

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20190125003

http://www.yykxjz.cn/

柴然, 冯娟, 陈碧鹃, 夏斌, 孙雪梅, 王晓晓, 陈聚法, 崔正国, 曲克明. 崂山近岸浮游植物群落结构季节变化及其环境影响因素. 渔业科学进展, 2020, 41(1): 21-30

Chai R, Feng J, Chen BJ, Xia B, Sun XM, Wang XX, Chen JF, Cui ZG, Qu KM. Seasonal variations in the phytoplankton community structure and their environmental impact factors in the offshore area of Laoshan, Qingdao. Progress in Fishery Sciences, 2020, 41(1): 21-30

崂山近岸浮游植物群落结构季节变化 及其环境影响因素*

柴然^{1,2} 冯娟¹ 陈碧鹃^{2,3} 夏斌^{2,3}
孙雪梅^{2,3①} 王晓晓⁴ 陈聚法² 崔正国² 曲克明²

(1. 青岛大学环境科学与工程学院 青岛 266071; 2. 中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业农村部海洋渔业可持续发展重点实验室 青岛 266071; 3. 青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋生态与环境科学功能实验室 青岛 266071; 4. 青岛市崂山区自然资源局 青岛 266106)

摘要 为了解山东省青岛市崂山近岸海域浮游植物群落结构变化特征及其与环境因子的关系,于2016~2017年的春、夏、秋3个季节在该海域设置15个监测站位进行调查,并同步监测海区环境因子。结果显示,共检出浮游植物2门31属69种。其中,硅藻门(Bacillariophyta)为绝对优势门类,共25属60种,甲藻门(Pyrrophyta)有6属9种。调查海区浮游植物细胞丰度变化范围为(732.10~1142.19)×10⁴ cell/m³,平均为937.15×10⁴ cell/m³。浮游植物细胞丰度季节变化明显,2016年最高峰出现在秋季;2017年最高峰出现在夏季;空间分布上,春、夏2个季节呈现由北向南递减的趋势。浮游植物群落结构特征指数分析结果显示,调查海域浮游植物的多样性指数和丰富度指数均较好,表明该海域浮游植物群落结构比较稳定。聚类分析结果显示,春季浮游植物细胞丰度季节变化不大,2016和2017年相似性高达70%左右,但夏、秋季的浮游植物细胞丰度季节变化较大,相似性仅为40%左右,这主要与环境因子变化有关。浮游植物群落结构与环境因子相关性分析表明,浮游植物细胞丰度平均值与化学需氧量(COD)的相关系数最高,最高值为0.536,其次与之相关的双因子组为pH与COD、COD与无机氮(DIN)、溶解氧(DO)与COD。因此,崂山近岸海区浮游植物细胞丰度的关键限制因子为COD、pH、DIN和DO。

关键词 浮游植物; 崂山近岸; 群落结构; 环境因子

中图分类号 S931.2 文献标识码 A 文章编号 2095-9869(2020)01-0021-10

在海洋生态系统中,浮游植物是一种含有色素或色素体的自养单细胞微生物,其特点是生命力强、繁

* 国家重点研发计划-生态环境损害鉴定评估业务化技术研究(2016YFC0503600)和国家基金委-山东省联合基金项目“海洋生态与环境科学”(U1606404)共同资助 [This work was supported by the National Key Research and Development Program-Business Technology Research on Eco-Environmental Damage Assessment (2016YFC0503600), and the Joint Project of State Fund Committee and Shandong Province "Marine Ecology and Environmental Science" (U1606404)]. 柴然, E-mail: 1215113055@qq.com

① 通讯作者: 孙雪梅, E-mail: sunxm@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2019-01-25, 收修改稿日期: 2019-03-21

殖周期短、对环境变化反应敏感,其作为食物链中的初级生产者,承担着海洋生态系统中能量转化与流动和物质循环的重要环节。海洋环境的变化可以影响浮游植物群落的种类组成、结构和细胞丰度等(王文海等, 2011)。因此,浮游植物可作为环境监测评估中的指示生物,其群落结构特征是评价海域营养水平、污染状况、资源现状以及生产潜力和海洋生态系统稳定性的重要指标。

崂山近岸为山东青岛崂山区周边开放海域,北接即墨区近岸海域,西接青岛市区近海,王哥庄湾、仰口湾分布于其北部海域,南部分布有太清宫湾、流清河湾、沙子口湾以及多条河流入海口。海湾总面积约为 188 km²,最大水深为 14 m,生物资源丰富,湾内与外海水体交换情况良好,为山东省魁蚶(*Scapharca broughtonii*)等贝类资源放流的重点海域(张波等, 2015)。近岸海域是海陆之间相互作用最强烈的区域之一,是许多海洋生物重要的索饵场和洄游通道,物质循环和能量传递较为活跃(宋秀凯等, 2016)。近年来,人类对近岸海域的开发利用不断深入,使得水质污染日趋严重,生物多样性日益降低(乔芮等, 2015)。在近海环境不断恶化的胁迫下,浮游植物群落结构常处于不稳定状态(郭术津等, 2014),因此,需要针对近岸海域生态系统开展深入研究。

近年来,山东半岛近海海域浮游植物群落结构方面的研究多集中在莱州湾和胶州湾(陈碧鹃等, 2001)。研究表明,莱州湾浮游植物数量变动与温度呈显著的正相关,与盐度呈显著的负相关,但与单一营养盐之间的相关关系并不显著(宁璇璇等, 2011; 于潇等, 2018)。胶州湾浮游植物生物量(细胞丰度、叶绿素 *a* 质量浓度)在不同月份的变化与海水温度、营养盐结构和营养盐浓度呈显著正相关(王妍等, 2014)。为客观反映近岸海域生态环境变化对浮游植物群落演变的影响,本研究对 2016~2017 年春、夏和秋 3 个季节崂山近岸浮游植物的群落结构特征进行了分析,并探讨其与关键环境因子的相关性,以期研究人类活动对近岸海域生态系统演化的影响提供基础数据,同时,为崂山近岸海域开展贝类资源增殖放流和渔业资源保护提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 监测区域

本次调查的采样时间为 2016 年春季(5 月)、夏季(8 月)、秋季(11 月)和 2017 年的春季(5 月)、夏季(9 月)、秋季(11 月),采样地点为山东青岛市崂山湾的沿岸近海海域(120.507°~120.707°E, 36.083°~36.142°N),共布设 15 个监测站位(图 1)。

