

嵊泗海域浮游植物数量分布与优势种

罗民波¹, 简婷婷^{1,2}, 王云龙^{1*}, 杨杰青¹

¹中国水产科学研究院东海水产研究所, 上海

²上海海洋大学海洋科学学院, 上海

Email: minbl@163.com, yunlong_wang@hotmail.com

收稿日期: 2020年11月24日; 录用日期: 2020年12月8日; 发布日期: 2020年12月15日

摘要

通过2016~2017年嵊泗海域(30°30'~31°N、121°30'~122°42'E) 4个季节现场调查, 研究了嵊泗海域浮游植物丰度时空分布和变化动力学机制及嵊泗海域浮游植物优势种的生态学特征。结果表明: 嵊泗海域浮游植物丰度的季节变化明显, 春($96.00 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季($51.72 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季($38.23 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$) > 冬季($20.04 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$), 丰度年平均为 $51.50 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$ 。冬季嵊泗海域近海高于外海, 其他季节外海高于近海。全年共同优势种(优势度 $Y \geq 0.02$)有2种, 为虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻, 中肋骨条藻在春、夏和秋季为优势种。聚集性分析表明嵊泗海域浮游植物有明显的聚集现象。通过浮游植物丰度与环境因子的相关分析表明, 冬季影响浮游植物丰度分布的主要因素是温度和溶解氧, 其他季节浮游植物丰度与环境因子相关性不显著。浮游植物优势种适应性分析表明, 虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻的适温性(7.5°C~32°C)比中肋骨条藻的适温性(16°C~32°C)强, 在高丰度分布区, 虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻温度和盐度适应范围比中肋骨条藻广, 但春、夏季丰度比中肋骨条藻低。

关键词

嵊泗海域, 浮游植物数量分布, 优势种

Horizontal Distribution and Dominant Species of Phytoplankton in the Shengsi Sea Area

Minbo Luo¹, Tingting Jian^{1,2}, Yunlong Wang^{1*}, Jieqing Yang¹

¹East China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Shanghai

²College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai

Email: minbl@163.com, yunlong_wang@hotmail.com

*通讯作者。

文章引用: 罗民波, 简婷婷, 王云龙, 杨杰青. 嵊泗海域浮游植物数量分布与优势种[J]. 海洋科学前沿, 2020, 7(4): 77-88. DOI: 10.12677/ams.2020.74012

Abstract

This article discusses the phytoplankton horizontal distribution and dominant species in Shengsi Sea Area. The ecological characteristics of phytoplankton and their adaptability to the environment were also considered. Oceanographic investigation was carried out in the Shengsi Sea Area (30°30'~31°N and 121°30'~122°42'E) in four seasons from 2016 to 2017. It was found that the total abundance showed obviously seasonal variations. It peaked in spring with a mean value of $96.00 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$, followed by autumn ($51.72 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$). The lowest abundance occurred in winter ($20.04 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$). The mean density of phytoplankton was $51.50 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$. For the horizontal distribution, abundance in winter was higher in the near shore than in the off shore, and other seasons were higher in offshore than in nearshore areas. The aggregation characteristics of phytoplankton were obvious from multivariate regression analysis. Over the whole year, phytoplankton abundance showed a significant correlation with the water temperature. Three dominant species were observed in 4 investigated seasons, in which *Skeletonema costatum* dominated in winter, *Coscinodiscus oculus-iridis* and *Coscinodiscus jonesianus* in spring, summer, autumn and winter. Temperature and DO were found to be major influencing factors to winter phytoplankton abundance, while in other seasons the relationship between the environment and the phytoplankton abundance was not obvious. Comparing their adaptability, *Coscinodiscus oculus-iridis* and *Coscinodiscus jonesianus* can survive in a wider temperature range (7.5°C ~32°C), which enabled them to dominate in spring, summer and winter, while *Skeletonema costatum* survived in a relatively narrow temperature range (16°C~32°C). *Coscinodiscus oculus-iridis* and *Coscinodiscus jonesianus* had the wider suitable temperature and salinity zone than the *Skeletonema costatum*, while the later had the higher abundance in winter.

Keywords

Shengsi Sea Area, Horizontal Distribution, Dominant Species of Phytoplankton

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

浮游植物是海洋中的主要生产者和海洋生物的重要食物来源，在海洋生态系统食物网中处于关键位置。浮游植物作为嵊泗海域环境变化的重要指示生物，是嵊泗海域生态环境评估的重要内容[1]。更多研究者关注到浮游植物对海洋生态环境的重要作用。

