

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200130001

http://www.yykxjz.cn/

侯兴, 高亚平, 杜美荣, 姜妮妮, 李凤雪, 董世鹏, 李文豪, 孟珊, 王军威, 张义涛, 蒋增杰. 桑沟湾浮游植物群落结构时空变化特征及影响因素. 渔业科学进展, 2021, 42(2): 18–27

Hou X, Gao YP, Du MR, Jiang WW, Li FX, Dong SP, Li WH, Meng S, Wang JW, Zhang YT, Jiang ZJ. Temporal and spatial variation in phytoplankton community structure and their relationship with environmental factors in Sanggou Bay. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(2): 18–27

桑沟湾浮游植物群落结构时空变化 特征及影响因素*

侯兴^{1,2} 高亚平² 杜美荣² 姜妮妮² 李凤雪² 董世鹏^{1,2}
李文豪^{1,2} 孟珊^{1,2} 王军威⁴ 张义涛⁴ 蒋增杰^{2,3①}

(1. 上海海洋大学水产与生命学院 上海 201306; 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渔业科学
与食物产出过程功能实验室 青岛 266071; 4. 荣成楮岛水产有限公司 荣成 264312)

摘要 为了解北方典型养殖海湾——桑沟湾水域浮游植物群落结构的时空变化特征及其影响因素,于2017年4月(春季)、7月(夏季)、11月(秋季)和2018年1月(冬季)对桑沟湾水域21个站点进行4个航次的大面调查。结果显示,调查期间,该湾共采集到浮游植物31属51种,其中,硅藻(Diatom)24属43种,甲藻(Dinoflagellate)3属4种,绿藻(Chlorophyta)2属2种,金藻(Chrysophyta)2种,蓝藻(Cyanophyta)1种。按照季节划分,春季22种,夏季20种,秋季23种,冬季20种。优势度指数分析结果表明,硅藻是绝对优势种,其中,具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*)为全年优势种,数量百分比在18.6%~84.9%之间。浮游植物细胞丰度在 $0.16 \times 10^3 \sim 12.20 \times 10^3$ 个/L之间,表现为冬季>春季>秋季>夏季。物种多样性指数(Shannon)范围为0.69~1.35,物种均匀度指数 J (Pielou)范围为0.42~0.70。磷酸盐是桑沟湾浮游植物生长的主要限制营养盐。研究结果揭示了桑沟湾养殖水域浮游植物的时空变化特征,为深入认识养殖生态系统的结构和功能提供了基础数据。

关键词 浮游植物; 群落结构; 营养盐; 滤食性贝类; 桑沟湾

中图分类号 Q-9 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)02-0018-10

浮游植物是海洋生态系统中最重要的高级生产者,在海洋生态系统的物质循环和能量流动过程中发

* 青岛海洋科学与技术国家实验室主任基金(QNLM201707)、山东省支持青岛海洋科学与技术试点国家实验室重大科技专项(2018SDKJ0502)、中国水产科学研究院基本科研业务费(2020TD50)、青岛海洋科学与技术试点国家实验室海洋渔业科学与食物产出过程功能实验室渔业科技青年人才计划项目(2018-MFS-T13)、山东省泰山学者青年专家计划项目(tsqn201909166)和国家现代农业产业技术体系养殖容量评估与管理岗位(CARS-49)共同资助 [This work was supported by Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology (QNLM201707), Marine S&T Fund of Shandong Province for QNLM (2018SDKJ0502), Central Public-Interest Scientific Institution Basal Research Fund, CAFS (2020TD50), Youth Talent Program Supported by Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, QNLM (2018-MFS-T13), the Young Taishan Scholars Program of Shandong Province (tsqn201909166), and China Modern Agro-Industry Technology Research System (CARS-49)]. 侯兴, E-mail: houxing_up@163.com

① 通讯作者: 蒋增杰, 研究员, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2020-01-30, 收修改稿日期: 2020-02-15

挥着重要作用。我国是世界贝类养殖第一大国,牡蛎、贻贝、扇贝、蛤仔等滤食性贝类是海水贝类养殖的主要种类,作为滤食性贝类主要的食物来源,浮游植物的群落结构和多样性研究对于滤食性贝类养殖业的健康可持续发展具有重要的指导意义。

桑沟湾位于山东省荣成市,水域面积约为 144 km²,平均水深约为 7.5 m,是我国北方典型的规模化养殖海湾(Fang *et al*, 2016),主要养殖对象为长牡蛎(*Crassostrea gigas*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)及海带(*Saccharina japonica*)等。自 20 世纪 80 年代发展至今,桑沟湾形成了规模化的多营养层次综合养殖模式:由湾内到湾外依次为贝类养殖区、贝类海带综合养殖区、海带养殖区,并且海带养殖区已经扩展到了湾口外的大片区域(郝林华等, 2012)。近些年来,对桑沟湾浮游植物的种类组成、数量分布、季节变化、多样性特征、光合色素特征等进行了研究(毛兴华等, 1988; 刘慧等, 2003; 宋洪军等, 2007; 李超伦等, 2010; 王晓敏, 2017),但规模化养殖水域的生态环境条件随不同年份养殖活动的强弱变化响应不同,阶段性开展养殖区的浮游植物结构组成研究对于持续掌握养殖水域饵料基础条件的变化趋势非常必要。因

此,本研究于 2017 年 4 月~2018 年 1 月,对桑沟湾水域进行 4 个航次的大面调查,结合历史数据,分析了浮游植物群落结构和环境因子基础数据的时空变化特征、潜在成因及长期变化趋势,研究结果可为深入认识桑沟湾规模化海水养殖活动的资源环境效应提供数据支撑。

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理方法

于 2017 年 4 月(春季)、7 月(夏季)、11 月(秋季)及 2018 年 1 月(冬季)在桑沟湾(122.48°~122.64°E, 37.04°~37.15°N)进行 4 个季度的大面调查,共设置 21 个站位(图 1),覆盖桑沟湾贝类养殖区、海带养殖区和贝藻综合养殖区。其中,站点 1、2+、4+ 为外海区,站点 2、3、4 为海带区,站点 5、6、7、10、11、12 为贝藻综合养殖区,站点 8、9、14、15、16、18、19 为贝类区养殖,站点 13 为沿岸区。对各站点进行浮游植物群落调查并开展水质指标检测调查,水质理化指标包括水温(*T*)、pH、盐度(*S*)、溶解氧(*DO*)、透明度(*SD*)、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 PO₄³⁻-P 等。