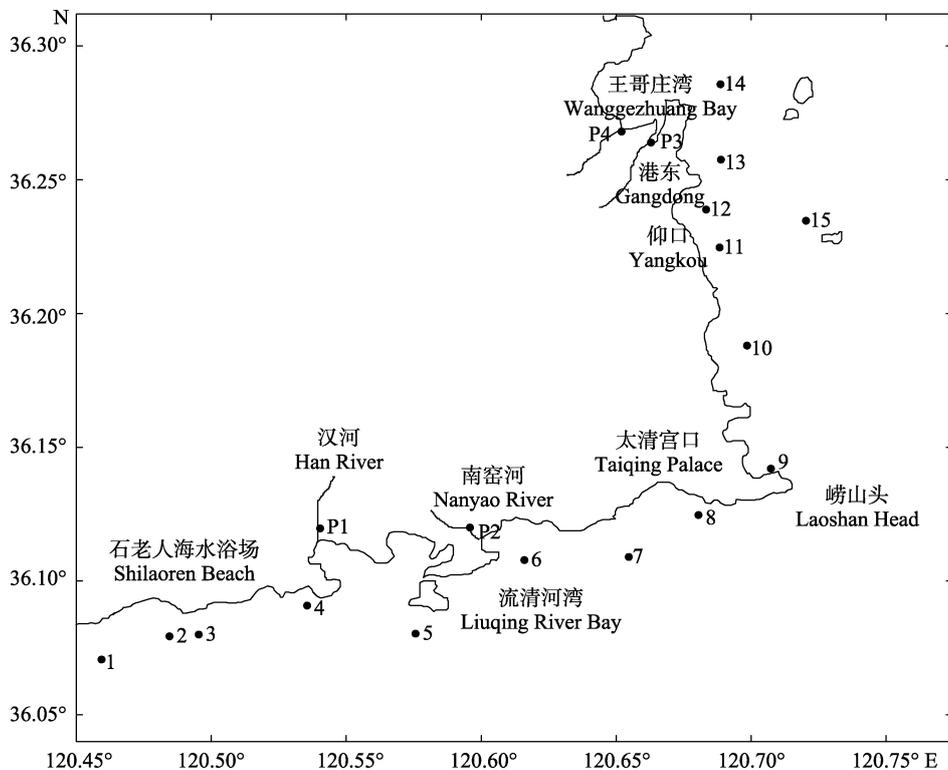


图 1 2016~2017 年崂山近岸浮游植物采样站位

Fig.1 Sampling sites of phytoplankton in offshore area of Laoshan in 2016 and 2017

1.2 样品采集

浮游植物的采集参照《海洋调查规范》(GB/T12763.6-2007)的方法。具体操作方法: 在每个站位, 通过浅水Ⅲ型浮游生物网在采样点进行垂直拖网采样, 所采集生物样品采用含量为 5%的甲醛溶液进行固定, 用显微镜对浮游植物进行分类鉴定与数量统计。现场采样时, 使用多参数水质监测仪(YSI 556 型, 美国)同步测定海水表层温度(T)、表层盐度(S)、化学需氧量(COD)、溶解氧(DO)、pH 等指标, 同步采集水样, 带回实验室测定无机氮(DIN)、活性磷酸盐(DIP)和叶绿素 a (Chl- a)等。海水样品的采集、储存和环境参数测定严格按照《海洋监测规范》(GB/T17378-2007)中的方法进行。

1.3 数据分析

1.3.1 优势种的确定 采用种类优势度(Y)公式:

$$Y = (N_i / N) f_i$$

式中, N_i 为所测第 i 种生物的个体数; N 为所采集生物种的总物种数; f_i 为第 i 种生物所出现的频率。 $Y > 0.02$ 为优势种(Shannon *et al.*, 1963)。

1.3.2 群落结构特征指数的计算 Margalef 丰富度指数公式:

$$D = (S - 1) / \ln N$$

式中, S 为总物种数; N 为同一样品中的总个体数(Margalef *et al.*, 1968)。

Shannon-Winner 多样性指数(H')公式:

$$H' = -\sum P_i \log_2 P_i (P_i = N_i / N)$$

式中, N 为同一采集样品中的总生物个体数; N_i 为第 i 种物种的总个体数(Shannon *et al.*, 1963)。

Pielou 均匀度指数(J)公式:

$$J = H / \log_2 S \text{ (Pielou } et al., 1969)$$

1.4 群落结构分析

本研究通过生物统计学分析软件 PRIMER 7.0, 对 2016~2017 年崂山近岸浮游植物群落结构进行分析, 以浮游植物种类、细胞丰度及监测站位组成原始数据矩阵, 所监测的站点为矩阵的样本, 各站点浮游植物种类和丰度为矩阵的变量, 将 2016~2017 年崂山近岸浮游植物原始丰度数据进行平方根转化, 以 Bray-Curtis 相似性系数为基础, 构建崂山近岸各站站位的等级相似矩阵。同时, 采用 BIOENV 分析 2016~2017 年崂山近岸浮游植物群落的细胞丰度与环境因子之间的相关性(周红等, 2003)。崂山近岸海域浮游植物丰度平面分布图采用 Surfer 8.0 软件绘制。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物种类组成

2016~2017 年, 崂山近岸调查海域共检出浮游植物 2 门 31 属 69 种。其中, 硅藻门(Bacillariophyta) 共有 25 属 60 种, 占浮游植物的 86.95%; 以圆筛藻属(*Coscinodiscus*)的种类数最多, 达 11 种; 其次是角毛藻属(*Chaetoceros*), 达 9 种。甲藻门(Pyrrophyta)有 6 属 9 种, 占浮游植物的 13.04%; 其中, 角藻属(*Ceratium*)有 2 种。由此可见, 2016~2017 年崂山近岸海域浮游植物群落构成以硅藻门和甲藻门为主, 硅藻门在物种数量和细胞丰度上占绝对优势。浮游植物的生态类型主要是广温、广盐的广布性种类, 如中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)、尖刺伪菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)、扁面角毛藻(*Chaetoceros compressus*)、星脐圆筛藻(*Coscinodiscus asteromphalus*)等; 近岸广温性种类, 如派格棍形藻(*Bacillaria paxillifera*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、劳氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)和冰河拟星杆藻(*Asterionellopsis glacialis*)等; 温带沿岸性种类, 如柔弱伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia delicatissima*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、泰晤士旋鞘藻(*Helicotheca tamesis*)、柔弱几内亚藻(*Guinardia delicatula*)和旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)等; 外洋性种类, 如虹彩圆筛藻(*Coscinodiscus oculus-iridis*)、偏心圆筛藻(*Coscinodiscus excentricus*)等; 浮游性种类, 如中华齿状藻(*Biddulphia sinensis*)和翼根管藻印度变形(*Rhizosolenia alata f. indica*)等; 暖水性种类, 如薄壁几内亚藻(*Guinardia flaccida*)等。