嵊泗列岛位于长江口外，其附近海域是长江口外赤潮的多发区域，赤潮多发时期的6~8月监测结果表明：嵊泗列岛附近海域6~8月海水多处于富营养化状态，浮游植物密度极高，主要优势种夜光藻等均为赤潮种类，极易引发赤潮[2]。6~9月是嵊泗枸杞列岛海域赤潮发生季节[3]。在舟山港海域浮游植物的群落结构及其季节变化的研究中，浮游植物区域变化明显，嵊泗采样海域在舟山港海域采样点中种类最多，浮游植物季节变化明显，夏季种类最多，夜光藻属、角藻属和角毛藻属占据一定优势地位[4]。杭州湾和嵊泗海域浮游植物种类多样性指数自西北向东南呈递减-递增-递减的态势，其低谷区中心位于

121°121'E、30°00'N~122°30'E、31°00'N 连线海域[5]。

东海海域(28°~32°N, 127°E 以西)浮游植物类有 54 属 188 种, 分隶于硅藻、甲藻和蓝藻[6]。夏季浙江沿岸浮游植物种类组成复杂, 沿岸广布种和偏暖、暖水种为主要种类[7]。南麂列岛海域浮游植物类群 4 个季节的调查表明, 浮游植物广温类群为主, 植物物种丰富度呈现春、夏、秋、冬递减的趋势, 三角棘原甲藻和中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)分别于春季和夏季形成赤潮[8]。象山港优势种主要有琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)、太阳漂流藻(*Planktoniella sol*)和星脐圆筛藻(*C.asteromphalus*), 存在明显的季节演替现象[9]。

浮游植物在海洋生命资源中承担着主要的促进作用, 影响浮游植物发生变化的原因有很多, 包括季节变化、空间分布等[10]。近年来, 关于中国近海浮游植物方面已经有一些研究, 主要为浮游植物群落结构、浮游植物多样性及其与环境因子的关系研究[11][12][13][14]。

长江口附近海流、杭州湾冲淡水、黑潮和台湾暖流对嵊泗海域的海洋环境和浮游植物的生长分布等造成了影响, 目前关于嵊泗海域浮游植物的生态学研究少见报导。

通过 2016~2017 年在嵊泗海域的现场调查, 研究嵊泗海域浮游植物数量的时空变化特征, 分析优势种变化, 进一步阐明浮游植物数量动态变化的生态学过程。

2. 材料与方法

2.1. 研究范围和采样方法

调查区为嵊泗海域在 30°30'~31°N 和 121°30'~122°42'E 区域。2016~2017 年分别进行春季(2017.5)、夏季(2016.8)、秋季(2016.11)和冬季(2017.2)四个航次的海洋综合调查, 调查站位设置见图 1。根据浮游植物与环境因子的关系特征, 依据经度 122°E 和 122°24'E 将嵊泗海域分成 3 个海区, 即: I 滩浒山海域(30°30'~30°42'N、121°30'~122°E)、II 洋山海域(30°30'~30°54'N、122°~122°24'E)和 III 嵊泗本岛海域(30°30'~30°54'N、122°24'~122°42'E)。从图 1(b)可见, 长江冲淡水、钱塘江冲淡水、甬江冲淡水、台湾暖流和浙江沿岸流共同作用下, 嵊泗海域的水文情势较为复杂。

调查方法及样品处理按照《海洋调查规范》[15]。采样方法为由底至表层垂直拖曳, 并记录网口海水流量, 实验室内鉴定到种, 显微计数法计数(单位: $\text{cell}\cdot\text{m}^{-3}$)。

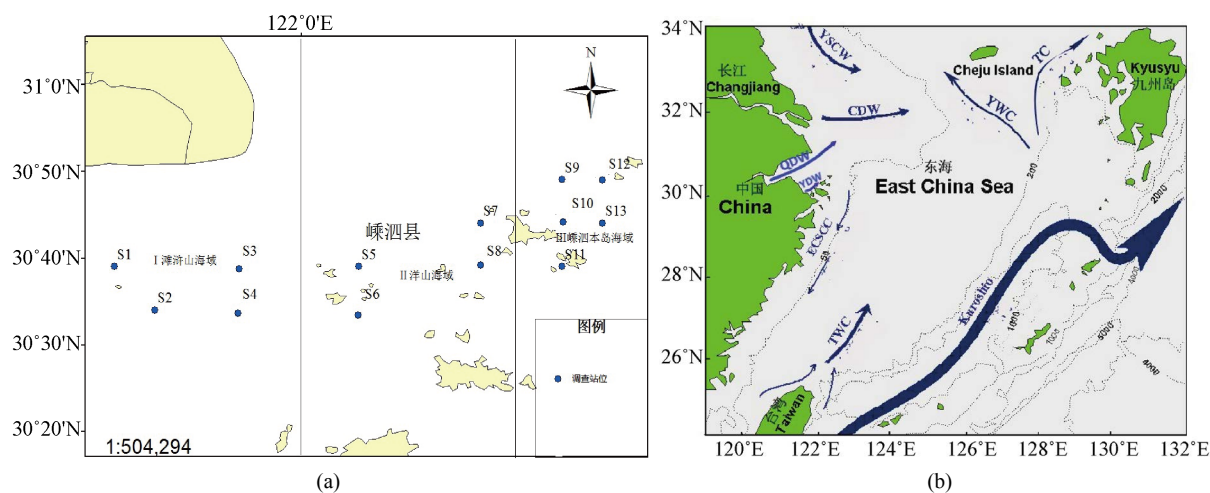


Figure 1. (a) Sampling stations; (b) Seasonal circulation of the Shengsi Sea Area

