

DOI: 10.20103/j.stxb.202308161773

詹琳,江志兵,杜伟,孙振皓,王德刚,蒋雨露,杜萍,李宏亮,曾江宁.2021—2022 年春、秋季嵊泗列岛浮游植物群落状况及长期变化特征.生态学报,2024,44(13):5867-5881.

Zhan L., Jiang Z B., Du W., Sun Z H., Wang D G., Jiang Y L., Du P., Li H L., Zeng J N. Current status and long-term change of phytoplankton community around the Shengsi Islands in spring and autumn from 2021 to 2022. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(13): 5867-5881.

2021—2022 年春、秋季嵊泗列岛浮游植物群落状况及长期变化特征

詹琳^{1,3}, 江志兵^{1,2,3,4,*}, 杜伟², 孙振皓^{1,3}, 王德刚^{1,2}, 蒋雨露¹, 杜萍^{1,2,3,4}, 李宏亮^{1,3}, 曾江宁^{1,3}

1 自然资源部第二海洋研究所 自然资源部海洋生态系统动力学重点实验室, 杭州 310012

2 浙江省海洋科学院 自然资源部海洋空间资源管理技术重点实验室, 杭州 310012

3 浙江省近海海洋工程环境与生态安全重点实验室, 杭州 310012

4 自然资源部长三角海洋生态环境科学野外观测研究站, 舟山 316021

摘要:为更好地了解嵊泗列岛海域在人类活动和气候变暖影响下的生态现状以及变化特征,于 2020 年秋季和 2021 年春季在该海域进行了浮游植物的拖网与水样采集及环境要素分析。水采样品中共检出浮游植物 6 门 54 属 105 种。其中,硅藻 33 属 68 种,甲藻 14 属 30 种,蓝藻、金藻和隐藻各 2 属 2 种,绿藻 1 属 1 种。春、秋季浮游植物主要优势种为骨条藻(*Skeletonema* spp.),并在秋季占据绝对优势($Y=0.975$)。春季平均细胞丰度 $[(7.17\pm 7.78)$ 个/mL]明显低于秋季 $[(77.23\pm 73.44)$ 个/mL]。春季 Shannon-Wiener 多样性指数和 Pielou 均匀度指数均高于秋季。Spearman 相关分析表明,浮游植物丰度与水温呈显著正相关,与盐度呈显著负相关。冗余分析显示,浮游植物群落组成与水温、营养盐密切相关。网采样品中共检出浮游植物 4 门 46 属 94 种,硅藻占比最大;春、秋季平均细胞丰度分别为 838.17×10^3 和 19406.43×10^3 个/m³。与水样相比,骨条藻仍为主要优势种,且优势度更高;网采获得的秋季多样性指数和均匀度指数(分别为 0.23 和 0.05)低于水采(分别为 0.38 和 0.10)。将本次网采结果与 1990 年、2007 年调查资料对比发现,嵊泗列岛春、秋季浮游植物群落组成发生了明显改变:丰度明显升高,硅甲藻占比无明显变化,暖水种种类数明显增加,骨条藻优势地位增强,多样性指数和均匀度指数下降。这可能与变暖与富营养化加剧相关。近 30 年来,溶解无机氮在春季无显著变化,但在秋季显著升高;活性磷酸盐浓度在春、秋季均显著降低;氮磷比在春、秋季均显著升高。浮游植物的变化特征较好地指示了嵊泗列岛海域在富营养化和气候变暖下的生态环境变化。

关键词:嵊泗列岛;浮游植物;环境因子;富营养化;长期变化

Current status and long-term change of phytoplankton community around the Shengsi Islands in spring and autumn from 2021 to 2022

ZHAN Lin^{1,3}, JIANG Zhibing^{1,2,3,4,*}, DU Wei², SUN Zhenhao^{1,3}, WANG Degang^{1,2}, JIANG Yulu¹, DU Ping^{1,2,3,4}, LI Hongliang^{1,3}, ZENG Jiangning^{1,3}

1 Key Laboratory of Marine Ecosystem Dynamics, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China

2 Key Laboratory of Ocean Space Resource Management Technology, Ministry of Natural Resource, Marine Academy of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China

3 Key Laboratory of Nearshore Engineering Environment and Ecological Security of Zhejiang Province, Hangzhou 310012, China

4 Observation and Research Station of Marine Ecosystem in the Yangtze River Delta, Ministry of Natural Resources, Zhoushan 316021, China

基金项目:国家重点研发计划课题(2021YFC3101702);浙江省重点研发计划(2022C03044);长江口-浙江近海-邻近东海多学科长期观测(LORCE)计划(SZ2001)

收稿日期:2023-08-16; 网络出版日期:2024-04-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jzb@sio.org.cn

Abstract: In order to obtain a better understanding of the ecological status and changing characteristics of the marine ecosystem around the Shengsi Islands under human activities and global warming, we collected net and water samples of phytoplankton and analyzed environmental factors in autumn 2020 and spring 2021. A total of 6 phyla, 54 genera, and 105 species were identified, including 68 species and 33 genera of Bacillariophyta, 30 species and 14 genera of Pyrrophyta, 2 species and 2 genera of all Cyanophyta, Chrysophyta and Cryptophyta, and 1 species and 1 genus of Chlorophyta. *Skeletonema* spp. was dominant in spring and autumn, especially in autumn with dominance at 0.975. The average cell abundance in spring ((7.17 ± 7.78) cells/mL) was significantly lower than that in autumn ((77.23 ± 73.44) cells/mL). The Shannon-Wiener diversity index and the Pielou's evenness index were higher in spring than in autumn. Spearman correlation analysis showed that phytoplankton abundance was significantly positively correlated with water temperature and transparency, but negatively correlated with salinity. Redundancy analysis revealed that phytoplankton community was highly associated with temperature and nutrients. In addition, a total of 4 phyla, 46 genera, and 94 species were identified using the net collection method, with diatoms accounting for the greatest proportion. The average cell abundances in spring and autumn were 838.17×10^3 and 19406.43×10^3 cells/m³, respectively. *Skeletonema* spp. remained the dominant species, with dominance higher than that in water-collected samples. However, the diversity and evenness indices in autumn obtained from net-collected samples (0.23 and 0.05, respectively) were lower than those from water samples (0.38 and 0.10, respectively). Compared with the survey data in 1990 and 2007 using net collection method, we found that phytoplankton community around the Shengsi Islands in spring and autumn has undergone significant changes in the past 30 years. The abundance increased significantly, although the proportion of diatom and dinoflagellate species varied nonsignificantly; the warm-water species number increased markedly; the dominance of *Skeletonema* spp. increased; and the diversity and evenness indices decreased. These long-term changes in phytoplankton may be largely related to the intensification of warming and eutrophication. The concentration of dissolved inorganic nitrogen showed no significant change in spring, but increased significantly in autumn. Dissolved reactive phosphorus concentration decreased significantly in both spring and autumn. Consequently, N/P increased significantly in both spring and autumn. The changing trend of phytoplankton indicated the ecological and environmental changes around the Shengsi Islands under eutrophication and warming.