表 1 为 2016~2017 年崂山近岸海域浮游植物群落优势种组成具有明显的季节演替现象。春季主要优势种为虹彩圆筛藻($Y=0.048\sim 0.174$)、梭角角藻(*Ceratium fusus*, $Y=0.029\sim 0.089$)、星脐圆筛藻($Y=0.081\sim 0.149$)等。圆筛藻属在各站位出现频率为 100%, 且丰度较高。角毛藻属以北温带广布性种为主, 如柔弱角毛藻等。夏季主要优势种有虹彩圆筛藻($Y=0.024\sim 0.131$)、劳氏角毛藻($Y=0.039\sim 0.117$)、柔弱伪菱形藻($Y=0.02\sim 0.133$)、星脐圆筛藻($Y=0.02\sim 0.102$)、中肋骨条藻($Y=0.02\sim 0.099$)等。夏季出现的优势种以广布性类群与近岸广温性类群为主。秋季主要优势种有虹彩圆筛藻($Y=0.147\sim 0.241$)、卡氏角毛藻(*Chaetoceros castracanei*, $Y=0.036\sim 0.053$)、星脐圆筛藻($Y=0.137\sim 0.221$)、翼根管藻印度变形($Y=0.032\sim 0.203$)等。浮游

性类群在秋季浮游植物群落中占有一定的地位,但优势种类出现不多。温带沿岸性物种数量有一定程度的升高,但优势地位却有所下降,对秋季崂山近岸海域

浮游植物群落构成的贡献有一定程度的下降。与夏季相比,近岸广温性类群中的一些物种如劳氏角毛藻依然作为优势种出现。

表 1 2016~2017 年调查海域浮游植物优势种及优势度
Tab.1 Dominant species and predominance of phytoplankton in the survey area in 2016 and 2017

2016~2017 崂山近岸优势种 2016~2017 dominant species in offshore area of Laoshan	优势度 Y					
	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumn	
	2016-05	2017-05	2016-08	2017-09	2016-11	2017-11
斑点海链藻 <i>Thalassiosira punctigera</i>			0.049		0.061	0.053
丹麦角毛藻 <i>Chaetoceros danicus</i>					0.063	
卡氏角毛藻 <i>C. castracanei</i>	0.023				0.060	0.036
劳氏角毛藻 <i>C. lorenzianus</i>			0.039	0.083	0.035	
柔弱角毛藻 <i>C. debilis</i>				0.021		
高齿状藻 <i>Odontella regia</i>	0.020	0.028				
格氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus granii</i>	0.021				0.023	0.023
虹彩圆筛藻 <i>C. oculus-iridis</i>	0.079	0.155	0.110	0.024	0.147	0.158
琼氏圆筛藻 <i>C. jonesianus</i>			0.022			
星脐圆筛藻 <i>C. asteromphalus</i>	0.081	0.149	0.086		0.221	0.221
中心圆筛藻 <i>C. centralis</i>		0.024	0.041			
海洋曲舟藻 <i>Pleurosigma pelagicum</i>	0.021					
派洛棍形藻 <i>Bacillaria paxillifera</i>	0.064	0.050		0.083		0.047
柔弱伪菱形藻 <i>P. delicatissima</i>	0.027			0.060		
三角角藻 <i>Ceratium tripos</i>			0.047			
梭角角藻 <i>C. fusus var. schuttii</i>	0.089	0.053	0.035			
大角角藻 <i>C. macroceros</i>			0.043			
透明辐杆藻 <i>Bacteriastrum hyalinum</i>	0.037	0.026				
针杆藻 <i>Synedra</i> spp.	0.076	0.061				0.024
翼根管藻印度变形 <i>R. indica</i>			0.028		0.162	0.097
中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>				0.075		

2.2 浮游植物丰度的时空分布

2.2.1 平面分布

从图 2 可以看出,调查期间,同一季度不同年份中,崂山近岸浮游植物丰度的平面分布均有不同。2016、2017 年春季,浮游植物丰度的平面分布均呈现从北部向南部逐渐减少的趋势。高值区出现在王哥庄湾一带,其数值范围为 $(44.19\sim 70.16)\times 10^4 \text{cell/m}^3$ 。2017 年 5 月,南部沿岸浮游植物细胞丰度整体大于 2016 年同期。夏季浮游植物丰度均远高于 5 月,在两年夏季中,最大峰值出现的海域不同。2016 年夏季,浮游植物东部近岸数量较大且分布较为均匀,南岸除在南窑河及石老人附近海域丰度较高外,其余整体丰度较低。2017 年夏季,浮游植物丰度分布仍呈现由北向南递减的趋势,但东部近岸水域丰度整体低于上年同期,南部浮游植物的数量分布相对较均匀,高值区出现在王哥庄、太清宫口

水域。在 2016 和 2017 年秋季,浮游植物的分布格局与春、夏季有明显的差异,南部近岸整体浮游植物丰度明显增高,与北部、东部近岸持平,高值区在南窑河与石老人海水浴场一带。综上所述,崂山近岸浮游植物丰度平面分布较密集的海区主要出现在王哥庄湾、南窑河与石老人海水浴场一带,春、夏季浮游植物丰度分布特征为北部沿岸大于南部沿岸;秋季南、北部沿岸分布较均匀。

2.2.2 季节变化

浮游植物细胞丰度季节变化明显,2016 年秋季>夏季>春季,而 2017 年夏季>春季>秋季。据中国海湾志记载(中国海湾志编纂委员会,1993),崂山湾浮游植物群落上、下半年分别出现 1 个数量高峰,宋秀凯等(2016)的调查结果与这一变化趋势相一致。由于本次只调查了 3 个季节,无法体现出双峰变化,但仍然可以看出,上半年有 1 个高峰期,且夏季浮游植物丰度大于春季。