图 1. 采样站位及嵊泗附近海域海流简介。(a) 采样站位; (b) 嵊泗附近海域海流图[16]

2.2. 数据处理

浮游植物优势度(Y):

$$Y = \frac{n_i}{N} \cdot f_i$$

n_i 为第 i 种的丰度, f_i 是该种在各站位中出现率, N 为总丰度。取优势度 $Y \geq 0.02$ 的种类为优势种。

由于浮游植物优势种在嵛泗海域分布的非均匀性, 不同的聚集强度测度显示优势种群分布的聚集特性。聚集强度的计算公式如下[16] [17]:

$$\text{丛生指标: } I = V/\bar{X} - 1$$

$$\text{平均拥挤: } \bar{X}^* = (V - \bar{X} + \bar{X}^2)/\bar{X}$$

$$\text{聚块性指标: } \frac{\bar{X}^*}{\bar{X}} = (V - \bar{X} + \bar{X}^2)/\bar{X}^2$$

$$\text{扩散性指标: } I_s = (V - \bar{X} + \bar{X}^2)/\bar{X}^2 * N/(N-1)$$

公式表示从不同方面计算浮游植物空间分布格局非随机程度的统计量, 其中 V 是样本方差, \bar{X} 是样本平均数量。当指数为正值时, 浮游植物空间格局非随机程度较大, 即有一定聚集。正值数值越大, 聚集强度越高。以上 4 个聚集强度指数均为正数, 表明浮游植物有聚集分布特征。

3. 结果

3.1. 浮游植物丰度季节分布

浮游植物丰度季节变化明显。春季, 丰度为 4 季中数量最高, 平均为 $96.00 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$, 数量其次为秋季($51.72 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$)、夏季($38.23 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$), 最低值在冬季($20.04 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$)。春、夏、秋季嵛泗海域浮游植物丰度外海高于近海, 冬季近海高于外海, 全年平均以嵛泗本岛海域丰度最高, 洋山海域最低(表 1)。

Table 1. Phytoplankton abundance variation in the Shengsi Sea Area in 4 seasons $\times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$

表 1. 浮游植物在嵛泗海域三个不同区域丰度季节变化

季节 Season	丰度 Abundance			
	I	II	III	全区均值 area mean
春 Spring	81.38	58.75	137.5	96.00
夏 Summer	21.77	21.70	64.63	38.23
秋 Autumn	45.71	67.04	44.26	51.72
冬 Winter	42.02	11.88	8.99	20.04
平均 Mean	47.72	39.84	63.85	51.50

通过平面分布可见(图 2), 浮游植物春季高丰度区出现于嵛泗本岛东北海域。夏季, 高丰度分布区主要在嵛泗花鸟岛东南海域。秋季, 浮游植物高丰度区出现于嵛泗本岛西部海域。冬季, 高丰度区出现于嵛泗滩浒山岛附近海域。