Key Words: Shengsi Islands; phytoplankton; environmental variables; eutrophication; long-term change

浮游植物是海洋生态系统最主要的初级生产者,在能量流动与物质循环中发挥着重要作用。浮游植物对环境变化十分敏感,可以作为指示种,指示生态环境变化^[1]。同时,某些浮游植物爆发性增殖或聚集所引起的有毒有害藻华严重影响海洋生态环境以及人类生产生活^[2]。

嵊泗列岛位于杭州湾以东,长江入海口以外,拥有丰富的自然资源、渔业资源以及优异的区位优势。近几十年来,随着长江污染物输入增多、自然资源的加速开发利用以及旅游业发展等人类活动影响,该海域出现了一系列生态环境问题,包括环境污染,富营养化加剧,赤潮频发,水质恶化,渔业资源衰退等^[3]。嵊泗列岛海域在特殊的流系结构和地形共同影响下,为浮游植物提供了合适的生长条件,但同时也容易导致赤潮的频繁暴发^[4]。此外,全球气候变暖影响中国近海。20世纪七十年代后,中国近海(特别是东海)海表温度(Sea Surface Temperature, SST)明显上升^[5],影响浮游植物群落的组成与分布,进而影响近海生态系统的结构和功能^[6]。

嵊泗列岛海域是典型的岛礁海域,相较于近岸开阔海域,目前对岛礁海域的相关研究较少。先前研究显示,岛礁海域的高空间异质性可能影响海洋生物群落结构,使之呈现明显的区域差异,表现出较高的丰度和生物量、生产力及生物多样性^[7-9]。过去几十年,覆盖嵊泗列岛海域的浮游植物调查(如对长江口、杭州湾和舟山海域的调查)从未间断^[10-14],但这些研究大多调查范围较广、站位布设空间距离较大,无法细致反映嵊泗列岛海域的生态环境现状,制约了对该海域生态环境变化特征及其长期变化的深入认识。为此,本文于

2020 年秋季(11 月)、2021 年春季(4 月)在嵊泗列岛海域(30.62° — 30.75° N, 122.33° — 122.61° E)布设 12 个调查站位,对采集的浮游植物水样进行分析,以反映嵊泗列岛海域浮游植物的组成、分布及季节变化,并探讨其主要受控因子;同时也对采集的浮游植物网样进行分析,并与 1990 年、2007 年的历史资料对比,以分析网采浮游植物群落的长期变化。研究结果可更好地了解在人类活动和气候变暖影响下嵊泗列岛海域浮游植物群落的生态现状与变化特征,为该海域生态环境现状及长期变化研究奠定基础,支撑其自然资源的合理保护和利用。

1 研究方法

1.1 调查时间及采样站位

本研究在浙江省舟山市嵊泗列岛海域共设置 12 个调查站位,分别于 2020 年 11 月 12 日至 13 日(秋季)和 2021 年 4 月 24 日至 25 日(春季)进行了 2 个航次的采样调查(图 1)。