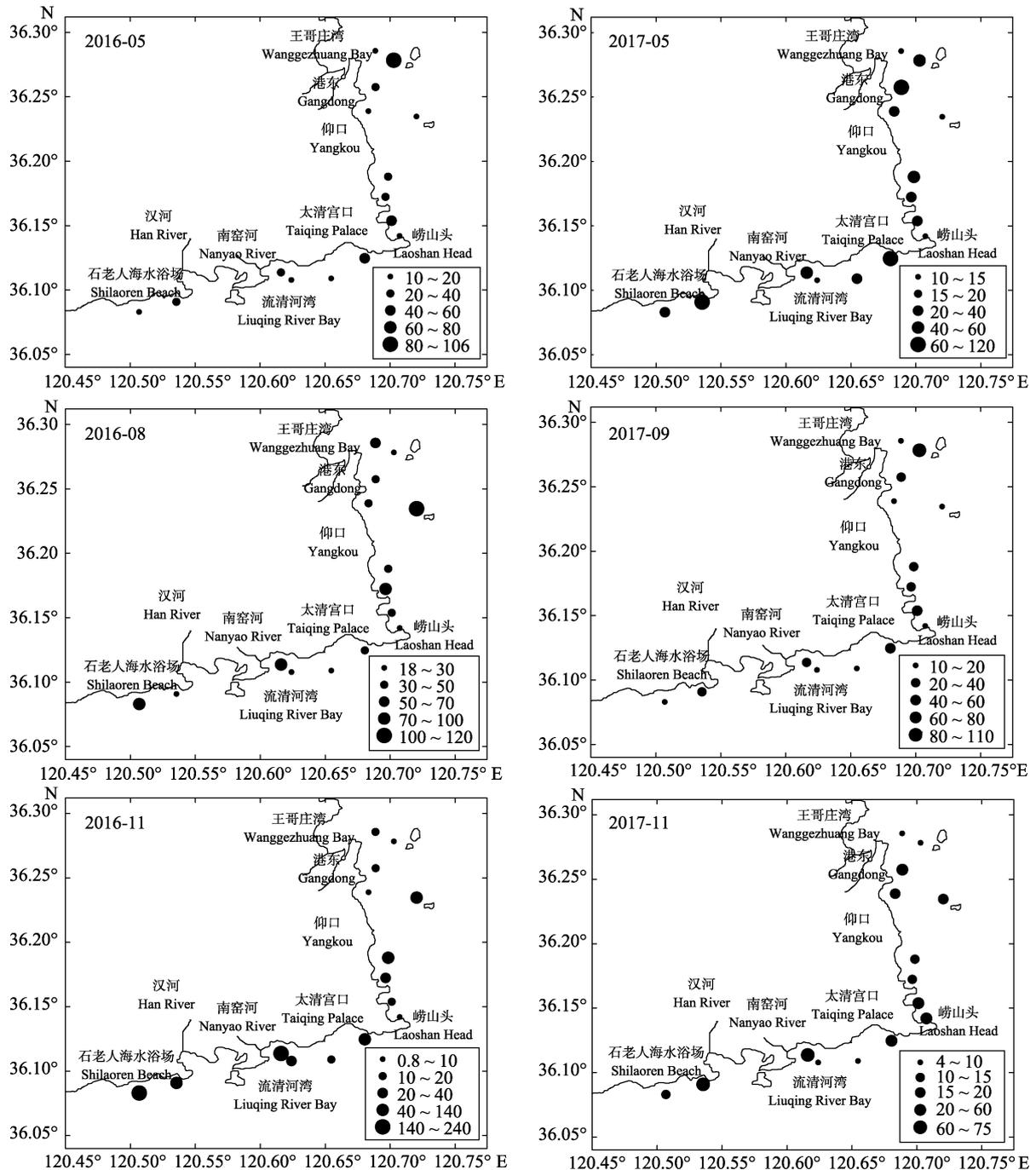


图 2 崂山近岸浮游植物丰度平面分布($\times 10^3$ cell/ m^3)

Fig.2 Horizontal distribution of cell abundance of phytoplankton in offshore area of Laoshan ($\times 10^3$ cell/ m^3)

从图 3a 可以看出, 调查海域春季的细胞丰度平均值为 496×10^4 cell/ m^3 , 略高于同处于黄海北部的胶州湾 (175×10^4 cell/ m^3) (王妍等, 2014)。此时, 甲藻数量占比达最高, 与渤海湾(周然等, 2013)、胶州湾(孙晓霞等, 2011)春季的甲藻数量增多的结论相一致。夏季细胞丰度平均值为 937×10^4 cell/ m^3 , 略高于 2012 年的调查结果 [$(200 \sim 500) \times 10^4$ cell/ m^3] (孙雪梅等, 2013)。该季节的浮游植物以硅藻为主, 丰度占总量的 95.6%~

97.0%, 甲藻占总量的 3.0%~4.4%(图 3b)。在采集到的浮游植物的总物种数中, 仍以硅藻为主, 约占总物种数的 97.0%~98.8%, 甲藻占总物种数的 1.2%~3.0%。在该季度监测期间, 浮游植物结构变化相对稳定。秋季细胞丰度平均值为 621×10^4 cell/ m^3 , 大于宋秀凯等(2016)的 2012~2014 年对崂山近岸浮游植物细胞丰度调查值 (26.6×10^4 cell/ m^3), 说明近几年浮游植物数量略有提升, 但仍远远低于胶州湾 (2900×10^4 cell/ m^3) (孙晓霞

等, 2011)与莱州湾($6623.22 \times 10^4 \text{ cell/m}^3$) (宁璇璇等, 2011)浮游植物细胞丰度值。

2.3 丰富度指数、多样性指数、均匀度指数的季节变化

Shannon-Winner 多样性指数用于判断群落结构的复杂程度(赵其彪等, 2015), 均匀度指数用于判断群落是否成熟稳定(杨晓改等, 2014)。多样性指数 >1 、均匀度指数 >0.3 , 则认为该群落多样性较好(李广楼等, 2006)。2016~2017年浮游植物群落结构参数变化情况见图4。从图4可以看出, 各季节的多样性指数平均值为1.15~2.50, 年平均值为2.16, 各月均大于1。各

季节均匀度指数的平均值为0.68~0.90, 年平均值为0.82, 各月均大于0.3。可以认为, 2016~2017年崂山近岸浮游植物群落结构较为稳定, 组成物种数较多, 生物多样性较好, 物种类生物量分布比较均匀。从全年来看, 多样性指数与均匀度指数呈现较为明显的季节变化。2016年春季多样性指数为2.46, 夏季略微升高, 达到2.50, 最低值出现在秋季, 为2.24。而2017年春季多样性指数为2.34, 夏季较春季有所下降, 为2.26, 在秋季降至最低, 为1.15。两年中均在秋季呈骤降趋势。从图4可以看出, 均匀度指数的季节变化趋势与多样性指数相同, 最低值都出现在秋季, 但季节间的差异不显著。