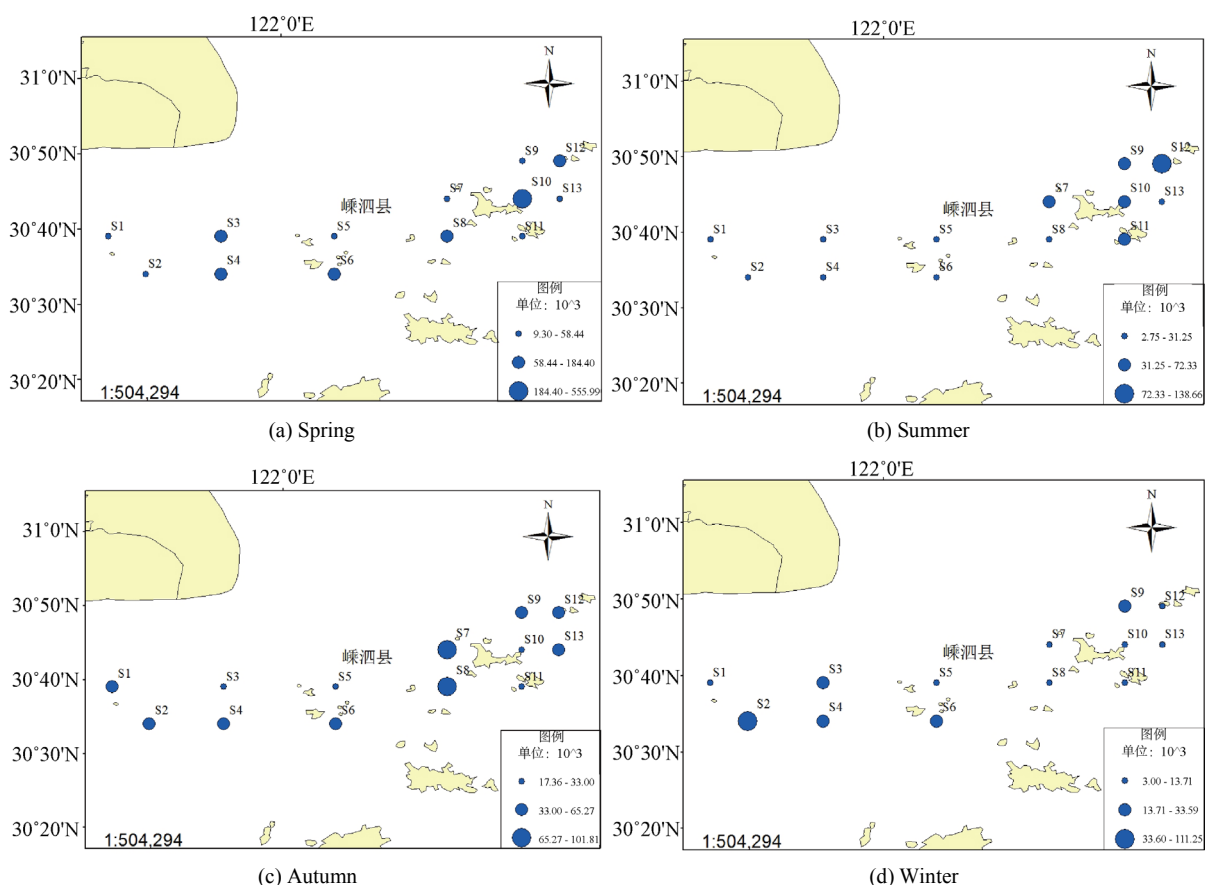


Figure 2. Phytoplankton seasonal distribution in the Shengsi Sea Area (unit: $\text{cell}\cdot\text{m}^{-3}$)

图 2. 嵊泗海域浮游植物丰四季分布(单位: $\text{cell}\cdot\text{m}^{-3}$)

3.2. 优势种

3.2.1. 生态变化特征

嵊泗海域四季共同优势种为虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻，春、夏、秋季的共同优势种为中肋骨条藻(表 2)。春季优势度最高的浮游植物为中肋骨条藻，其优势度是虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻的两倍；夏季较春季无明显变化，中肋骨条藻为优势度最高的浮游植物；秋季优势度最高的物种为虹彩圆筛藻，琼氏圆筛藻和威氏圆筛藻优势度次之；冬季优势度最高的浮游植物为虹彩圆筛藻，优势度远高于琼氏圆筛藻和苏氏圆筛藻。总体上，中肋骨条藻为春季和夏季主要优势种，虹彩圆筛藻为秋季和冬季主要优势种。

Table 2. Phytoplankton dominant species and the abundance percentage

表 2. 2016~2017 年浮游植物优势种优势度和丰度比

优势种	4 个季度变化							
	2016 年 8 月		2016 年 11 月		2017 年 2 月		2017 年 5 月	
	优势度	丰度比(%)	优势度	丰度比(%)	优势度	丰度比(%)	优势度	丰度比(%)
虹彩圆筛藻	0.15	15.22	0.32	34.20	0.57	57.06	0.18	19.55
琼氏圆筛藻	0.16	16.31	0.19	21.12	0.14	9.56	0.14	15.64

Continued

威氏圆筛藻			0.19	22.74		
中肋骨条藻	0.36	51.61	0.02	5.14	0.20	51.15
细弱圆筛藻					0.06	6.56
尖布纹藻	0.02	5.14				
苏氏圆筛藻			0.02	3.07		

3.2.2. 温盐适应性特征分析

分析浮游植物优势种丰度与其分布区域温盐变化关系可得, 虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻分布的温度和盐度范围相似, 温度和盐度分布范围较广, 高密度分布区温度范围和盐度分布范围分别为 16°C~23°C、15°C~22.5°C (图 3 和图 4)。中肋骨条藻分布的温度区间为 16°C~32°C, 高密度分布区的温度区间范围为 14°C~18°C, 盐度变化区间范围为 11~27, 高密度分布区盐度范围在 18 附近(图 5)。