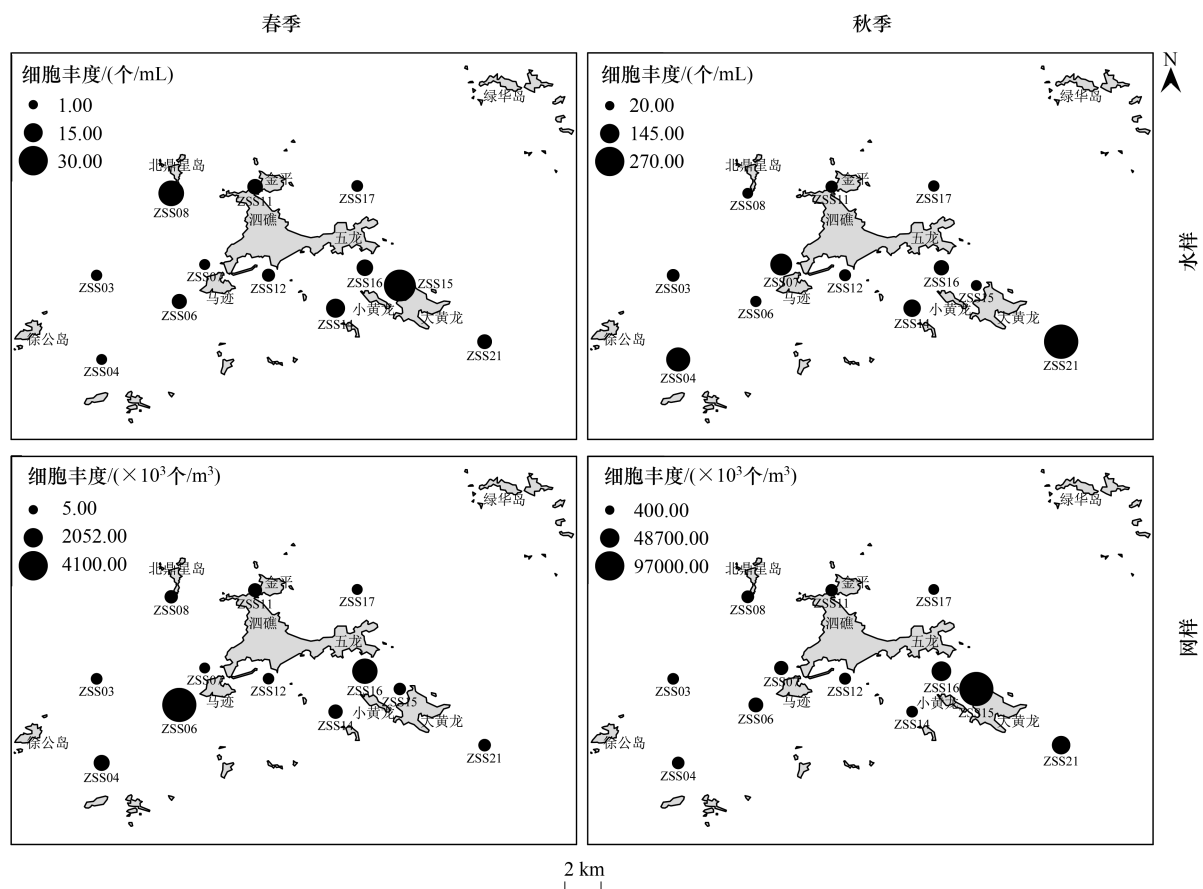


图 1 春、秋季嵊泗列岛海域采样站位及水采、网采浮游植物丰度分布图

Fig.1 Sampling stations and horizontal distribution of phytoplankton abundance around Shengsi Islands in spring and autumn using water and net collection methods

ZSS: 站位号

1.2 样品采集与分析

本研究采集浮游植物水样用于定量分析,同步采集了浮游植物网样进行分析,并与 1990 年浙江省海岛海域生物资源综合调查中嵊泗列岛海域(30.65° — 30.75° N, 122.30° — 122.57° E)以及 2007 年 908 专项嵊泗列岛海域(30.61° — 30.86° N, 122.21° — 122.76° E)调查资料进行对比(具体站位见图 2)。用装有流量计的浅水Ⅲ型浮游生物网(网口面积 0.10m^2 ,孔径为 $77\mu\text{m}$)自底至表层作垂直拖网采集网样,用 Niskin 采水器采集浮游植物表层水样 1000mL,现场用 4% 的中性甲醛进行固定。带回实验室浓缩至合适体积后,在显微镜下对浮游

植物样品进行鉴定及计数。用 CTD 测定水深、表层温度和盐度,用塞氏盘测定透明度,同时采集表层海水用以测定悬浮物(Suspended solids, SS)、溶解无机氮(Dissolved inorganic nitrogen, DIN)和活性磷酸盐(Dissolved reactive phosphorus, DRP)等环境因子。以往^[15]、本次调查均发现,该海域春、秋季温度、盐度呈垂直均匀分布,水体层化不明显,因此在本研究中表层数据有较好的代表性。调查样品采集、贮存、运输、预处理及分类鉴定过程按《海洋监测规范 第 7 部分:近海污染生态调查和生物监测》(GB 17378.7—2007)和《海洋调查规范 第 6 部分:海洋生物调查》(GB/T 12763.6—2007)中的要求进行。

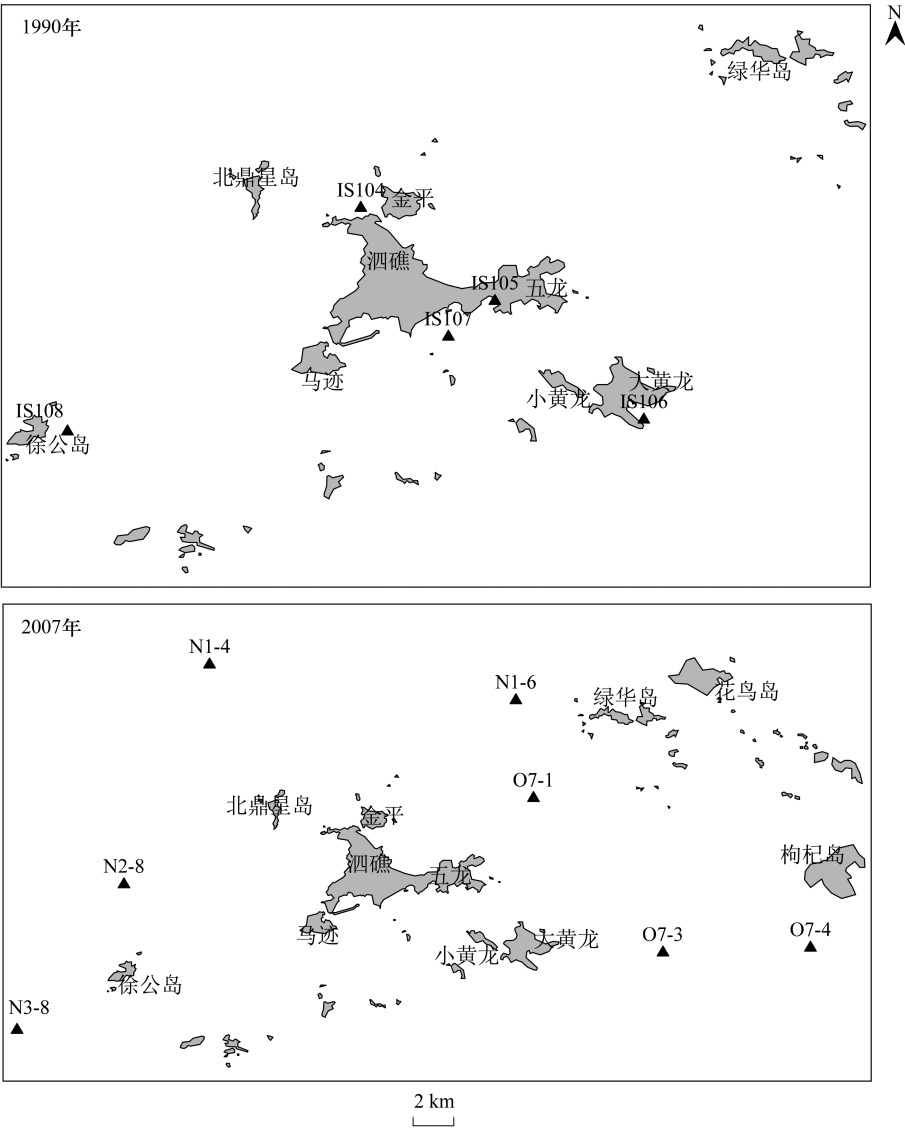


图 2 1990 年和 2007 年春、秋季嵊泗列岛海域采样站位

Fig.2 Sampling stations around Shengsi Islands in spring and autumn in 1999 and 2007
IS: 站位号; N: 站位号; O: 站位号