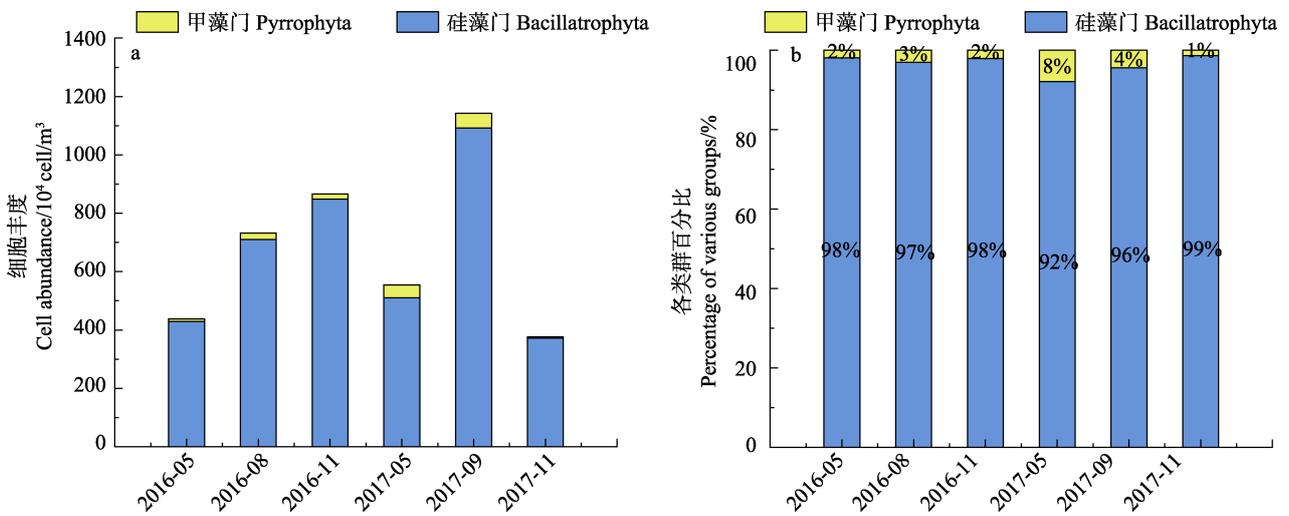


图3 2016~2017年崂山近岸浮游植物细胞丰度变化(a)与各类群数量百分比(b)

Fig.3 Variation of phytoplankton cell abundance (a), and the percentage (b) in offshore area of Laoshan in 2016 and 2017

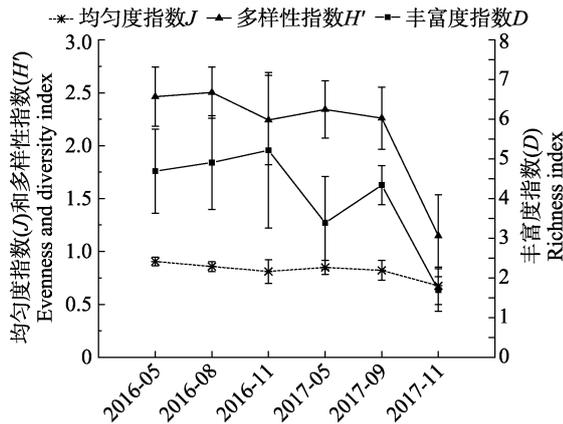


图4 2016~2017年崂山近岸丰富度指数、多样性指数、均匀度指数季节变化

Fig.4 Variation in richness index, diversity index, and evenness of phytoplankton community in offshore area of Laoshan in 2016 and 2017

从图4可以看出, 丰富度指数呈较明显的变化趋势, 反映出不同季节浮游植物种类数量差异较大。

2016年为秋季 $>$ 夏季 $>$ 春季, 而2017年丰富度指数整体下降, 最高值出现在夏季, 秋季最低。综合对比图3a与图4可以看出, 浮游植物细胞丰度与多样性指数的变化趋势一致。即在2016年3个季节都稳步上升, 浮游植物细胞丰度峰值出现在11月, 同时, 本月的丰富度指数也是全年最高值, 这与硅藻的大量繁殖有关。春季丰富度指数与多样性指数变化趋势不同, 这通常与单一藻类优势过高有关。2017年9月, 浮游植物细胞丰度、多样性指数和丰富度指数均处于高峰期, 即物种种类多、各物种多样性好、分布均匀, 这可能是因为夏季是浮游植物种类交替的季节, 从而使浮游植物呈现细胞丰度高且多样性较好的特点。

2.4 浮游植物群落结构季节变化聚类分析

不同季节浮游植物群落的聚类分析结果见图5。从图5可以看出, 浮游植物群落相似性在40%水平, 主要分为2个组群。第1组群为2017年的9、11月, 其余月份为第2组群, 在第2组群中, 2016年5月

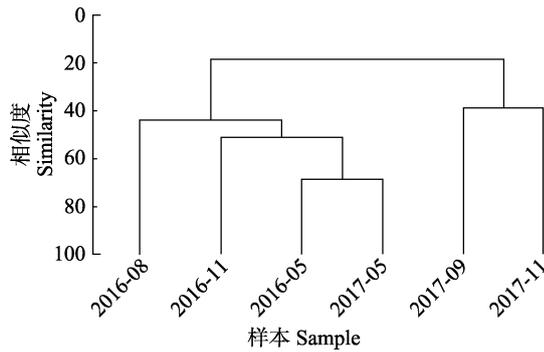


图 5 2016~2017 年崂山近岸浮游植物群落的 CLUSTER 聚类分析

Fig.5 Cluster analysis of phytoplankton community in offshore area of Laoshan in 2016 and 2017

与 2017 年 5 月相似度高达 70%。第 1 组群 2017 年 9、11 月的特征种为虹彩圆筛藻和劳氏角毛藻, 该组群种类组成以近岸广温性种为主, 外洋性种类的细胞数量在这一组群中占有一定优势。2017 年春季与夏季的相似度较低。从图 4 还可以看出, 2017 年丰富度指数 9 月明显高于 5 月。这可能是由不同藻类生长依赖于不同的影响因子所致(许海等, 2012)。如新月