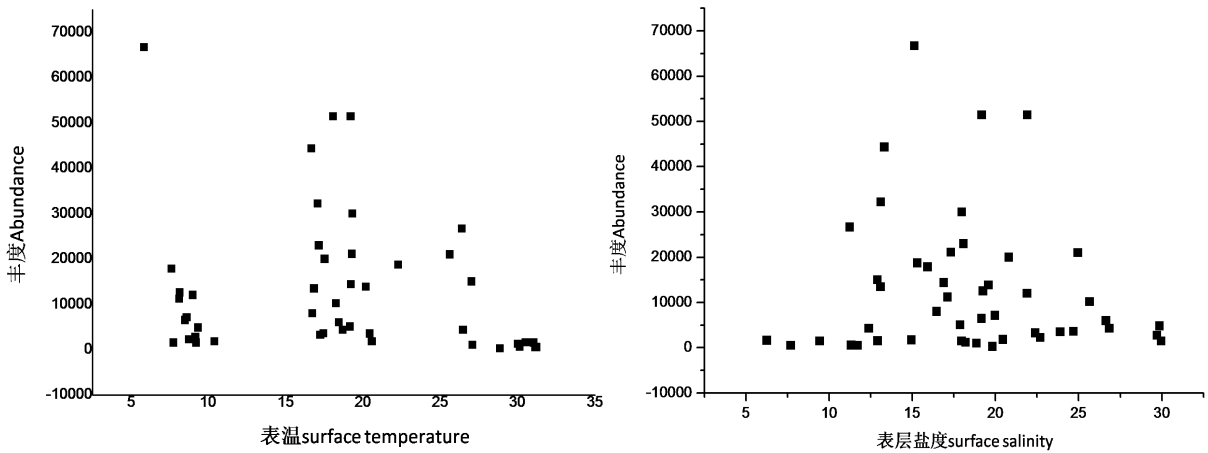


Figure 3. Relationship between *C. oculus-iridis* abundance and surface temperature and salinity
图 3. 虹彩圆筛藻丰度与海水表层温度和盐度的关系

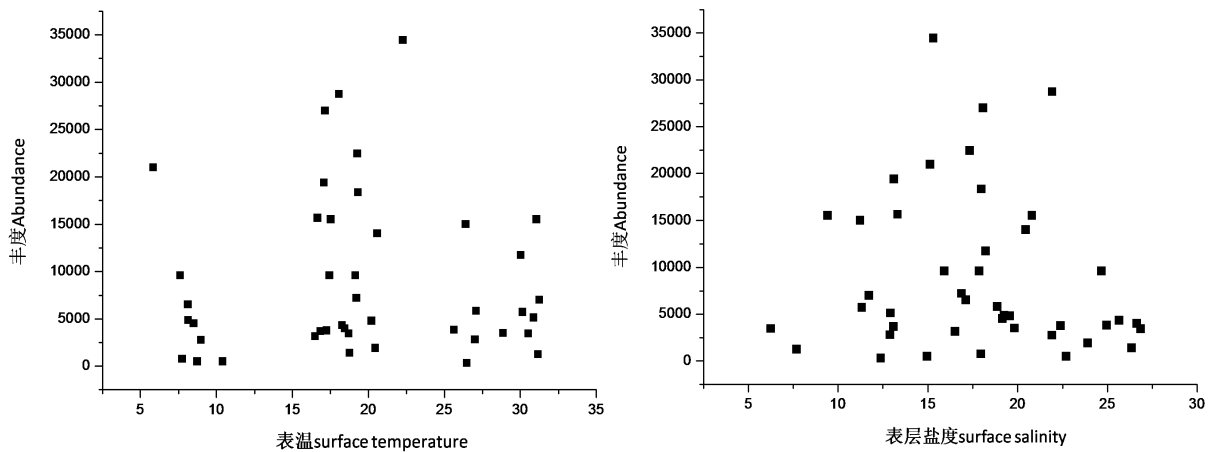


Figure 4. Relationship between *C. jonesianus* abundance and surface temperature and salinity
图 4. 琼氏圆筛藻丰度与海水表层温度和盐度的关系

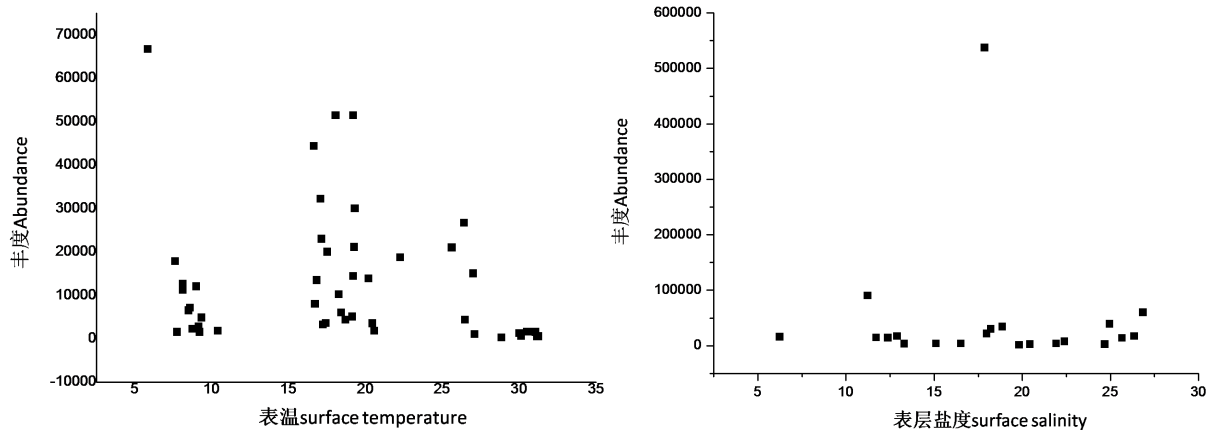


Figure 5. Relationship between *S. costatum* abundance and sea surface temperature and salinity
图 5. 中肋骨条藻丰度变化与海水表层温度和盐度的关系