1.3 数据处理与分析

根据浮游植物群落多样性的常规分析方法,本文采用以下公式进行计算:

Shannon-Wiener 多样性指数(H'):

$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \times \log_2 P_i \tag{1}$$

Pielou 均匀度指数(J'):

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

优势度(Y):

$$Y = (n_i/N)f_i \quad (3)$$

式中, S 为样品中的总物种数; N 为总个体数; n_i 为第 i 种的个体数; P_i 为第 i 种的个体数与总个体数之比值,即 n_i/N ; f_i 为第 i 种在各站位出现的频率;为了方便后续计算和分析,本文将 Y 值最大的 10 个种定义为优势种,但在与历史数据对比时将 $Y \geq 0.02$ 的种定义为优势种。

采用 PRIMER 6.0,将网采浮游植物丰度进行 $\log(x+1)$ 转换后,对不同调查时期的浮游植物进行群落相似性分析(Analysis of similarities, ANOSIM)和相似性百分比(Similarity percentage, SIMPER)分析。采用 SPSS 20.0 软件,对浮游植物丰度与环境因子进行 Spearman 相关分析。为检验不同调查时间环境因子、丰度和多样性指数的差异显著性,先对数据进行正态分布和方差齐性检验,得到不符合正态分布或方差不齐($P < 0.05$)的结果后,再进行 Kruskal-Wallis (K-W) 检验单因素方差分析(One-way Analysis of Variance, ANOVA)。采用 R 4.3.0 软件,将浮游植物丰度和环境因子进行 $\log(x+1)$ 转换后,浮游植物丰度作为因变量、环境因子作为自变量构建广义可加模型(Generalized additive models, GAM)以分析环境因子对丰度的影响,模型构建使用具有最大累积解释率的正向逐步选择法,进行共线性诊断,选择赤池信息准则(Akaike information criterion, AIC)值最小且决定系数 R^2 最大的模型作为最优模型。采用 Canoco 5.0 软件,对环境因子和浮游植物优势种丰度先进行 $\log(x+1)$ 转换,然后进行除趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)。DCA 分析结果中第一轴长度小于 3,适合进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。利用前向选择(Forward selection)对水温、盐度、透明度、悬浮物、DIN、DRP 和 N/P 等环境因子进行筛选,得到显著($P < 0.05$)影响春、秋季浮游植物群落的环境因子。

2 结果

2.1 群落组成

通过对嵊泗列岛海域春、秋季浮游植物水样采集,共检出浮游植物 6 门 54 属 105 种(含变种和变型及未定种)。其中,硅藻 33 属 68 种,占有种类的 64.8%;甲藻 14 属 30 种,占有种类的 28.6%;蓝藻、金藻和隐藻各为 2 属 2 种,分别占有种类的 1.9%;绿藻 1 属 1 种,占有种类的 1.0%。春季共鉴定出浮游植物 5 门 31 属 49 种,其中,硅藻 21 属 37 种(占有种类的 75.5%),甲藻 6 属 8 种(占有种类的 16.3%),蓝藻 2 属 2 种(占有种类的 4.1%),金藻和隐藻各为 1 属 1 种(占有种类的 2.0%);秋季共鉴定出浮游植物 6 门 45 属 82 种,其中,硅藻 29 属 55 种(占有种类的 67.1%),甲藻 11 属 22 种(占有种类的 26.8%),金藻 2 属 2 种(占有种类的 2.4%),蓝藻、绿藻和隐藻各为 1 属 1 种(分别占有种类的 1.2%)。

网采样品共鉴定出浮游植物 4 门 46 属 94 种,其中硅藻 37 属 75 种,占有种类的 79.8%;甲藻 7 属 16 种,占有种类的 17.0%;蓝藻 1 属 2 种;绿藻 1 属 1 种。春季共鉴定出 4 门 30 属 47 种,其中,硅藻 25 属 42 种(占有种类的 89.4%),甲藻 3 属 3 种(占有种类的 6.4%),蓝藻和绿藻各 1 属 1 种;秋季共鉴定出 3 门 37 属 70 种,其中,硅藻 29 属 53 种(占有种类的 74.7%),甲藻 7 属 15 种(占有种类的 22.5%),蓝藻 1 属 2 种。

2.2 优势种

水采调查显示,嵊泗列岛海域春、秋季浮游植物优势种组成差异明显。春季优势种除骨条藻优势度较高外,还包括硅藻门的具槽帕拉藻、辐射圆筛藻等以及蓝藻门的鞘丝藻、红海束毛藻;秋季水采浮游植物优势种骨条藻占绝对优势($Y = 0.9750$),其平均丰度为 75.30 个/mL(表 1)。

网采调查结果与水采调查结果呈现相同趋势,春季优势种中骨条藻优势度最高($Y = 0.5150$),辐射圆筛藻、琼氏圆筛藻、星脐圆筛藻和具槽帕拉藻等也有较高的优势度;秋季骨条藻占有绝对优势,优势度为 0.9895(表 2)。

表 1 春、秋季水采浮游植物优势种(Y 值最大的 10 个种)的平均丰度(个/mL)和优势度(Y)

Table 1 Abundances (cells/mL) and dominances (Y) of dominant phytoplankton species (the top 10 species with the highest Y) in spring and autumn using water collection method