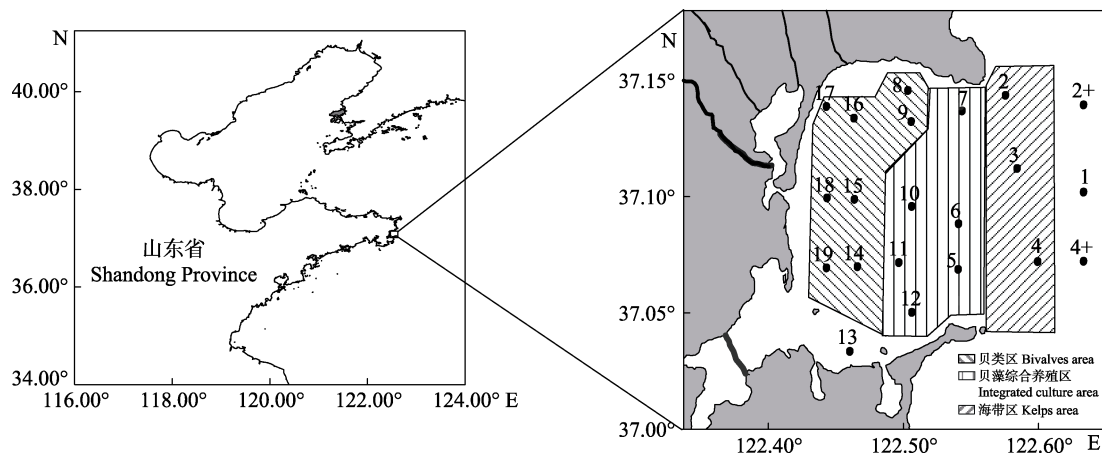


图 1 桑沟湾水域调查站位分布

Fig.1 Location of sampling station in the Sanggou Bay

温度、pH、盐度和溶解氧使用经标定后的便携式水质分析仪(美国 YSI 公司, Professional Plus)现场测定,SD 采用透明度盘现场测定。使用 Niskin 采水器采集距表层 0.2 m 处水样,2.5 L 用于浮游植物的鉴定和计数,使用 5% 的甲醛溶液固定保存,运回实验室后观察。同时,另取 2.5 L 水样用于营养盐测定,测定方法按照《海洋调查规范》(GB12763-2007)中的要求进行:经 0.45 μm 醋酸纤维滤膜过滤后,分别采用次溴酸钠氧化法、锌镉还原法、重氮偶氮法和磷钼蓝法测定 NH₄⁺-N、NO₃⁻-N、NO₂⁻-N 和 PO₄³⁻-P。

1.2 数据处理与分析

群落优势种选用 McNaughton 优势度指数(*Y*) (*Y*>0.02 为优势种),物种多样性指数采用 Shannon-Wiener 多样性指数(*H'*),物种均匀度指数采用 Pielou 指数(*J*),计算公式分别为:

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i \quad (1)$$

$$J = \frac{H'}{\log_2 S} \quad (2)$$

$$H' = -\sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (3)$$

式中, Y 为优势度, n_i 为第 i 个种的丰度, N 为样品的总丰度, f_i 为该种的站位出现频率。 H' 为生物多样性指数, S 为样品中的种类总数, P_i 为第 i 种的个体数与总个体数的比值。

数据处理采用 Excel 2016, 站位图绘制采用 Surfer 12.0 软件, 数据统计分析采用 SPSS 19.0 软件, 进行 Pearson 相关性分析。

2 结果与分析

2.1 表层海水主要理化环境参数时空变化特征

桑沟湾水域主要水质参数见表 1。表层水温的年变化范围为 9.14℃~22.40℃, 其中, 冬季温度较低。

溶解氧的年平均值为 8.80 mg/L, 冬季溶解氧含量较高; pH 的年变化范围为 7.84~8.16, 春季 pH 较低。盐度的年平均变化范围为 31.8~32.7, 季节变化不大。透明度的年平均变化范围为 0.88~2.90 m, 其中, 夏季透明度较高, 春季较低。

2.2 表层海水浮游植物群落结构时空变化特征

2.2.1 浮游植物的种类组成 本研究鉴定的浮游植物属于硅藻(Diatom)、蓝藻(Cyanophyta)、绿藻(Chlorophyta)、甲藻(Dinoflagellate)、金藻(Chrysophyta)等 5 个门类, 共计 31 属 5 种。硅藻 24 属 43 种, 其中, 圆筛藻属(*Coscinodiscus*)和角毛藻属(*Chaetoceros*)种类最多, 各为 6 种。甲藻 3 属 4 种, 绿藻 2 属 2 种, 金藻 2 种, 蓝藻 1 种。种类多属温带近岸广布种, 但种类组成上存在季节性演替。

表 1 桑沟湾主要水质参数

Tab.1 Main parameters of water quality in Sanggou Bay

参数 Parameters	季节 Season			
	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
水温 T (°C)	9.26±2.37	22.40±3.13	14.14±1.01	3.51±1.27
溶解氧 DO (mg/L)	—	7.41±0.21	8.16±0.51	10.84±0.52
pH	7.84±0.13	8.02±0.08	8.06±0.09	8.16±1.30
盐度 Salinity	32.31±0.03	31.85±0.08	32.02±0.16	32.72±0.08
透明度 SD (m)	0.88±0.64	2.90±1.50	1.47±0.84	1.49±1.23
NH_4^+ -N ($\mu\text{mol/L}$)	1.73±0.63	3.14±1.53	3.81±1.63	3.02±1.26
NO_2^- -N ($\mu\text{mol/L}$)	0.28±0.05	0.35±0.04	1.86±0.28	0.86±0.15
NO_3^- -N ($\mu\text{mol/L}$)	2.34±1.18	5.64±4.87	7.92±2.69	7.63±1.95
DIN ($\mu\text{mol/L}$)	4.35±1.24	8.80±2.01	13.59±3.27	11.52±3.11
PO_4^{3-} -P ($\mu\text{mol/L}$)	0.26±0.21	0.13±0.12	0.21±1.17	0.38±0.27