通过多元逐步回归分析方法筛选表明表层水温(*T*)、盐度(*S*)、溶解氧(*DO*)、pH 与水深(*H*)是对总丰度(*Y*)影响显著的环境因子。丰度与水温、溶解氧的方程式为 $Y = -7793.5 T + 27574.5 DO$ (表 3)。4 个季节的数据动态变化显示, 冬季浮游植物丰度与水温的负相关关系显著, 与溶解氧的正相关性显著。春、夏和秋季浮游植物丰度的变化与温盐环境因子相关关系不显著。

Table 3. Regression analysis between abundance of phytoplankton and environment factors
表 3. 浮游植物丰度与环境因子的相关性

季节 season	回归方程 regression equation	n	r	F	p
冬 winter	$Y = -7793.5 H + 27574.5 DO$	13	0.811	12.264	0.001

3.2.3. 优势种分布聚集特征

虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻的聚集强度指数均为较大正值, 即聚集强度大, 聚集作用明显(表 4)。

Table 4. 4 seasons dominant species aggregation intensity
表 4. 优势种在 4 个季节聚集强度比较

优势种 Dominant species	春 Spring				夏 Summer			
	<i>I</i>	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	<i>I_δ</i>	\bar{X}^*	<i>I</i>	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	<i>I_δ</i>	\bar{X}^*
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	26278.3	2.4	1.4	45043.1	12767.9	3.2	2.2	18587.3
琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	25294.2	2.7	1.7	40305.9	3550.8	1.6	0.6	9785.4
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	861871.8	18.6	17.6	910973.6	30406	2.5	1.5	50136.7
优势种 Dominant species	秋 Autumn				冬 Winter			
	<i>I</i>	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	<i>I_δ</i>	\bar{X}^*	<i>I</i>	$\frac{\bar{X}^*}{\bar{X}}$	<i>I_δ</i>	\bar{X}^*
虹彩圆筛藻 <i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	13157.3	1.7	0.7	30842.6	24478.5	3.1	2.1	35916.0
琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	7262.7	1.7	0.7	18183.8	9618.7	3.5	2.5	13538.4
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	5648.9	3.1	2.1	8306.8	-1.0	1.0	0.0	287.5

4. 讨论

4.1. 丰度季节变化与浮游动物的关系

浮游植物是海洋生态系统中的生产者,为浮游动物提供能量来源,影响海洋渔业资源的变化。本研究包括对浮游动物的同步调查,在嵊泗海域4个季节浮游动物的研究中,浮游桡足类生物在浮游动物中在数量上占优势,其数量占嵊泗海域浮游动物总量的55.5%,在渔业资源调查方面具有重要的意义。浮游桡足类动物的丰度,4季的分布趋势为夏季($30.20 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$) > 春季($25.12 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季($16.93 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$) > 冬季($9.77 \text{ ind}\cdot\text{m}^{-3}$),此变化与浮游植物4个季节分布,即春季($96.00 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$) > 秋季($51.72 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$) > 夏季($38.23 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$) > 冬季($20.04 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$)的变化趋势,总体上有一致性。

4.2. 丰度变化与海流的关系

嵊泗海域沿岸流起源于长江口和杭州湾一带,来源于长江和钱塘江径流入海的冲淡水,沿岸流向南流动[17],水温较低,沿岸带浮游植物数量较低。春季嵊泗海域沿岸流水温上升,沿岸带浮游植物迅速增长,在台湾暖流和嵊泗海域沿岸流的作用下,虹彩圆筛藻迅速增值,形成较高密度的浮游植物聚集区。夏季嵊泗海域沿岸流水平流动幅度大,挟带大量营养物质,在台湾暖流的共同作用下,在嵊泗本岛以东的海域形成较高浮游植物聚集区。

秋季,嵊泗海域沿岸流向东北向流动,将水舌向东推移,在台湾暖流的作用下,在嵊泗本岛以西海域出现浮游植物高密集区。冬季,由于长江冲淡水、钱塘江冲淡水和甬江冲淡水的影响,在嵊泗海域西部区形成较高的浮游植物聚集区。

4.3. 丰度变化与温、盐等环境因子的关系

通过逐步回归法对嵊泗海域浮游植物丰度与环境因子中的营养盐、磷酸盐和化学耗氧量的关系进行分析,结果表明影响浮游植物总丰度季节分布的主要因子是温度。嵊泗海域浮游植物分布变化表明,冬季丰度变化与溶解氧呈正相关,与化学耗氧量呈负相关;夏季丰度变化与水温呈负相关;春和秋季浮游植物丰度的变化与区域内环境因子变化相关性不大,主要是这2个季节环境因子整体变化不大,没有与浮游植物丰度形成对应关系。