编号 Number	优势种 Dominant species	春季 Spring		秋季 Autumn	
		平均丰度 Abundance	Y	平均丰度 Abundance	Y
1	地中海辐杆藻 <i>Bacteriastrum mediterraneum</i>	—	—	0.04±0.06	0.0003
2	旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i>	—	—	0.09±0.20	0.0004
3	盾卵形藻 <i>Cocconeis scutellum</i>	0.04±0.04	0.0026	—	—
4	琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i>	—	—	0.05±0.05	0.0005
5	具边圆筛藻 <i>Coscinodiscus marginatus</i>	0.06±0.08	0.0045	—	—
6	辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i>	0.13±0.15	0.0139	0.03±0.04	0.0002
7	环纹娄氏藻 <i>Lauderia annulata</i>	—	—	0.14±0.22	0.0008
8	小细柱藻 <i>Leptocylindrus minimus</i>	0.33±1.11	0.0039	—	—
9	鞘丝藻 <i>Lyngbya</i> spp.	0.84±2.78	0.0098	—	—
10	直链藻 <i>Melosira</i> spp.	—	—	0.05±0.08	0.0003
11	舟形藻 <i>Navicula</i> spp.	0.04±0.06	0.0017	—	—
12	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	1.46±1.68	0.1522	0.13±0.18	0.0007
13	锥形原多甲藻 <i>Protoperidinium conicum</i>	—	—	0.05±0.08	0.0003
14	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	2.88±6.84	0.3009	75.30±73.48	0.9750
15	库氏双菱藻 <i>Surirella kurzii</i>	—	—	0.05±0.07	0.0004
16	红海束毛藻 <i>Trichodesmium erythraeum</i>	0.83±2.76	0.0097	—	—
17	卵形褶盘藻 <i>Tryblioptychus cocconeiformis</i>	0.05±0.06	0.0049	—	—

表 2 春、秋季网采浮游植物优势种(Y 值最大的 10 个种)的平均丰度(× 10³个/m³)和优势度(Y)

Table 2 Abundances (× 10³ cells/m³) and dominances (Y) of dominant phytoplankton species (the top 10 species with the highest Y) in spring and autumn using net-collection method

编号 Number	优势种 Dominant species	春季 Spring		秋季 Autumn	
		平均丰度 Abundance	Y	平均丰度 Abundance	Y
18	洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	—	—	17.74±27.20	0.0007
19	蛇目圆筛藻 <i>Coscinodiscus argus</i>	8.75±10.67	0.0087	—	—
20	星脐圆筛藻 <i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	48.46±114.27	0.0530	4.43±7.32	0.0002
21	有翼圆筛藻 <i>Coscinodiscus bipartitus</i>	—	—	6.04±10.04	0.0002
4	琼氏圆筛藻 <i>C. jonesianus</i>	78.39±184.08	0.0857	16.68±12.72	0.0008
6	辐射圆筛藻 <i>C. radiatus</i>	79.70±187.67	0.0951	—	—
22	苏里圆筛藻 <i>Coscinodiscus thorii</i>	13.06±30.15	0.0078	—	—
23	夜光藻 <i>Noctiluca scintillans</i>	16.29±19.76	0.0113	—	—
12	具槽帕拉藻 <i>P. sulcata</i>	35.35±51.51	0.0281	—	—
24	单角盘星藻具孔变种 <i>Pediastrum simplex</i> var. <i>duodenarium</i>	17.59±39.40	0.0035	—	—
25	柔弱伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>	—	—	11.86±14.32	0.0004
26	笔尖形根管藻 <i>Rhizosolenia styliformis</i>	—	—	5.72±7.88	0.0002
27	优美旭氏藻 <i>Schröderella delicatula</i> f. <i>delicatula</i>	—	—	11.81±35.89	0.0002
14	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	470.87±674.72	0.5150	19203.20±25463.98	0.9895
16	红海束毛藻 <i>T. erythraeum</i>	29.86±81.04	0.0059	68.32±78.23	0.0026
28	铁氏束毛藻 <i>Trichodesmium thiebautii</i>	—	—	12.04±18.35	0.0002

2.3 丰度

嵎泗列岛海域春季水采浮游植物平均丰度为(7.17±7.78)个/mL,最高值出现在 ZSS15 站位(26.70 个/mL),最低值出现在 ZSS04 站位(0.18 个/mL);秋季水采浮游植物平均丰度为(77.23±73.44)个/mL,最高值出现在 ZSS21 站位(269.50 个/mL),最低值出现在 ZSS08 站位(20.04 个/mL)。水采调查显示,春季丰度高值区位于大黄龙周边海域,并在泗礁西北方向海域出现次高值区;秋季在大黄龙东部向外海域出现丰度高值区,较春季

向东南方向移动(图 1)。

网采调查显示,春季浮游植物丰度范围为 $(6.21—4051.85) \times 10^3$ 个/ m^3 , 平均丰度为 $(838.17 \pm 1168.50) \times 10^3$ 个/ m^3 , 高值区出现在马迹附近和小黄龙北部海域;秋季丰度范围为 $(415.65—96264.00) \times 10^3$ 个/ m^3 , 平均丰度为 $(19406.43 \pm 25561.74) \times 10^3$ 个/ m^3 , 高值区出现在黄龙乡周边海域(图 1)。

2.4 多样性和均匀度

嵊泗列岛海域水采浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数(H')和 Pielou 均匀度指数(J')均存在显著季节差异。春季 H' 和 J' 的平均值(分别为 1.95 ± 0.90 和 0.55 ± 0.24)均高于秋季(分别为 0.38 ± 0.34 和 0.10 ± 0.08)。 H' 和 J' 高值区春季均位于徐公岛东部海域以及泗礁岛的东北部海域,秋季均位于徐公岛东北海域。

网采调查显示,春季 H' 和 J' 的平均值分别为 1.98 ± 0.55 和 0.55 ± 0.11 , 高值区出现在徐公岛与马迹岛之间的海域;秋季 H' 和 J' 的平均值分别为 0.23 ± 0.18 和 0.05 ± 0.04 , 高值区位于小黄龙岛和五龙岛附近海域。

2.5 群落季节差异

ANOSIM 结果表明,春、秋季水采浮游植物群落组成差异显著($R=0.500$, $P=0.001$)。SIMPER 分析结果表明,两季浮游植物群落产生差异的主要贡献物种是骨条藻、具槽帕拉藻、红海束毛藻、鞘丝藻和环纹娄氏藻,其贡献率分别为 53.0%、9.2%、3.1%、3.1% 和 2.1%。春、秋季网采浮游植物群落组成也有显著差异($R=0.650$, $P=0.001$)。SIMPER 分析表明,骨条藻、红海束毛藻、具槽帕拉藻、夜光藻和洛氏角毛藻是两季浮游植物群落组成差异的主要贡献物种,其贡献率分别为 10.7%、6.4%、4.7%、3.9% 和 3.9%。