如表 2 所示, 桑沟湾浮游植物优势种明显, 优势种在各个季节中既有交叉又有演替, 从每个季节来看, 通常有 2~4 种优势种, 且皆为硅藻类, 从全年来看, 优势种占据了全部浮游植物 69.3%~89.5% 的数量。其中, 具槽帕拉藻在 4 个季节中均为优势种, 平均密度在 $0.24 \times 10^3 \sim 3.89 \times 10^3$ 个/L 之间, 各站位数量百分比在 18.6%~84.9% 之间, 特别是春季, 具槽帕拉藻占据绝对优势。夏季, 角毛藻属优势种较多, 数量百分比达到 35.8%。另外, 奇异菱形藻(*Nitzschia paradoxa*)、小环藻(*Cyclotella* sp.)在秋季和冬季均为优势种。

桑沟湾出现的甲藻为大角角藻(*Ceratium macroceros*)、三角角藻(*C. tripos*)、夜光藻(*Noctiluca scintillans*)、透明原多甲藻(*Protoperidinium*), 各季节平均浓度在 $0 \sim 0.02 \times 10^3$ 个/L 之间; 金藻为球等边金藻(*Isochrysis galbana*)、小等刺硅鞭藻(*Dictyocha fibula*), 各站季节平均浓度在 $0 \sim 0.13 \times 10^3$ 个/L 之间;

绿藻为单角盘星藻(*Pediastrum simplex*)、二形栅藻(*Scenedesmus dimorphus*), 各季节平均浓度在 $0 \sim 0.13 \times 10^3$ 个/L 之间; 蓝藻为卷曲鱼腥藻(*Anabaena circinalis*), 各季节平均浓度在 $0 \sim 0.48 \times 10^3$ 个/L 之间。与往年的优势种相比, 中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、针杆藻(*Synedra* sp.)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)等往年出现的优势种在本年度只是少量出现, 而具槽帕拉藻、角毛藻、菱形藻、圆筛藻则是常年出现的优势种。

2.2.2 浮游植物的丰度分布 如图 2 所示, 春季浮游植物细胞丰度在 $0.28 \times 10^3 \sim 10.48 \times 10^3$ 个/L 之间, 平均值为 4.44×10^3 个/L, 共发现 22 种藻类, 其中, 硅藻占 99.7%, 甲藻占 0.3%, 具槽帕拉藻为主要优势种, 占 84.9% 的数量。春季的浮游植物高值区出现在湾内东南区, 丰度以该区域为中心向湾内及湾外递减。

夏季浮游植物细胞在 $0.16 \times 10^3 \sim 6.60 \times 10^3$ 个/L 之

表 2 桑沟湾浮游植物优势种组成
Tab.2 The dominant species of phytoplankton in Sanggou Bay

季节 Season	优势种 Dominant species	优势度 Dominance	平均密度 Average density ($\times 10^3$ cells/L)	数量百分比 Quantity percentage (%)	
				单种 Single	合计 Total
春季 Spring	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.679	3.77	84.9	89.5
	圆筛藻 <i>Coscinodiscus</i> sp.	0.037	0.21	4.6	
夏季 Summer	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	0.192	0.66	38.5	69.3
	扭链角毛藻 <i>Chaetoceros tortissimus</i>	0.050	0.28	16.7	
	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.042	0.24	14.1	
秋季 Autumn	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.335	1.62	41.9	77.3
	奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i>	0.147	0.63	16.3	
	柔弱几内亚藻 <i>Guinardia delicatula</i>	0.060	0.58	15.0	
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.029	0.16	4.1	
冬季 Winter	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	0.363	3.89	58.1	77.4
	小环藻 <i>Cyclotella</i> sp.	0.047	0.36	5.4	
	曲舟藻 <i>Pleurosigma</i> sp.	0.036	0.65	9.7	
	奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i>	0.032	0.29	4.2	

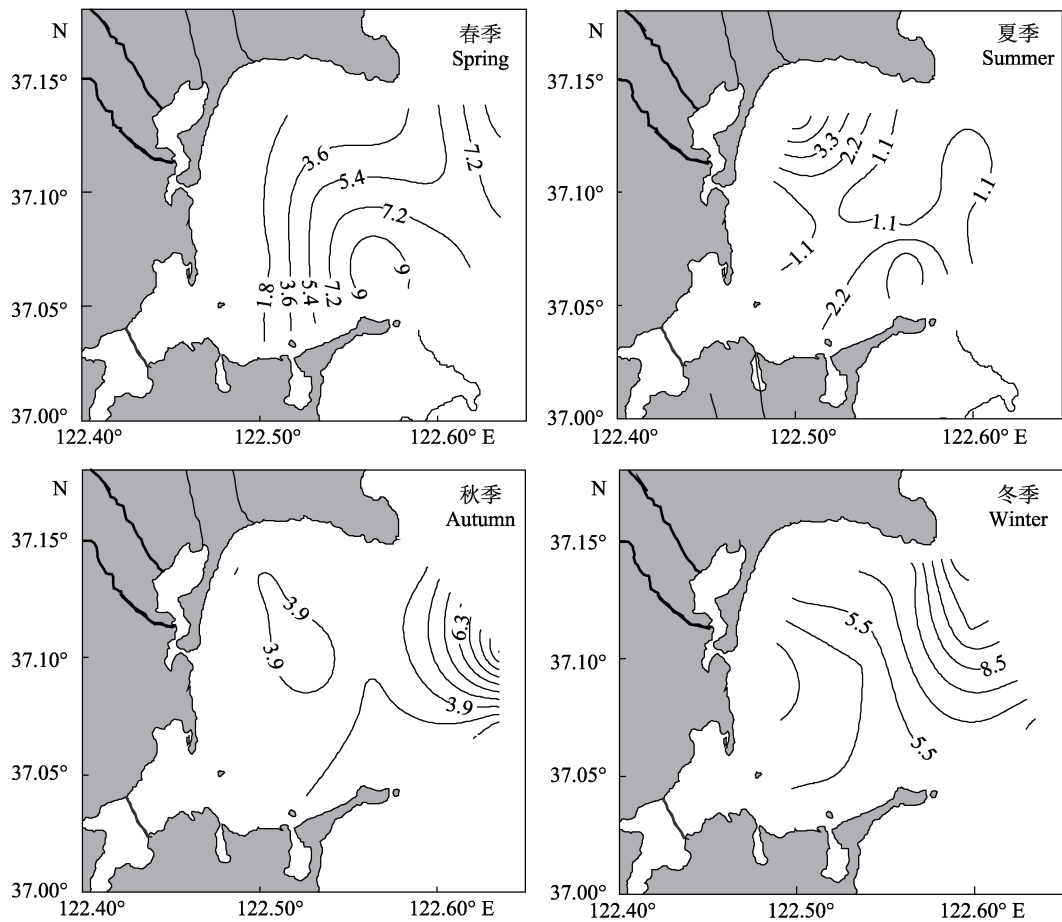


图 2 桑沟湾浮游植物细胞数量丰度($\times 10^3$ 个/L)分布的季节变化
Fig.2 Seasonal variation of the abundance of phytoplankton cells ($\times 10^3$ cells/L) in Sanggou Bay