4.4. 优势种的环境适应特征

根据嵊泗海域浮游植物优势种的温盐适应性特征,虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻在水温处于较大的变化范围中仍能保持较强的适应性,秋冬季节为主要优势种;中肋骨条藻在低水温时丰度较低,在中高水温时丰度较高,而夏季水温偏高,中肋骨条藻演替为春、夏季的优势种。中肋骨条藻和虹彩圆筛藻属近海广温广盐生态类型,琼氏圆筛藻属近海低盐生态类型。

4.5. 优势种聚集特性

近海海域浮游植物多呈斑块状分布,聚集特征变化与海流、水体环境指标和浮游植物的生理特征有关,为渔场的形成提供重要参考。嵊泗海域浮游植物分布不均匀,聚集性强,春季聚集强度较高的浮游植物种类分别为中肋骨条藻、虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻,平均值为40,983;夏季为中肋骨条藻、虹彩圆筛藻和布氏双尾藻,平均值为2467;秋季为虹彩圆筛藻、威氏圆筛藻和尖针杆藻,平均值为2047;冬季为虹彩圆筛藻、类S菱形藻和琼氏圆筛藻,平均值为2330。*I*值以春季最高,其他季节均较低,聚集强度变化有明显的季节波动性特征。

5. 结论

1) 嵊泗研究海域浮游植物丰度的季节变化明显, 春季 > 秋季 > 夏季 > 冬季, 丰度年平均为 $51.50 \times 10^3 \text{ cell}\cdot\text{m}^{-3}$ 。春夏秋季嵊泗海域外海高于近海, 冬季嵊泗海域近海高于外海。

2) 总体上, 中肋骨条藻为春季和夏季主要优势种, 虹彩圆筛藻为秋季和冬季主要优势种, 全年共同优势种为虹彩圆筛藻和琼氏圆筛藻。在丰度高分布区, 虹彩圆筛藻和琼氏筛藻适宜生长的温度和盐度范围比中肋骨条藻广。春季和夏季虹彩圆筛藻和琼氏筛藻的丰度低于中肋骨条藻。

3) 浮游植物聚集现象有明显的季节波动性, 春季聚集现象明显, 其他季节聚集性低。

4) 温度和溶解氧是影响冬季浮游植物丰度分布的主要因子, 其他季节植物丰度与环境因子相关性不显著。

基金项目

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开放研究基金(mathab201407), 浙江省舟山市嵊泗县海洋与渔业局资助项目。

参考文献

- [1] Saifullah, A.S.M., Kamal, A.H.M., Idris, M.H., *et al.* (2019) Community Composition and Diversity of Phytoplankton in Relation to Environmental Variables and Seasonality in a Tropical Mangrove Estuary. *Regional Studies in Marine Science*, **32**, Article ID: 100826. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100826>
- [2] 张捷, 于波. 长江口至嵊泗列岛附近海域浮游植物与赤潮的监测研究[J]. 浙江海洋学院学报(自然科学版), 2001, 20(3): 213-216.
- [3] 欧阳怡然, 陈逸华, 于波. 嵊泗列岛养殖海区浮游植物、赤潮生物的研究[J]. 浙江水产学院学报(自然科学版) 1993, 12(4): 257-264.
- [4] 王弢. 宁波-舟山港海域浮游植物群落结构及季节变化[D]: [硕士学位论文]. 宁波: 宁波大学, 2013.
- [5] 章宇宇, 邵君波, 戴小杰. 杭州湾富营养化及浮游植物多样性问题的探讨[J]. 水产学报, 2001, 25(6): 512-517.
- [6] 郑元甲, 陈雪忠, 程家骅, 等. 东海大陆架生物资源与环境[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.
- [7] 王金辉. 长江口邻近水域外的赤潮生物[J]. 海洋环境科学, 2002, 2(21): 37-41.
- [8] 李扬, 李欢, 吕颂辉, 等. 南麂列岛海洋自然保护区浮游植物的种类多样性及其生态分布[J]. 水生生物学报, 2010, 34(3): 618-628.
- [9] 刘懂, 陈辰, 王莉, 等. 象山港海洋牧场示范区浮游植物的群落特征及其与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2016, 47(5): 1024-1032.
- [10] Kenneth, S. (1991) The Large Marine Ecosystem Concept: Research and Management Strategy for Living Marine Resources. *Ecology Applied*, **1**, 349-360. <https://doi.org/10.2307/1941896>
- [11] 李大鹏, 张硕, 石一茜, 等. 海州湾海洋牧场浮游植物群落年际变化特征分析[J]. 生态环境学报, 2017, 26(2): 285-295.
- [12] 刘佳, 苏艺, 韩晓庆, 等. 河北昌黎生态监控区海洋浮游植物多样性变化趋势研究[J]. 海洋通报, 2012, 31(6): 646-653.
- [13] 王雨, 林茂, 林更铭. 福建近海不同海洋功能区冬季浮游植物群落结构的比较研究[J]. 海洋科学, 2010(2): 33-39.
- [14] 李涛, 刘胜, 黄良民, 等. 广东沿岸不同海洋功能区秋季浮游植物群落结构比较研究[J]. 海洋通报, 2007, 26(2): 50-59.
- [15] 国家技术监督局. GB/T12763.6-2007 海洋调查规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] 罗民波, 陆健健, 王云龙, 等. 东海浮游植物数量分布与优势种[J]. 生态学报, 2007, 12(27): 5076-5085.
- [17] 赵志模, 周新远. 生态学引论[M]. 重庆: 重庆科学技术文献出版社, 1984: 108-119.
- [18] 雷宗友. 中国海洋环境手册[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1988: 472-510.
- [19] 王全喜, 曹建国, 刘妍, 等. 上海市九段沙湿地自然保护区及其附近水域藻类图集[M]. 北京: 科学技术出版社,