2.6 环境因子

K-W 检验结果表明,除 DRP 和 N/P 外,水温、盐度、透明度、悬浮物和 DIN 季节差异显著($P<0.01$)。春季盐度、悬浮物显著($P<0.01$)高于秋季,春季水温、透明度和 DIN 显著($P<0.01$)低于秋季(表 3)。Spearman 相关分析表明,水采浮游植物丰度与水温呈显著($P<0.01$)正相关,与盐度呈显著($P<0.01$)负相关;网采浮游植物丰度与水温呈显著($P<0.01$)正相关,与盐度和悬浮物呈显著($P<0.01$)负相关(表 4)。

表 3 春、秋季嵊泗列岛海域环境因子(平均值±标准差)

Table 3 Environmental factors around Shengsi Islands in spring and autumn (Mean±SD)

季节 Season	水温 Water temperature/℃	盐度 Salinity	透明度 Transparency/m	悬浮物 Suspended solids/(mg/L)	DIN/ ($\mu\text{mol/L}$)	DRP/ ($\mu\text{mol/L}$)	N/P
春季 Spring	16.9±0.6	27.99±1.27	0.36±0.49	241.67±90.09	35.77±5.61	0.25±0.11	161.6±51.2
秋季 Autumn	19.6±0.4	23.15±1.70	0.56±0.23	114.67±95.30	45.17±3.82	0.27±0.11	194.3±68.8

DIN: 溶解无机氮 Dissolved inorganic nitrogen; DRP: 活性磷酸盐 Dissolved reactive phosphorus

表 4 春、秋季水采浮游植物丰度与环境因子的 Spearman 相关分析

Table 4 Spearman correlation analysis between phytoplankton abundance and environmental factors

变量 Variables	水温 Water temperature	盐度 Salinity	透明度 Transparency	悬浮物 Suspended solids	DIN	DRP	N/P
水采丰度 Water-collected abundance	0.619 **	-0.610 **	0.554 **	-0.338	0.382	-0.161	0.336
网采丰度 Net-collected abundance	0.701 **	-0.741 **	0.304	-0.438 *	0.533 **	0.111	0.154

DIN: 溶解无机氮 Dissolved inorganic nitrogen; DRP: 活性磷酸盐 Dissolved reactive phosphorus; * * 在置信度(双侧)为 0.01 时,相关性是显著的

2.7 广义可加模型(GAM)分析

表 5 展示了春、秋季水采和网采浮游植物丰度与环境因子 AIC 最小且累积解释率和 R^2 最大的最优模型构建结果。水采丰度与水温、DRP 呈显著相关($P<0.05$),而与其他环境因子相关性不显著。模型的累计解释率为 67.8%,其中水温对丰度变化的解释度最高,为 58.6%。网采丰度与水温显著($P<0.001$)相关,水温对丰

度变化的解释度为 55.9%。

表 5 广义可加模型检验结果

Table 5 Results of generalized additive models

因变量 Dependent variable	入选自变量 Selected independent variables	edf	<i>P</i>	<i>F</i>	AIC	<i>R</i> ²	方差解释率 Deviance explained/%
水采丰度 Water-collected abundance	水温	1.857	<0.001	35.252	29.48	0.632	58.6
	DRP	1.000	<0.05	6.212			9.2
水采丰度 Water-collected abundance	水温	1.582	<0.001	23.082	95.35	0.528	55.9

edf: 估计自由度 Estimated degrees of freedom; AIC: 赤池信息准则 Akaike information criterion

2.8 冗余分析(RDA)

蒙特卡罗检验表明,第一排序轴和所有排序轴的 *P* 值均小于 0.05,说明 RDA 排序结果可信。对水采浮游植物的 RDA 分析结果表明,第一排序轴解释了物种数据总差异的 71.8%,包含的物种与环境相关系数为 0.9540,第二排序轴解释了物种数据总差异的 3.3%,包含的物种与环境相关系数为 0.7233,前两个排序轴累计解释 77.9%的物种与环境之间的关系。水温、DRP 和 N/P 为显著 (*P*<0.05) 影响嵊泗列岛海域春、秋季水采浮游植物群落的环境因子,解释度分别为 65.5%、4.3%和 3.1%。春季水采浮游植物多数优势种与水温、DRP 和 N/P 呈负相关。两季均有的优势种骨条藻、具槽帕拉藻和辐射圆筛藻与水温 and 营养盐无明显相关,说明这些种类适宜的生长条件较为宽广,不易受到水温和营养盐条件的限制。秋季水采浮游植物多数优势种与水温、DRP 和 N/P 呈正相关。地中海辐杆藻和琼氏圆筛藻与水温正相关,而与 DRP 无明显相关性,表明这些种类适宜生活在水温较高的环境(图 3)。

对网采浮游植物的 RDA 分析结果表明,第一排序轴解释了物种数据总差异的 59.6%,包含的物种与环境相关系数为 0.9414,第二排序轴解释了物种数据总差异的 4.2%,包含的物种与环境相关系数为 0.7559,前两个排序轴累计解释 68.9%的物种与环境之间的关系。水温为显著 (*P*<0.01) 影响嵊泗列岛海域春、秋季网采浮游植物群落的环境因子,解释度为 55.1%。红海束毛藻和铁氏束毛藻与水温呈正相关,表明它们在台湾暖流等外洋暖水中更占优势,而夜光藻与水温呈负相关,随着水温的降低,夜光藻优势增强,表明夜光藻在较低的水温中生长更好(图 3)。