间, 平均值为 1.70×10^3 个/L, 共发现 20 种藻类, 其中, 硅藻占 99.8%, 蓝藻占 0.2%, 旋链角毛藻

(*Chaetoceros curvisetus*) 是主要优势种, 占 38.5% 的数量。夏季出现 2 个浮游植物高值区, 其中一个与春季

位置相似,出现在湾内东南区,另一个出现在湾西北区,丰度从这2个区域向湾中部和湾外递减。

秋季浮游植物细胞丰度在 $1.5 \times 10^3 \sim 9.8 \times 10^3$ 个/L 之间,平均值为 3.87×10^3 个/L,共发现 29 种藻类,硅藻占 96.9%,蓝藻占 2.7%,具槽帕拉藻为主要优势种,占 41.9% 的数量。秋季丰度高值区在湾外外海区,丰度自东向西逐渐递减。

冬季浮游植物细胞丰度在 $2.8 \times 10^3 \sim 12.2 \times 10^3$ 个/L 之间,平均值为 6.69×10^3 个/L,共发现 29 种藻类,其中,硅藻占 89.0%,蓝藻占 7.1%,绿藻占 3.7%,具槽帕拉藻为主要优势种,占 58.1% 的数量,除去具槽

帕拉藻的浮游植物丰度在 $0.7 \times 10^3 \sim 6.4 \times 10^3$ 个/L 之间。冬季丰度高值区出现在湾外东北侧外海区,丰度向湾内逐渐递减。

2.2.3 浮游植物的物种多样性 桑沟湾水域年平均浮游植物多样性指数为 1.01。如图 3 所示,春季多样性指数在 0.29~1.55 之间,平均值为 0.69,自西北向东南方向递减;夏季多样性指数在 0.35~1.48 之间,平均值为 1.03,自西向东递减;秋季多样性指数在 0.89~1.90 之间,平均值为 1.35,自西南向东北递减;冬季多样性指数在 0.47~1.53 之间,平均值为 0.96,自西南向东北递减。

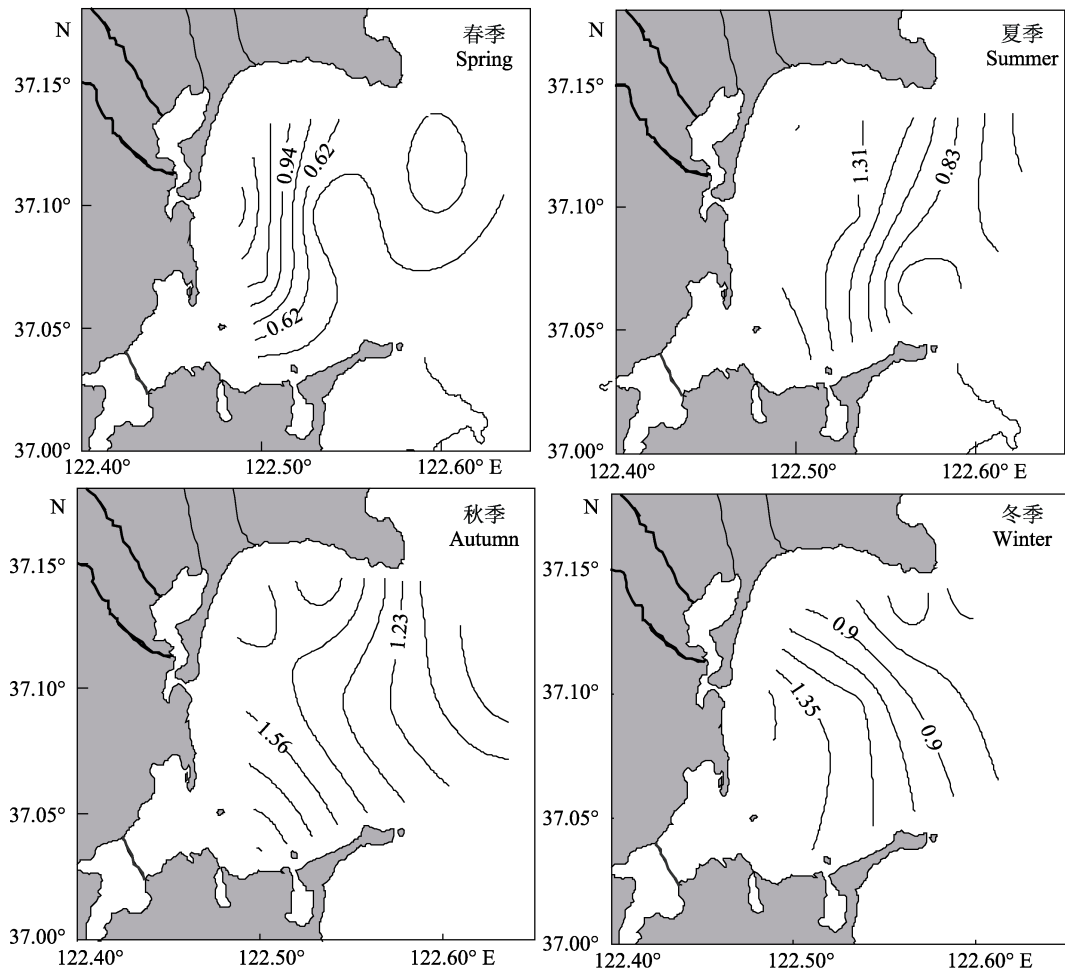


图3 桑沟湾浮游植物多样性指数(香浓-威纳指数)季节分布

Fig.3 Seasonal distribution of phytoplankton diversity index (Shannon-Wiener index) in Sanggou Bay