2008.

- [20] 黄宗国, 林茂. 中国海洋物种多样性[M]. 北京: 海洋出版社, 2012.
- [21] 浙江省舟山海洋生态环境监测站. 日拉汉浙江海域生物资源种类名称[M]. 北京: 海洋出版社, 2007.

附表

Table S1. The composition and distribution of phytoplankton species

表 S1. 崂山海域浮游植物种类及其分布[19] [20] [21]

中文名 Chinese name	拉丁文 Latin.	春 Spring	夏 Summer	秋 Autumn	冬 Winter
巨颤藻	<i>Oscillatoria princeps</i>				+
颤藻	<i>Oscillatoria</i> sp.		+	+	+
单角盘星藻具孔变种	<i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>		+		+
中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	+	+	+	+
环纹娄氏藻	<i>Lauderia annulata</i>		+		
丹麦细柱藻	<i>Leptocylindrus danicus</i>		+		
太阳漂流藻	<i>Planktoniella sol</i>		+	+	
扭曲小环藻	<i>Cyclotella comta</i>	+	+	+	+
蛇目圆筛藻	<i>Coscinodiscus argus</i>	+	+	+	+
星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	+	+		+
琼氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus jonesianus</i>	+	+	+	+
虹彩圆筛藻	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	+	+	+	+
细弱圆筛藻	<i>Coscinodiscus subtilis</i>	+	+	+	+
苏氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus thorii</i>	+	+	+	+
威氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus wailesii</i>	+	+	+	+
秀丽圆筛藻	<i>Coscinodiscus scitulus</i>	+			
布氏双尾藻	<i>Ditylum brightwelli</i>	+	+	+	+
中华盒形藻	<i>Biddulphia sinensis</i>	+	+	+	+
桥联角毛藻	<i>Chaetoceros anastomosans</i>		+		
洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>		+		
尖根管藻	<i>Rhizosolenia acuminata</i>		+		
笔尖形根管藻	<i>Rhizosolenia styliformis</i>		+		
尖布纹藻	<i>Gyrosigma acuminatum</i>	+	+	+	+
尖针杆藻	<i>Synedra acus</i>	+	+	+	+
窗格平板藻	<i>Tabellaria fenestrata</i>		+		
尖刺拟菱形藻	<i>Pseudonitzschia pungens</i>		+		
卵形褶盘藻	<i>Tryblioptychus cocconeiformis</i>		+		
钝脆杆藻	<i>Fragilaria capucina</i>		+		
颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i>				+
具槽直链藻	<i>Melosira sulcata</i>	+		+	+
螺旋颗粒直链藻	<i>Melosira granulata</i> f. <i>spiralis</i>			+	
蛛网藻	<i>Arachnoidiscus ehrenbergii</i>			+	+
蜂窝三角藻	<i>Triceratium favus</i>	+		+	+

Continued

活动盒形藻	<i>Biddulphia mobiliensis</i>	+		+	+
窗格平板藻	<i>Tabellaria fenestrata</i>			+	
洛伦菱形藻	<i>Nitzschia lorenziana</i>			+	+
鼓胀海链藻	<i>Thalassiosira gravida</i>				+
偏心圆筛藻	<i>Coscinodiscus excentricus</i>				+
类 S 菱形藻	<i>Nitzschia sigmoidea</i>	+			+
奇异棍形藻	<i>Bacillaria paradoxa</i>	+			+
厚甲多甲藻	<i>Peridinium crassipes</i>			+	
纺锤角藻	<i>Ceratium fusus</i>	+	+	+	+
夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	+	+	+	
叉角藻	<i>Ceratium furca</i>			+	+
大角角藻	<i>Ceratium macroceros</i>			+	
三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	+	+	+	