菱形藻、舟形藻的主要影响因子为磷酸盐, 中肋骨条藻的主要影响因子为 COD(王欣等, 2014)。由于崂山近岸海域 5~9 月关键环境因子有所改变, 部分浮游植物因环境改变而减少或死亡, 一些适合新环境的其他浮游植物迅速生长繁殖, 从而使 5、9 月崂山近岸浮游植物群落构成相似度较低。第 2 组群中, 2016 年 5 月与 2017 年 5 月浮游植物群落组成相似度较高, 该组群的特征种为高齿状藻、虹彩圆筛藻、派洛棍形藻、梭角角藻、星脐圆筛藻等。

2.5 浮游植物群落结构与环境因子关系

崂山近岸调查环境因子的平均值见表 2。从表 2 可以看出, 温度的变化范围为 13.35℃~26.76℃, 盐度的变化范围为 31.74~32.11, DO 变化范围为 5.75~9.30 mg/L, pH 的变化范围为 7.97~8.31, COD 的变化范围为 0.36~1.27 mg/L, DIP 的变化范围为 5.75~17.53 μg/L, DIN 的变化范围为 30.28~182.44 μg/L, Chl-a 的变化范围为 0.40~1.58 μg/L。

将环境因子和浮游植物丰度进行回归统计学分析结果见表 3。从表 3 可以看出, 崂山近岸浮游植物

表 2 2016~2017 年崂山近岸水域环境参数

Tab.2 Environmental parameters in waters in offshore area of Laoshan in 2016 and 2017

日期 Date	温度 T(°C)	盐度 S	溶解氧 DO(mg/L)	pH	化学需氧量 COD(mg/L)	溶解态无机磷 DIP(μg/L)	溶解态无机氮 DIN(μg/L)	氮磷比 N:P	叶绿素 a Chl-a(μg/L)
2016-05	15.29	32.05	7.77	8.24	0.63	11.77	97.77	8.31	1.58
2016-08	26.76	31.74	6.04	8.09	0.96	5.75	84.65	14.71	1.50
2016-11	15.79	32.08	9.30	8.30	0.36	17.53	182.44	10.41	0.53
2017-05	13.35	31.94	8.15	8.00	0.65	13.06	30.28	2.32	0.40
2017-09	24.93	32.11	5.75	7.97	0.93	7.81	102.58	13.14	0.46
2017-11	18.25	32.02	7.40	8.31	1.27	12.63	76.82	6.08	0.48

表 3 2016~2017 年崂山近岸浮游植物群落与环境因子的相关关系

Tab.3 The Pearson correlation between phytoplankton community and environmental factors in offshore area of Laoshan in 2016 and 2017

因子 Factor	Spearman 相似性系数 Spearman similarity coefficient	相关性最高因子 Most relevant factor
单因子组 Single factor group	0.536	化学需氧量 COD
双因子组 Two-factor group	0.411	pH, 化学需氧量 COD
	0.400	化学需氧量 COD, 无机氮 DIN
	0.321	溶解氧 DO, 化学需氧量 COD
三因子组 Three-factor group	0.393	pH, 化学需氧量 COD, 无机氮 DIN
	0.382	溶解氧 DO, pH, 化学需氧量 COD
	0.293	pH, 化学需氧量 COD, 无机磷 DIP
	0.275	盐度 S, pH, 化学需氧量 COD
四因子组 Four-factor group	0.271	溶解氧 DO, pH, 化学需氧量 COD, 无机磷 DIP
	0.268	溶解氧 DO, pH, 化学需氧量 COD, 叶绿素 a Chl-a

细胞丰度的变化与 COD 的相关性最高, 相关系数为 0.536。产生主要影响的双因子组为 pH 与 COD, 相关系数为 0.411; COD 与 DIN, 相关系数为 0.400; DO 与 COD, 相关系数为 0.321。

COD 是评价水质污染常用的指标, 大致反映了水体中有机质的含量(王欣等, 2014)。调查期间, COD 呈明显的季节变化。孙伟等(2016)研究表明, 崂山近岸 COD 浓度主要受海流扩散及浮游植物消耗影响。2017 年秋季, COD 高值原因可能是该季度风力较强, 海流扩散作用高于其他季度所致。此外, 王哥庄湾、南窑河、石老人海水浴场一带由于径流入海, COD 陆源排放量较大, 藻类更适应在富含有机颗粒营营养物质水体中生长, 因此, 细胞丰度较高。

在本次调查中, 海水环境是主要测定参数之一, pH 的变化范围较大, 一年中最低值出现在夏季, 最高值出现在秋季, 而海洋环境是弱酸、弱碱及盐形成的体系, 海水中 pH 的高低很大程度上影响生物的代谢过程。近岸的营养盐主要来源于降水及生活废水排海、沉积物再悬浮释放和周边海域的补充(过锋等, 2015)。夏季风力较弱, 海底沉积物悬浮释放量相对较少, 且洋流扩散作用弱, 使外海对崂山近岸海域营养盐补给量小(孙伟等, 2016), 因此, 夏季 N、P 营养盐含量低于其他季节。浮游植物是水域中 DO 的供应者, 一般浮游植物大量繁殖时, 水中 DO 含量增高, 但同时 DO 与温度呈负相关, 水温升高使海洋动物生长繁殖加快, 消耗大量的 DO(刘长东等, 2016), 因此, 夏季虽有浮游植物补充 DO 含量, 但总体消耗量较大, 导致海水 DO 含量较低。

结合聚类分析可以看出, 环境因子的改变使浮游植物的群落结构受到扰动, 进而造成群落相似性的改变。硅藻等能适应较高 pH、COD 环境, 与 DO 表现出负相关(王华等, 2016), 如中肋骨条藻、卡氏角毛藻、薄壁几内亚藻等(朱旭宇等, 2017)。角毛藻、柔弱角毛藻、旋链角毛藻与 pH 和 DO 呈显著正相关, 与 COD 呈显著负相关(罗先香等, 2018), 由此可见, 环境因子与浮游植物群落结构关系密切, 在实际应用中可通过监控环境因子的变化预测浮游植物种群的分布情况, 为贝类资源增殖放流确定合理时间与地点。

3 结论

2016~2017 春、夏、秋 3 个季节共检出浮游植物 2 门 31 属 69 种, 硅藻门 25 属 60 种, 甲藻门 6 属 9 种。浮游植物优势种随季节变化明显, 春季的主要优势种为虹彩圆筛藻、梭角角藻、星脐圆筛藻等; 夏季