均匀度指数在 0~1 之间时, J 值大,体现种间个体数分布较均匀, J 值小则反映种间个体数分布欠均匀。如果采样点种间个体数分布的差别大,则 J 值偏低。桑沟湾海域浮游植物的年平均均匀度指数为 0.59。如图 4 所示,春季均匀度指数在 0.19~0.68 之间,平均值为 0.42,自西北向东南递减;夏季均匀度指数在 0.44~1.00 之间,平均值为 0.70,自西向东递

减;秋季均匀度指数在 0.41~0.87 之间,平均值为 0.71,自湾西部、南部向东部、北部递减;冬季均匀度指数在 0.27~0.86 之间,平均值为 0.53,自西南向东北递减。

2.3 浮游植物群落与环境因子相关性

由表 3 可以看出,各个季节影响浮游植物丰度的

因素不同, 春季浮游植物丰度与水温、盐度、pH 等呈现较强负相关。夏季与溶解氧呈负相关, 与磷酸盐呈较强正相关, 秋季未表现出与某一因子有较强相关性, 而冬季则与亚硝态氮呈较强负相关。同时发现,

各个季节浮游植物丰度与氨氮都呈现负相关, 除秋季外, 浮游植物与磷酸盐皆呈正相关, 其中夏季有很强相关性($P < 0.01$)。并且, 除夏季外, 浮游植物群落丰度都与透明度呈负相关。

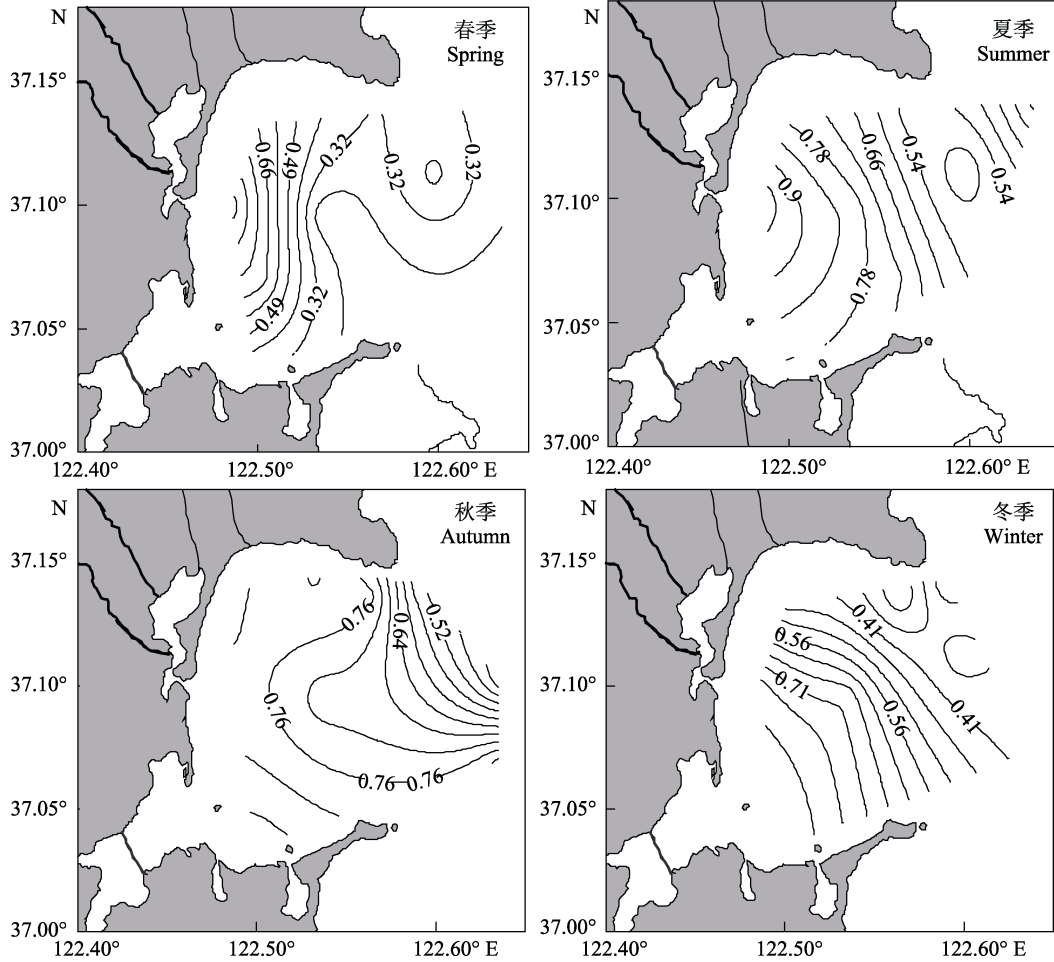


图 4 桑沟湾浮游植物均匀度指数(Pielou 指数)季节分布

Fig.4 Seasonal distribution of phytoplankton evenness index (Pielou index) in Sanggou Bay

表 3 浮游植物丰度与环境因子的相关性

Tab.3 Pearson correlation between the phytoplankton cell abundance and environmental factors

环境因子 Environmental factors	春季 Spring		夏季 Summer		秋季 Autumnn		冬季 Winter	
	R^2	P	R^2	P	R^2	P	R^2	P
水温 T	-0.637*	0.048	0.473	0.168	-0.259	0.470	0.315	0.447
透明度 SD	-0.508	0.134	0.410	0.239	-0.198	0.583	-0.642	0.086
盐度 $Salinity$	-0.648*	0.043	-0.548	0.101	0.264	0.527	0.476	0.233
溶解氧 DO	-	-	-0.649*	0.042	0.367	0.297	-0.594	0.121
pH	-0.847**	0.002	-0.423	0.223	0.616	0.058	-0.313	0.450
NO_2-N	0.278	0.437	0.000	0.999	-0.427	0.219	-0.700	0.053
NO_3-N	0.188	0.602	-0.269	0.453	-0.167	0.645	0.206	0.625
NH_4-N	-0.134	0.712	-0.351	0.320	-0.157	0.665	-0.235	0.575
PO_4-P	0.437	0.206	0.895**	0.001	-0.236	0.512	0.066	0.877

