与营养盐的关系见图 2。

图 2 可见, 在本研究中, 在海域的营养盐浓度较高($20 \mu\text{mol/L} < \text{NO}_3 + \text{NO}_2 < 170 \mu\text{mol/L}$)情况下, 微微型浮游植物对总叶绿素 a 的贡献除个别外, 绝大多数低于 20%, 并且此贡献率随 $\text{NO}_3 + \text{NO}_2$ 浓度升高而增

加的趋势, 两者之间存在较为显著的正相关($R=0.449$, $P<0.05$)。而 Nano-级和 Micro-级浮游植物对总叶绿素 a 的 Pico-级和 Nano-级均存在显著的负相关, 相关系数分别为 -0.407 ($P<0.05$) 和 -0.853 ($P<0.001$), 这说明 Micro-级与 Pico-级和 Nano-级浮游植物之间存在着激烈的竞争关系。

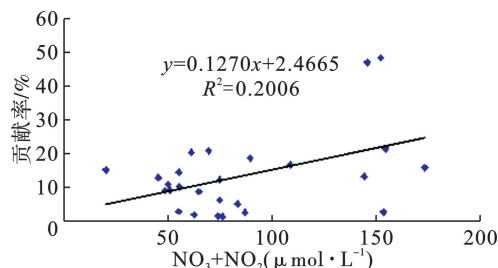


图 2 Pico-级浮游植物对总叶绿素 a 的贡献与营养盐的关系

下行控制 (top-down control) 也是影响不同粒径浮游植物贡献总叶绿素 a 差异的因素。春季里, 浮游动物的快速生长需要摄入较高的能量, 可能对 Micro-级浮游植物的摄食较大, 而导致 Micro-级叶绿素 a 的贡献降低。

3 叶绿素 a 与环境因子的关系

叶绿素 a 与环境因子的相关性见表 4。

表 4 叶绿素 a 与环境因子相关性分析

t/a-月	NO_3	PO_4	SiO_4	TN	TP	SST	SS	E
2013-08	-0.747**	-0.586**	-0.750**	-0.671**	-0.347	0.421*	-0.466*	-0.468*
2013-10	0.1	-0.135	-0.415	-0.139	0.130	0.081	0.483*	-0.060
2014-05	-0.495*	-0.333	-0.017	-0.111	-0.276	-0.397	0.085	-0.355

注: **代表极显著相关 ($P<0.01$), *代表显著相关 ($P<0.05$), E代表富营养化指数。

表 4 可见, 环境因子对叶绿素 a 影响显著。2013 年夏季, 硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐以及总氮均与叶绿素 a 显著负相关, 这表明在夏季上述营养盐在高浓度情况下是浮游植物生长的限制因子, 叶绿素 a 与富营养化指数的相关性($R=-0.468$, $P<0.05$)也证实了这个观点。而在 2013 年秋季, 只有悬浮物 (SS) 与叶绿素 a 显著正相关, 2014 年春季硝酸盐与其负相关, 不同季节影响浮游植物生长的限制性因素并不完全一致。表层水温 (SST) 与叶绿素 a 的关系, 只有在夏季表现为显著正相关($R=0.421$, $P<0.05$), 说明温度在夏季仍是影响浮游植物生长的关键因素, 而其它季节没有表现出较好的相关性。悬浮物浓度 (SS) 在夏季与叶绿素 a 之间有显著的负相关性 ($R=-0.466$, $P<0.05$), 而在秋季则表现为正相关

性 ($R=0.483$, $P<0.05$)。

由于缺乏辽河的径流量, 无法直接判断径流与叶绿素 a 的关系, 但在黄河口的调查已证叶绿素 a 浓度变化与黄河径流变化关系不明显^[26]。此外, 本项目在夏季调查期间, 正赶上丰水期上游水库泄洪, 导致大量泥沙排放到河口区域, 悬浮物浓度成为制约浮游植物生长的重要因素。当然悬浮物本身携带的营养盐, 在某些程度上也会促进浮游植物的生长。辽河口区域营养盐并不缺乏, 故可利用光强是促进浮游植物生长的重要因素。

4 结论与讨论

辽河口海域叶绿素 a 浓度存在显著的季节变化, 具体表现为夏季最大, 春季次之, 秋季最小。空

间分布特征表现为春季西北部浓度高, 东南区域浓度较低, 夏秋呈相反的分布特征: 在夏季为近河口区域低, 河口外区域高。而秋季表现为近河口区域高, 远离河口区域较低, 叶绿素 a 较大值主要分布在靠近河口的区域。

在不同季节, 不同粒径对叶绿素 a 的贡献率也不尽相同, Nano-级对总叶绿素 a 的贡献率在 3 个季度中均为最大。影响叶绿素 a 浓度变化的环境因素复杂, 在不同季节, 影响浮游植物生长的限制性因素并不完全一致, 环境对叶绿素 a 的影响也存在显著区别。在春季, 硝酸盐与叶绿素 a 呈负相关; 在夏季, 硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐以及总氮均与叶绿素 a 呈显著负相关, 悬浮物浓度与叶绿素 a 之间呈显著负相关, 表层水温(SST)与叶绿素 a 表现为显著正相关; 在秋季, 悬浮物(SS)与叶绿素 a 存在显著正相关。