2.9 与历史资料的比较

由于 1990 年的调查未采集 NH₄-N 数据,因此 DIN 仅包含 NO₃-N 和 NO₂-N。单因素 ANOVA 分析结果表明,从 1990 年、2007 年到 2020—2021 年,DIN 浓度在春季变化不显著,平均值分别为(30.27±7.56)、(24.33±9.79)和(25.38±5.78) μmol/L,在秋季显著 (*P*<0.05) 上升,平均值分别为(31.99±5.60)、(34.15±9.64)和(41.17±3.09) μmol/L。DRP 浓度在春、秋季均显著 (*P*<0.05) 下降,1990 年、2007 年和 2020—2021 年春季 DRP 浓度的平均值分别为(0.49±0.11)、(0.61±0.16)和(0.25±0.11) μmol/L,秋季平均值分别为(1.02±0.13)、(0.94±0.23)和(0.27±0.11) μmol/L。N/P 在春、秋季均显著 (*P*<0.05) 上升,1990 年、2007 年和 2020—2021 年春季 N/P 的平均值分别为 66.9±24.6、40.1±14.8 和 111.0±29.6,秋季平均值分别为 32.1±9.0、36.4±6.5 和 179.4±67.9 (图 4)。

单因素 ANOVA 结果表明,从 1990 年、2007 年到 2020—2021 年,浮游植物丰度在春、秋季均呈显著 (*P*<0.05) 上升,春季浮游植物平均丰度分别为(0.07±0.04)、(77.03±113.52)和(838.17±1168.50) ×10³ 个/m³,秋季平均丰度分别为(159.37±200.21)、(34.80±19.65)和(19406.43±25561.74) ×10³ 个/m³。*H'*在春季显著 (*P*<0.05) 下降,1990 年、2007 年和 2020—2021 年的平均值分别为 2.91±0.41、1.69±0.72 和 1.98±0.55,*H'*在秋季变化显著 (*P*<0.05),但无明显上升或下降趋势,平均值分别为 0.47±0.56、2.51±0.75 和 0.23±0.18。*J'*在春季显著 (*P*<0.05) 下降,1990 年、2007 年和 2020—2021 年的平均值分别为 0.77±0.10、0.49±0.21 和 0.55±0.11,*J'*在

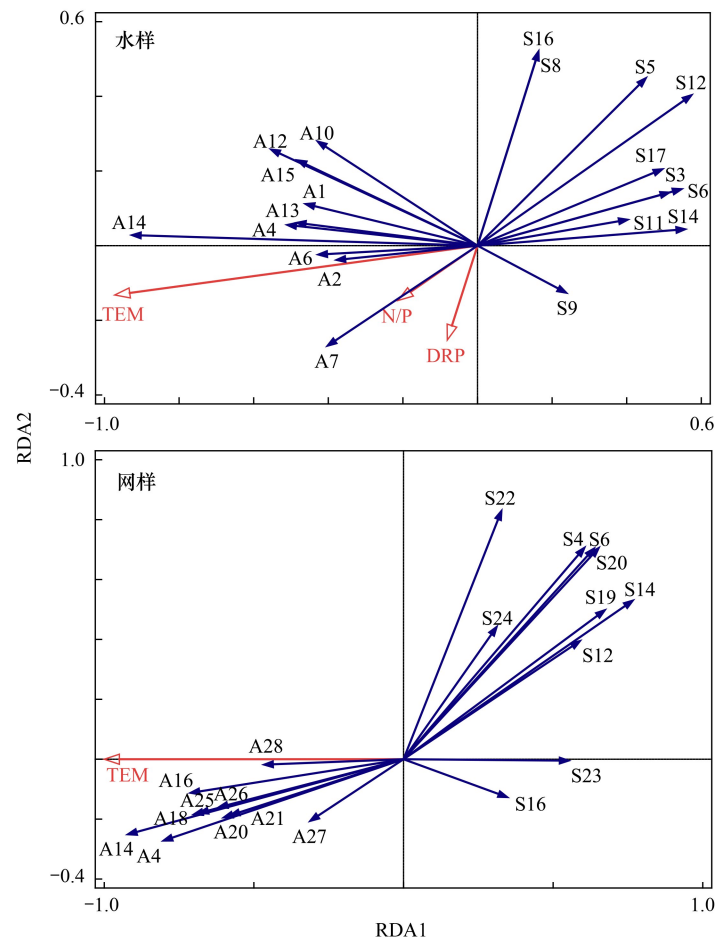


图3 春秋季节浮游植物优势种丰度与环境因子的 RDA 排序图

Fig.3 RDA ordination of dominant phytoplankton species with environmental factors in spring and autumn

1—28: 优势种 dominant phytoplankton species; S: 春季 Spring; A: 秋季 Autumn; TEM: 水温 Temperature; DRP: 活性磷酸盐 Dissolved reactive phosphorus

秋季变化显著 ($P < 0.05$), 但无明显上升或下降趋势, 平均值分别为 0.14 ± 0.18 、 0.81 ± 0.11 和 0.05 ± 0.04 (图 5)。

1990 年春季浮游植物的种类数为 30 种, 其中硅藻为 24 种, 所占比例达到 80.0%, 甲藻为 6 种, 所占比例为 20.0%; 秋季为 32 种, 其中硅藻 26 种 (81.3%), 甲藻 5 种 (15.6%)。2007 年春季浮游植物的种类数为 26 种, 其中硅藻 18 种 (69.2%), 甲藻 4 种 (15.4%); 秋季为 40 种, 其中硅藻 26 种 (65.0%), 甲藻 12 种 (30.0%)。2020—2021 年春季浮游植物的种类数为 47 种, 其中硅藻 42 种 (89.4%), 甲藻为种 (6.4%); 秋季为 70 种, 其中硅藻 53 种 (75.7%), 甲藻 15 种 (21.4%)。1990 年春季硅藻、甲藻丰度占比分别为 68.7% 和 31.3%; 秋季硅藻、甲藻丰度占比分别为 99.997% 和 0.003%。2007 年春季硅藻、甲藻丰度占比分别为 99.1% 和 0.7%, 秋季硅藻、甲藻丰度占比分别为 79.4% 和 14.2%。2020—2021 年春季硅藻、甲藻丰度占比分别为 92.4% 和 2.0%, 秋季硅藻、甲藻丰度占比分别为 99.54% 和 0.05% (图 5)。