注: * $P < 0.05$ 差异显著; ** $P < 0.01$ 差异极显著

Note: * $P < 0.05$, significant difference; ** $P < 0.01$, highly significant difference

3 讨论

3.1 海区营养盐结构及年际变化特点

水体中,营养盐的浓度和结构影响着浮游植物的群落结构。浮游植物的氮限制浓度为 $1 \mu\text{mol/L}$, 磷限制浓度为 $0.2 \mu\text{mol/L}$ (Dortch *et al.*, 1992), 此外, 常用氮磷比来判断浮游植物的营养限制因子, 氮磷原子比为 $16:1$, 即与微藻细胞氮磷比一致时, 微藻能均衡发展(Redfield *et al.*, 1963), 当比值显著小于 $16:1$ 时, 氮为限制因子, 反之磷为限制因子。

通过对桑沟湾历年氮磷浓度和结构长期观测(表 4), 可以发现, 历年无机氮浓度春季较低, 秋季

最高。除个别季节外, 桑沟湾氮磷比均 >16 , 无机氮浓度均高于氮限制浓度, 而较多季节磷酸盐浓度低于或接近磷限制浓度。本次调查也符合近年来氮磷变化特点, 2017~2018 年各站位无机氮在 $3.30\sim 20.36 \mu\text{mol/L}$ 之间, 浓度均高于限制浓度, 而无机磷浓度在 $0.01\sim 0.97 \mu\text{mol/L}$ 之间, 全年平均值为 $0.25 \mu\text{mol/L}$, 有较多区域浓度接近限制浓度。各季节氮磷比平均值在 $19.66\sim 87.34$ 之间, 除春季极个别站位外, 比值均 >16 。相关性分析(表 3)显示, 各个季节浮游植物丰度与氮磷都呈负相关, 除秋季外, 浮游植物与磷酸盐皆呈正相关。可以看出, 磷酸盐是桑沟湾浮游植物生长的主要限制营养盐, 这也符合黄海初级生产力在一定程度上受到磷限制这一现象(金杰, 2014)。

表 4 桑沟湾氮磷浓度和结构的长期观测数据

Tab.4 Long-term observation data of nitrogen and phosphorus concentration and structure in Sanggou Bay

调查时间 Investigation time	溶解无机氮 DIN($\mu\text{mol/L}$)				磷酸盐 $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ ($\mu\text{mol/L}$)				氮磷比 N/P				参考文献 Reference
	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter	
1994	3.39	5.87	20.48	2.81	0.24	0.19	0.54	0.48	14.10	30.90	37.90	5.90	宋云利等(1996)
1997	3.96	7.21	20.43	10.01	-	-	-	-	-	-	-	-	连岩等(1998)
2003~2004	4.85	16.83	22.59	6.73	0.11	0.24	0.31	0.26	44.10	70.10	72.90	26.90	孙丕喜等(2007)
2006~2007	3.08	7.97	15.84	11.38	0.24	0.18	0.88	0.60	15.71	76.99	19.03	21.78	张继红等(2010)
	3.86	9.06	14.4	9.17	0.09	0.12	0.68	0.32	55.00	105	21.70	27.20	孙珊等(2010)
2013~2014	5.57	3.19	13.8	8.02	0.31	0.13	0.58	0.33	19	32	24	33	李瑞环(2014)
2014~2015	8.75	9.02	13.35	8.33	0.41	0.42	0.70	0.59	27.37	28.41	20.42	18.28	徐东会等(2017)
2017~2018	4.35	8.80	13.59	11.52	0.26	0.13	0.21	0.38	19.66	75.36	87.34	47.93	本研究 This study

桑沟湾的海带养殖对营养盐, 尤其是无机氮, 有着重要的影响。春季水温回升, 光照增强, 海带进入快速生长期, 海带有较快的无机氮吸收能力(毛玉泽等, 2018), 能够在春季大量吸收无机氮(武晋宣, 2005)。秋季海带已完全收获, 海水中无机氮受到的移除作用大大降低, 进而导致秋季无机氮浓度最大, 并且由于外海营养盐补充是桑沟湾内无机氮营养盐的主要来源, 桑沟湾全年通过与黄海的水交换获得的无机氮占营养盐总收入量的 33.6% , 在整个海带生长期, 外海对桑沟湾无机氮的补充更是占全年外海补充的 87.2% (史洁等, 2010), 持续的无机氮输入使得其浓度始终高于限制浓度。

3.2 浮游植物群落结构的年度变化特点与潜在成因

通常来说, 群落中的一种或几种种类优势越明显, 则群落结构越简单, 物种多样性越低, 群落稳定性也越低。历史资料显示, 桑沟湾浮游植物群落物种

数具有明显变化(表 5), 从 20 世纪 80 年代至今, 桑沟湾海区浮游植物的物种数、多样性指数都有较明显的递减趋势, 与 1983~1984 年相比, 浮游植物物种数下降了约 71.8% 。

桑沟湾多年来开展的大规模海水养殖活动是导致出现这一现象的原因之一。自 20 世纪 80 年代发展至今, 养殖面积已占水域面积的 $70\%\sim 80\%$ (傅明珠等, 2013), 主要养殖物种海带、长牡蛎和栉孔扇贝的年产量分别为 84500 、 60000 和 15000 t (Jiang *et al.*, 2015), 桑沟湾养殖生态系统受到中等程度的压力, 其中, 较高的养殖密度、较大的养殖面积是重要影响因素(傅明珠等, 2013)。

在滤食性贝类区, 浮游植物的群落结构受滤食性贝类摄食作用的下行控制效应和营养盐等因素的上行控制效应影响。一方面, 滤食性贝类有着很强的滤水能力, 局部高密度养殖的滤食性贝类的摄食作用会对浮游植物的数量造成压制, 本研究发现, 浮游植物

表 5 桑沟湾浮游植物物种组成长期变化

Tab.5 Long-term changes of the species composition of phytoplankton in Sanggou Bay