主要优势种有虹彩圆筛藻、劳氏角毛藻、柔弱伪菱形藻等; 秋季主要优势种有虹彩圆筛藻、卡氏角毛藻、星脐圆筛藻等, 3 个季节优势种交替明显。

浮游植物细胞丰度年内变化明显, 2016 年最高峰出现在秋季, 次高峰为夏季, 2017 年最高峰出现在夏季, 次高峰为秋季。在调查中, 崂山近岸海域的浮游植物多样性指数和丰富度指数均较好, 群落结构比较稳定。

浮游植物群落结构聚类分析结果显示, 相似度在 40% 水平聚类为 2 大类群, 其中, 相似度为 70% 水平的为 2016 年 5 月和 2017 年 5 月, 这可能与 2016 年 5 月和 2017 年 5 月的关键环境因子 COD 变化不大相关。

对环境因子和浮游植物丰度进行相关性分析, 结果显示, 浮游植物丰度最主要的环境影响因子为 COD, 相关系数为 0.536, 相关的双因子为 pH 与 COD 组、COD 与 DIN 组和 DO 与 COD 组。

参 考 文 献

- Chen BJ, Chen JF, Cui Y, *et al.* The ecological characteristics of phytoplankton in the Eastern marineculture area of Laizhou Bay. *Marine Fisheries Research*, 2001, 22(3): 64-70 [陈碧鹃, 陈聚法, 崔毅, 等. 莱州湾东部养殖区浮游植物的生态特征. *渔业科学进展*, 2001, 22(3): 64-70]
- China Gulf Records Compilation Committee. China gulf records-volume 4-southern Shandong Peninsula and gulf of Jiangsu Province. Beijing: Ocean Press, 1993 [中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志-第四分册-山东半岛南部和江苏省海湾, 北京: 海洋出版社 1993]
- Guo F, Chen JF, Qu KM, *et al.* Analysis and evaluation on nutritional status and organic pollution condition in the southern offshore area of Huangdao District of Qingdao City. *Progress in Fishery Sciences*, 2015, 36(4): 44-50 [过锋, 陈聚法, 张艳, 等. 黄岛区南部海域营养水平和有机污染状况分析与评价. *渔业科学进展*, 2015, 36(4): 44-50]
- Guo SJ, Li YQ, Zhang CX, *et al.* Phytoplankton community in the Bohai Sea and its relationship with environmental factors. *Marine Science Bulletin*, 2014, 33(1): 95-105 [郭术津, 李彦翘, 张翠霞, 等. 渤海浮游植物群落结构及与环境因子的相关性分析. *海洋通报*, 2014, 33(1): 95-105]
- Li GL, Chen BJ, Cui Y, *et al.* Ecological characteristics of phytoplankton in the Laizhou Bay. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2006, 13(2): 292-299 [李广楼, 陈碧鹃, 崔毅, 等. 莱州湾浮游植物的生态特征. *中国水产科学*, 2006, 13(2): 292-299]
- Liu CD, Yi J, Guo XF, *et al.* Phytoplankton community structure in artificial reef are around Lidao, Rongcheng, and its relationship with environmental factors. *Periodical of Ocean University of China (Natural Science)*, 2016, 46(3): 50-59

- [刘长东, 易坚, 郭晓峰, 等. 荣成俚岛人工鱼礁区浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2016, 46(3): 50–59]
- Luo XX, Shan Y, Yang JQ. Distribution of phytoplankton community and its relationship with water environment in the Yellow River Estuary. *Periodical of Ocean University of China(Natural Science)*, 2018, 48(4): 16–23 [罗先香, 单宇, 杨建强. 黄河口及邻近海域浮游植物群落分布特征及与水环境的关系. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2018, 48(4): 16–23]
- Margalef DR. *Perspectives in ecological theory*. Chicago: University of Chicago Press, 1968, 1–111
- Ning XX, Ji L, Wang G, *et al.* Phytoplankton community in the nearshore waters of Laizhou Bay in 2009. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2011(3): 97–104 [宁璇璇, 纪灵, 王刚, 等. 2009 年莱州湾近岸海域浮游植物群落的结构特征. 海洋湖沼通报, 2011(3): 97–104]
- Pielou EC. *An introduction to mathematical ecology*. New York: Wiley-Inter-Science, 1969
- Qiao R, Luan QS, Wang J, *et al.* Distribution and controlling environmental factors of phytoplankton communities in the Laoshan Bay during spring in 2013. *Marine Sciences*, 2015, 39(7): 13–21 [乔芮, 栾青杉, 王俊, 等. 2013 年春季崂山湾浮游植物群落及其环境控制. 海洋科学, 2015, 39(7): 13–21]
- Shannon PT, Stroupe E, Tory EM. Batch and continuous thickening. *Basic theory. Solids flux for rigid spheres. Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals*, 1963, 3(2): 203–211
- Sun W, Tang XC, Xu YD, *et al.* Characteristics of nutrient sand eutrophication assessment of the Laoshan Bay, Qingdao. *Transactions of Oceanology and Limnology*, 2016(6): 47–54 [孙伟, 汤宪春, 徐艳东, 等. 青岛崂山湾营养盐分布特征及富营养化评价. 海洋湖沼通报, 2016(6): 47–54]
- Song XK, Tang XC, Cheng L, *et al.* Spatio-temporal distribution of net-collected phytoplankton and its relationship with environmental factors in Laoshan Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2016, 47(6): 1205–1213 [宋秀凯, 汤宪春, 程玲, 等. 崂山湾网采浮游植物时空分布特征及其与环境因子关系. 海洋与湖沼, 2016, 47(6): 1205–1213]
- Sun XM, Xia B, Guo F, *et al.* Structure characteristics of phytoplankton community and the relationship with environmental factors in offshore area of Laoshan, Qingdao. *Progress in Fishery Sciences*, 2013, 34(3): 46–53 [孙雪梅, 夏斌, 过锋, 等. 青岛崂山近岸海域浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 渔业科学进展, 2013, 34(3): 46–53]
- Sun XX, Sun S, Wu YY, *et al.* Long-term changes of phytoplankton community structure in the Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2011, 42(5): 639–646 [孙晓霞, 孙松, 吴玉霖, 等. 胶州湾网采浮游植物群落结构的长期变化. 海洋与湖沼, 2011, 42(5): 639–646]
- Wang H, Yang SP, Fang CZ, *et al.* Canonical correspondence analysis of relationship between characteristics of phytoplankton community and environmental factors in Dianchi Lake. *China Environmental Science*, 2016, 36(2): 544–552 [王华, 杨树平, 房晟忠, 等. 滇池浮游植物群落特征及与环境因子的典范对应分析. 中国环境科学, 2016, 36(2): 544–552]
- Wang WH, Wu SY, Feng AP. Discussion on healthy bay and index for bay health. *Coastal Engineering*, 2011, 30(3): 90–97 [王文海, 吴桑云, 丰爱平. 试论健康海湾与海湾健康指标. 海岸工程, 2011, 30(3): 90–97]
- Wang X, Sheng HX, Tang YL, *et al.* Relationships between the structure of phytoplankton community and environmental factors in three artificial reef areas of Laoshan Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2014, 35(4): 7–12 [王欣, 盛化香, 唐衍力, 等. 崂山湾人工鱼礁区浮游植物群落结构与环境因子的关系. 渔业科学进展, 2014, 35(4): 7–12]
- Wang Y, Zhang Y, Wang YY, *et al.* Spatial and temporal characteristics of phytoplankton and its relation with the environmental factors in Jiaozhou Bay. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(1): 163–170 [王妍, 张永, 王玉珏, 等. 胶州湾浮游植物的时空变化特征及其与环境因子的关系. 安全与环境学报, 2013, 13(1): 163–170]
- Xu H, Qin BQ, Zhu GW. Nutrient limitation of cyanobacterial growth in different regions of Lake Taihu in summer. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2230–2236 [许海, 秦伯强, 朱广伟. 太湖不同湖区夏季蓝藻生长的营养盐限制研究. 中国环境科学, 2012, 32(12): 2230–2236]
- Yang XG, Xue Y, Zan XX, *et al.* Community structure of phytoplankton in Haizhou Bay and adjacent waters and its relationships with environmental factors. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(7): 2123–2131 [杨晓改, 薛莹, 咎肖肖, 等. 海州湾及其邻近海域浮游植物群落结构及其与环境因子的关系. 应用生态学报, 2014, 25(7): 2123–2131]
- Yu X, Li XL, Yang JL, *et al.* Study on the community changes of phytoplankton in scallop culture area of Laizhou Bay. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(18): 65–70 [于潇, 李希磊, 杨俊丽, 等. 莱州湾扇贝养殖区浮游植物的群落变化研究. 安徽农业科学, 2018, 46(18): 65–70]
- Zhou H, Zhang ZN. Rationale of the multivariate statistical software PRIMER and its application in benthic community ecology. *Journal of Ocean University of Qingdao(Natural Science)*, 2003, 33(1): 58–64 [周红, 张志南. 大型多元统计软件 PRIMER 的方法原理及其在底栖群落生态学中的应用. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, 33(1): 58–64]
- Zhao QB, Sun J, Li D, *et al.* Seasonal changes of the phytoplankton along hypoxia area and adjacent waters in the East China Sea. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(7): 2366–2379 [赵其彪, 孙军, 李丹, 等. 东海低氧区及邻近水域浮游植物的季节变化. 生态学报, 2015, 35(7): 2366–2379]
- Zhou R, Peng ST, Qin XB, *et al.* Phytoplankton assemblages and their relation to environmental factors by multivariate