值得注意的是, 在夏季调查期间, 在部分站位发现有赤潮发生, 这可能是引起夏季叶绿素 a 较高的原因。且正赶上丰水期上游水库泄洪, 导致大量泥沙排放到河口区域, 悬浮物浓度可能成为制约浮游植物生长的重要因素。此外, 本文研究调查采样具有一定局限性, 且影响叶绿素 a 浓度变化的环境因素复杂, 影响机理需要进一步研究。

参考文献

- [1] 林丽贞, 陈纪新, 刘媛, 等. 东、黄海典型海区分粒级浮游植 Chl a 的周日波动及影响因子[J]. 台湾海峡, 2007, 26(3): 342–350.
- [2] 费尊乐, TREES C C, 李宝华. 利用叶绿素资料计算初级生产力[J]. 黄渤海海洋, 1997, 15(1): 35–47.
- [3] 孙晓霞. 黄海叶绿素和初级生产力[M]. 北京: 海洋出版社, 2011.
- [4] 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 等. 中国近海生物固碳强度与潜力[J]. 生态学报, 2008, 28(2): 551–558.
- [5] 朱明远, 毛兴华, 吕瑞华, 等. 黄海水域的叶绿素 a 和初级生产力[J]. 黄渤海海洋, 1993, 11(3): 38–51.
- [6] 孙晓霞, 孙松, 张永山, 等. 胶州湾叶绿素 a 及初级生产力的长期变化[J]. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 654–661.
- [7] 孙晓霞, 任琳琳, 郑珊, 等. 2011 年春、夏季黄、东海浮游植物粒级结构[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 419–428.
- [8] 文斐, 孙晓霞, 郑珊, 等. 2011 年春、夏季黄、东海叶绿素 a 和初级生产力的时空变化特征[J]. 海洋与湖沼, 2012, 43(3): 438–444.
- [9] STOECKER DK, CAPUZZO JM. Predation on protozoa: its importance to zooplankton[J]. Journal Of Plankton Research, 1990.
- [10] FENCHEL T. Intrinsic rate of natural increase: the relationship with body size[J]. Oecologia, 1974, 14: 317–326.
- [11] PACKARD TT, BLASCO D, BARBER RT, et al. Changes in nutrients, pH, light penetration and heat budget by migrating photosynthetic organisms[J]. Journal Of Phycology, 1987, 23: 336–343.
- [12] FINKEL ZV, IRWIN AJ. Modeling size-dependent photosynthesis: light absorption and the allometric rule[J]. Journal Of Theoretical Biology, 2000, 204: 361–369.
- [13] 宋伦, 宋广军, 王年斌, 等. 辽东湾网采浮游植物粒级结构的胁迫响应[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9): 2764–2771.
- [14] 张雪, 栾青杉, 孙坚强, 等. 獐子岛海域浮游植物群落周年变化及其与环境因子的关系[J]. 大连海洋大学学报, 2016, 31(3): 315–323.
- [15] 傅明珠, 孙萍, 王宗灵, 等. 黄海冷水团水域浮游植物群落粒级结构的季节变化[J]. 海洋学报, 2010, 32(1): 120–129.
- [16] 伍成成, 郑西来, 林国庆. 双台子河口感潮段纳潮量研究[J]. 水资源与水工程学报, 2010, 21(4): 105–109.
- [17] 朱浩峥, 侯万发, 李忠波, 等. 双台子河口“红海滩”退化初探[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1191–1194.
- [18] 李建军, 冯慕华, 喻龙. 辽东湾浅水区水环境质量现状评价[J]. 海洋环境科学, 2001, 20(3): 42–45.
- [19] 马明辉, 海志杰, 冯志权. 辽东湾双台子河海区动物体污染物含量及时空分布[J]. 海洋环境科学, 1999, 18(1): 61–64.
- [20] 吕景才, 赵元凤, 徐恒振. 大连湾、辽东湾养殖水域有机氯农药污染状况[J]. 中国水产科学, 2002, 18(1): 73–77.
- [21] 刘述锡, 马明辉, 王真良, 等. 双台子河口近 2a 春季同期典型生物群落变化[J]. 海洋环境科学, 2004, 23(4): 38–40.
- [22] 王永洁, 郑冬梅, 罗金明. 双台子河口湿地生态系统变化过程及其影响分析[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(21): 12954–12956.
- [23] 高蕾, 姚海燕, 曹婧, 等. 滦河口邻近海域夏季海水叶绿素 a 时空分布特征及其影响因素[J]. 海洋湖沼通报, 2017(5): 109–113.
- [24] CHEN BZ, LIU HB, HUANG BQ, et al. Temperature effects on the growth rate of marine pico- plankton[J]. Mar Ecol Prog Ser, 2014, 505: 37–47.
- [25] AGAWIN NSR, DUARTE CM, AGUSTI S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production[J]. Limnol Oceanogr, 2000, 45: 591–600.
- [26] 马媛. 黄河入海径流量变化对河口及邻近海域生态环境影响研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2006.