调查时间 Investigation time	浮游植物种类组成 Phytoplankton species composition				Shannon 多样性指数 Shannon's diversity index		参考文献 Reference
	总数 Total	硅藻 Diatom	甲藻 Dinoflagellate	其他 Others	范围 Range	平均值 Mean	
1983~1984	181	145	34	2	—	1.71	毛兴华等(1988)
1989~1990	118	103	14	1	—	2.10	宋洪军等(2007)
1999~2000	148	117	25	6	—	1.98	宋洪军等(2007)
2003~2004	75	65	9	1	—	1.58	宋洪军等(2007)
2006~2007	92	74	11	7	1.91~2.74	—	李超伦等(2010)
2015.5	70	60	7	3	0.49~2.31	1.21	钱罡等(2017)
2017~2018	51	43	4	5	0.30~1.92	1.01	本研究 This study

丰度均值的最高值出现在滤食性贝类摄食能力低的冬季;除夏季外,浮游植物丰度的高值区均出现在非贝类养殖区,这些现象都印证了以上观点。另一方面,贝类的代谢产物带来的营养物质又会促进浮游植物的生长(Asmus *et al.*, 1991; 王俊等, 2001; 董双林等, 1999), 刺激初级生产。董双林等(1999)指出, 放养适量的滤食性贝类以维持一定的浮游植物数量对保持养殖水体的良好水质是必要的, 并且初级生产力的升与降取决于放养的密度和环境因子。已有研究表明, 目前, 桑沟湾牡蛎养殖区的养殖密度已超过生态容量(Gao *et al.*, 2020), 加之桑沟湾的养殖规划尚存在不合理的情况, 局部区域养殖密度过高, 超出养殖容量的现象仍然存在。在这样规模化、超容量养殖条件下, 滤食性贝类摄食作用的下行控制效应占主导地位, 使得浮游植物群落结构难以尽快恢复。由此开展养殖容量的研究, 控制合理的养殖密度, 是防止此类现象发生的有效途径。

浮游植物现存量是滤食性贝类养殖容量评估的重要参数之一。目前, 对于浮游植物种类、营养盐等水环境信息的获取手段主要依赖于大面航次调查、传统显微镜分类等, 数据的同步性、客观性和精确性存在局限, 随着科技手段的不断进步, 开展基于藻细胞形态的浮游植物显微图像自动识别、荧光光谱识别等技术的实时、连续、多站位同步观测将是下一步的重点工作方向。

参 考 文 献

- Asmus RM, Asmus H. Mussel beds: Limiting or promoting phytoplankton? *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 1991, 148(2): 215–232
- Dong SL, Wang F, Wang J, *et al.* Effects of bay scallop on plankton and water quality of mariculture pond. *Acta Oceanologica Sinica*, 1999, 21(6): 138–144 [董双林, 王芳, 王俊, 等. 海湾扇贝对海水池塘浮游生物和水质的影响. *海洋学报*, 1999, 21(6): 138–144]
- Dortch Q, Whitley TE. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions? *Continental Shelf Research*, 1992, 12(11): 1293–1309
- Fang J, Zhang J, Xiao T, *et al.* Integrated multi-trophic aquaculture (IMTA) in Sanggou Bay, China. *Aquaculture Environment Interactions*, 2016, 8: 201–205
- Fu MZ, Pu XM, Wang ZL, *et al.* Integrated assessment of mariculture ecosystem health in Sanggou Bay. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1): 238–248 [傅明珠, 蒲新明, 王宗灵, 等. 桑沟湾养殖生态系统健康综合评价. *生态学报*, 2013, 33(1): 238–248]
- Gao YP, Fang JG, Lin F, *et al.* Simulation of oyster ecological carrying capacity in Sanggou Bay in the ecosystem context. *Aquaculture International*, 2020, 28(5): 2059–2079
- Hao LH, Sun PX, Hao JM, *et al.* The spatial and temporal distribution of chlorophyll-*a* and its influencing factors in Sanggou Bay. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(2): 338–345 [郝林华, 孙丕喜, 郝建民, 等. 桑沟湾海域叶绿素 *a* 的时空分布特征及其影响因素研究. *生态环境学报*, 2012, 21(2): 338–345]
- Jiang ZJ, Li J, Qiao X, *et al.* The budget of dissolved inorganic carbon in the shellfish and seaweed integrated mariculture area of Sanggou Bay, Shandong, China. *Aquaculture*, 2015, 446: 167–174
- Jin J. Response of phytoplankton to phosphorus and nutrient dynamics in the typical marginal seas. Doctoral Dissertation of Ocean university of China, 2014 [金杰. 典型海域浮游植物对磷的响应及营养盐动力学研究. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2014]
- Li CL, Zhang YS, Sun S, *et al.* Phytoplankton species composition, quantity distribution and seasonal variation in the Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4):