statistic analysis in Bohai Bay. *Environmental Science*, 2013, 13(1): 864–873 [周然, 彭士涛, 覃雪波, 等. 渤海湾浮游植物与环境因子关系的多元分析. *环境科学*, 2013, 13(1): 864–873]

Zhu XY, Xu HH, Xu X, *et al.* Community composition of net-

collected phytoplankton and its relation to environmental factors near Lianyungang sea area. *Journal of Applied Oceanography*, 2017, 36(3): 387–394 [朱旭宇, 许海华, 许娴, 等. 连云港邻近海域网采浮游植物分布特征及其影响因素. *应用海洋学学报*, 2017, 36(3): 387–394]

(编辑 陈 严)

Seasonal Variations in the Phytoplankton Community Structure and Their Environmental Impact Factors in the Offshore Area of Laoshan, Qingdao

CHAI Ran^{1,2}, FENG Juan¹, CHEN Bijuan^{2,3}, XIA Bin^{2,3}, SUN Xuemei^{2,3①},
WANG Xiaoxiao⁴, CHEN Jufa², CUI Zhengguo², QU Keming²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071; 2. Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory of Sustainable Development of Marine Fisheries, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Qingdao 266071; 3. Marine Ecology and Environmental Science Laboratory, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 4. Qingdao Laoshan Marine and Fisheries Bureau, Qingdao 266106)

Abstract To explore the seasonal variations in the phytoplankton community structure and their relationship with environmental factors in the offshore area of Laoshan, we designed 15 monitoring stations and made six investigative voyages in the spring, summer, and autumn during 2016~2017 while monitoring other environmental factors simultaneously. We detected 69 species belonging to 31 genera and two phyla of phytoplankton, most of which belong to temperate coastal species. Diatoma was the dominant phylum comprising 25 genera and 60 species, and dinoflagellates comprised 6 genera and 9 species. The seasonal variations in the dominant species were obvious. The most dominant species were *Coscinodiscus oculus-iridis*, *Coscinodiscus asteromphalus*, and *Ceratium fusus*. The total number of phytoplankton ranged from 732.10×10^4 to 1142.19×10^4 cell/m³, with an average of 937.15×10^4 cell/m³. The number of phytoplankton cells changed significantly during the year. The highest peak in 2016 appeared in autumn and the second highest peak in summer; the highest peak in 2017 appeared in summer and the second highest peak in autumn. The spatial distribution showed a decreasing trend from north to south, and the high-value areas appeared in Wanggezhuang Bay, Nanyao River, and Shilaoren Beach. The diversity and abundance of phytoplankton in the surveyed area are at a high level, and the phytoplankton community structure in this area is relatively stable, indicated by the analysis of the phytoplankton community structure index. The result of cluster analysis showed that the interannual variations in phytoplankton cell abundance are unobvious in spring, and the similarity is approximately 70% both in 2016 and 2017. However, the interannual variations in phytoplankton cell abundance are relatively obvious in summer and autumn, and the similarity is only approximately 40%, which is mainly related to environmental factors. The correlation analysis between phytoplankton community structure and environmental factors showed that the correlation coefficient between cell abundance average and COD is the highest (0.536) and the two factors that were most related to environmental factors were pH and COD, COD and DIN, and DO and COD. Therefore, the key limiting factors for phytoplankton cell abundance in the offshore area of Laoshan are COD, pH, DIN, and DO.

Key words Phytoplankton; Offshore area of Laoshan; Community structure; Environmental factors

① Corresponding author: SUN Xuemei, E-mail: sunxm@ysfri.ac.cn