- 1-8 [李超伦, 张永山, 孙松, 等. 桑沟湾浮游植物种类组成、数量分布及其季节变化. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 1-8]
- Li RH. Nutrient dynamics under the impact of eco-aquaculture—A case study in Sanggou Bay. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2014 [李瑞环. 生态养殖活动下营养盐动力学研究: 以桑沟湾为例. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2014]
- Lian Y, Wang LC. An investigation on chemistry of seawater of Sanggou Bay. *Advances in Marine Science*, 1998(3): 60-66 [连岩, 王立超. 桑沟湾海水化学调查. 海洋科学进展, 1998(3): 60-66]
- Liu H, Fang JG, Dong SL, *et al.* Study on phytoplankton in raft-culture areas of Laizhou Bay and Sanggou Bay II. *Marine Fisheries Research*, 2003, 24(3): 20-28 [刘慧, 方建光, 董双林, 等. 莱州湾和桑沟湾养殖海区浮游植物的研究 II. 海洋水产研究, 2003, 24(3): 20-28]
- Mao XH, Zhang WX, Zhang JZ, *et al.* A comprehensive investigation and study on the culture environment of the Sanggou Bay. Qingdao: Qingdao Press, 1988 [毛兴华, 张为先, 张建中, 等. 桑沟湾增养殖环境综合调查研究. 青岛: 青岛出版社, 1988]
- Mao YZ, Li JQ, Xue SY, *et al.* Ecological functions of the kelp *Saccharina japonica* in intergrated multi-trophic aquaculture, Sanggou Bay, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(9): 242-249 [毛玉泽, 李加琦, 薛素燕, 等. 海带养殖在桑沟湾多营养层次综合养殖系统中的生态功能. 生态学报, 2018, 38(9): 242-249]
- Qian G, Wei YQ, Sun J. Study on phytoplankton communities in the Sanggou Bay in spring, 2015. *Marine Sciences*, 2017, 41(2): 44-52 [钱罡, 魏玉秋, 孙军. 2015年春季桑沟湾浮游植物群落研究. 海洋科学, 2017, 41(2): 44-52]
- Redfield AC, Ketchum BH, Richard FA. The influence of organism on the composition of seawater in the sea. *John Wiley*, 1963(2): 26-77
- Shi J, Wei H, Zhao L, *et al.* Study on ecosystem model of multi-species culture in Sanggou Bay: II Simulation of ecosystem and the circulation of nutrients. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 38-44 [史洁, 魏皓, 赵亮, 等. 桑沟湾多元养殖生态模型研究: II 生态环境模拟与生源要素循环. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 38-44]
- Song HJ, Li RX, Wang ZL, *et al.* The interannual variation of phytoplankton diversity in Sanggou Bay. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(3): 332-339 [宋洪军, 李瑞香, 王宗灵, 等. 桑沟湾浮游植物多样性年际变化. 海洋科学进展, 2007, 25(3): 332-339]
- Song YL, Cui Y, Sun Y, *et al.* Study on nutrient state and influencing factors in Sanggou Bay. *Marine Fisheries Research*, 1996, 17(2): 41-51 [宋云利, 崔毅, 孙耀, 等. 桑沟湾养殖海域营养状况及其影响因素分析. 海洋水产研究, 1996, 17(2): 41-51]
- Sun PX, Zhang ZH, Hao LH, *et al.* Analysis of nutrients distribution and potential eutro-phication in seawater of bay. *Advances in Marine Science*, 2007, 25(4): 436-445 [孙丕喜, 张朝晖, 郝林华, 等. 桑沟湾海水中营养盐分布及潜在性富营养化分析. 海洋科学进展, 2007, 25(4): 436-445]
- Sun S, Liu SM, Ren JL, *et al.* Distribution features of nutrients and flux across the sediment-waterinterface in the Sanggou Bay. *Acta Oceanologica Sinica*, 2010, 32(6): 108-117 [孙珊, 刘素美, 任景玲, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐和沉积物-水界面扩散通量研究. 海洋学报, 2010, 32(6): 108-117]
- Wang J, Jiang ZH, Dong SL. Role of filter-feeding bivalves in proliferation of phytoplankton community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(5): 765-768 [王俊, 姜祖辉, 董双林. 滤食性贝类对浮游植物群落增殖作用的研究. 应用生态学报, 2001, 12(5): 765-768]
- Wang XM. Studies on phytoplankton community under integrated multi-trophic aquaculture modes in Sanggou Bay, 2017. Master's Thesis of Jinan University, 2017 [王晓敏. 桑沟湾多营养级综合养殖模式下浮游植物群落结构研究. 暨南大学硕士学位论文, 2017]
- Wu JX. Development and applications of dynamic model for dissolved nitrogen and phosphate budgets in Sungo Bay. Doctoral Dissertation of Ocean University of China, 2005 [武晋宜. 桑沟湾养殖海域氮、磷收支及环境容量模型. 中国海洋大学博士研究生学位论文, 2005]
- Xu DH, Chen BJ, Jiang T, *et al.* Temporal and spatial variation characteristics of water nutrients and eutrophication evaluation in aquaculture water areas of Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2017, 38(3): 1-11 [徐东会, 陈碧鹃, 江涛, 等. 桑沟湾养殖海域营养盐时空分布特征及富营养化评价. 渔业科学进展, 2017, 38(3): 1-11]
- Zhang JH, Jiang ZJ, Wang W, *et al.* Seasonal distribution and variation of nutrients and nutrients limitation in Sanggou Bay. *Progress in Fishery Sciences*, 2010, 31(4): 16-25 [张继红, 蒋增杰, 王巍, 等. 桑沟湾营养盐时空分布及营养盐限制分析. 渔业科学进展, 2010, 31(4): 16-25]

(编辑 冯小花)

Temporal and Spatial Variation in Phytoplankton Community Structure and Their Relationship with Environmental Factors in Sanggou Bay

HOU Xing^{1,2}, GAO Yaping², DU Meirong², JIANG Weiwei², LI Fengxue², DONG Shipeng^{1,2},
LI Wenhao^{1,2}, MENG Shan^{1,2}, WANG Junwei⁴, ZHANG Yitao⁴, JIANG Zengjie^{2,3①}

(1. College of Fisheries and Life Science, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306; 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. Laboratory for Marine Fisheries Science and Food Production Processes, Pilot National Laboratory for Marine Science and Technology (Qingdao), Qingdao 266071; 4. Rongcheng Chudao Aquaculture Corporation, Rongcheng 264312)

Abstract In order to better understand the temporal and spatial variation in characteristics of phytoplankton community structure and their relationship with environmental factors in Sanggou Bay, four seasonal cruises were carried out at 21 sites in April (spring), July (summer) and November (autumn) 2017 and in January 2018 (winter). Analysis identified 51 species from 31 phytoplankton genera in the surveyed area. Among these, 43 species were from 24 genera of diatoms, 4 species from 3 genera of dinoflagellates, 2 species from 2 genera of Chlorophyta, and 1 species of Cyanophyta. Seasonal analysis showed that there were 22 species in spring, 20 species in summer, 23 species in autumn, and 20 species in winter. The dominance index showed that diatoms comprised the dominant species, and that *Paralia sulcata* was the dominant species throughout the year, with percentages ranging between 18.6% and 84.9%. The abundance of phytoplankton cells ranged from 0.16×10^3 cells/L to 12.2×10^3 cells/L (winter > spring > autumn > summer). The species diversity index (Shannon-Wiener index) varied from 0.69 to 1.35 (autumn > summer > winter > spring). The species evenness index J (Pielou) ranged from 0.42 to 0.70. Phosphate is the main limiting nutrient for phytoplankton growth in Sanggou Bay. The results reveal the spatial and temporal variation characteristics of phytoplankton community in a typical large-scale mariculture bay and provide the basic data for in depth understanding of the structure and function of the mariculture ecosystem.

Key words Phytoplankton; Community structure; Inorganic nutrients; Filter-feeding bivalves; Sanggou Bay

① Corresponding author: JIANG Zengjie, E-mail: jiangzj@ysfri.ac.cn