1990 年春季浮游植物优势种有 8 种, 分别为夜光藻、琼氏圆筛藻、短角角藻 (*Ceratium breve*)、辐射圆筛藻、虹彩圆筛藻 (*Coscinodiscus oculus-iridis*)、梭角藻 (*Ceratium fusus*)、骨条藻和蛇目圆筛藻, 秋季优势种仅骨条藻 1 种; 2007 年春季优势种 3 种, 分别为骨条藻、琼氏圆筛藻和虹彩圆筛藻, 秋季优势种 5 种, 分别为骨条藻、有棘圆筛藻 (*Coscinodiscus spinosus*)、整齐圆筛藻 (*Coscinodiscus concinnus*)、苏里圆筛藻和梭角藻; 2020—2021 年春季优势种 5 种, 分别为骨条藻、辐射圆筛藻、琼氏圆筛藻、星脐圆筛藻和具槽帕拉藻, 秋季优势种仅骨条藻

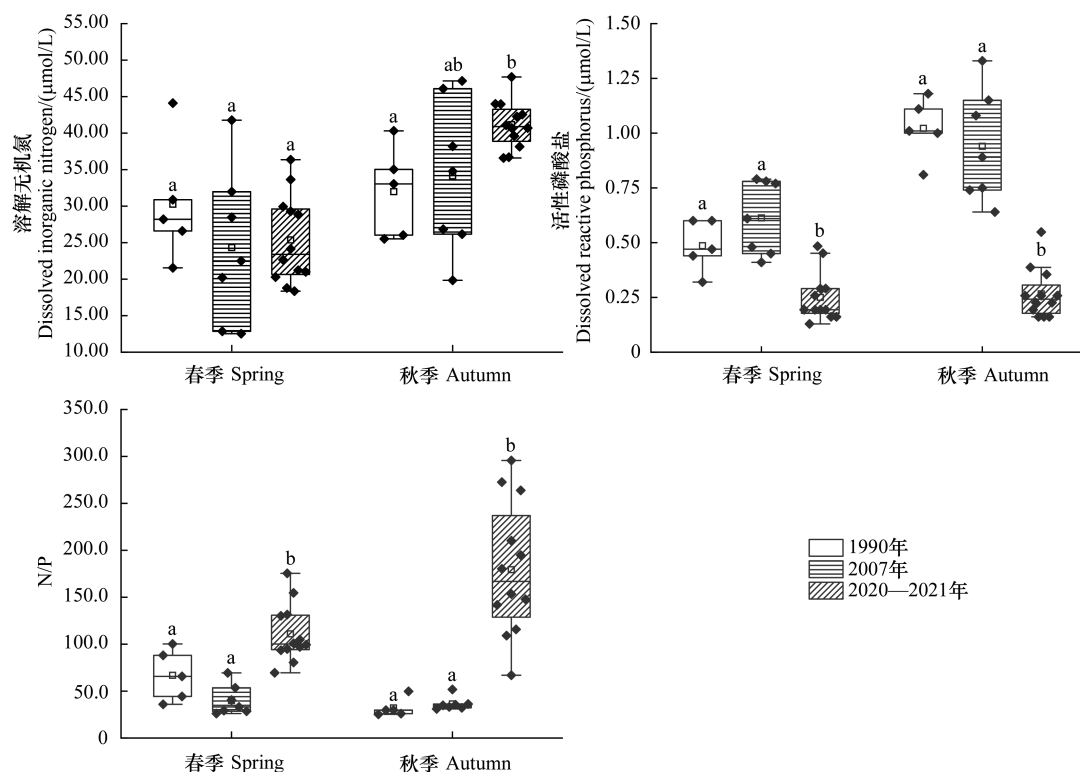


图4 1990年、2007年和2020—2021年春秋季营养盐对比

Fig.4 Comparison of nutrients in spring and autumn in 1990, 2007 and 2020—2021

同一季节上标的小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)

1种(图5)。

ANOSIM 结果表明,1990年、2007年和2020—2021年的春、秋季浮游植物群落组成均呈显著 ($P = 0.001$) 差异。SIMPER 分析结果表明,春季,1990年和2007年浮游植物群落产生差异的主要贡献物种是琼氏圆筛藻、虹彩圆筛藻、骨条藻、星脐圆筛藻和中国盒形藻 (*Biddulphia sinensis*),其贡献率分别为28.2%、14.5%、11.4%、7.1%和6.9%,2007年和2020—2021年浮游植物群落产生差异的主要贡献物种是骨条藻、辐射圆筛藻、具槽帕拉藻、夜光藻和琼氏圆筛藻,其贡献率分别为14.8%、8.3%、7.7%、6.7%和6.3%;秋季,1990年和2007年浮游植物群落产生差异的主要贡献物种是骨条藻、有棘圆筛藻、整齐圆筛藻、苏里圆筛藻和中心圆筛藻 (*Coscinodiscus centralis*),其贡献率分别为21.3%、15.9%、11.8%、8.3%和5.3%,2007年和2020—2021年浮游植物群落产生差异的主要贡献物种是骨条藻、红海束毛藻、琼氏圆筛藻、有棘圆筛藻和洛氏角毛藻,其贡献率分别为17.5%、6.7%、5.4%、3.8%和3.8%。可见,骨条藻和圆筛藻是群落组成改变的重要原因种。另外,春季典型暖水种从1990年和2007年的6种增加至2020—2021年的12种,秋季则从1990年的10种、2007年的16种增加至2020—2021年的22种。

3 讨论

3.1 浮游植物群落组成的受控因子

嵊泗列岛海域春季水采浮游植物平均丰度为7.17个/mL,明显低于秋季(77.23个/mL)。秋季骨条藻平均丰度为75.30个/mL,占总丰度的97.5%,而春季骨条藻的平均丰度仅为2.88个/mL,占总丰度的40.2%,表明春、秋季浮游植物的丰度差值主要由骨条藻贡献,这与以往研究结果一致^[13]。但同期叶绿素a浓度季节变化表现为春季 $[(1.94 \pm 0.70) \text{ mg/m}^3]$ 明显高于秋季 $[(1.44 \pm 0.62) \text{ mg/m}^3]$,这与丰度的季节变化不一致。这是

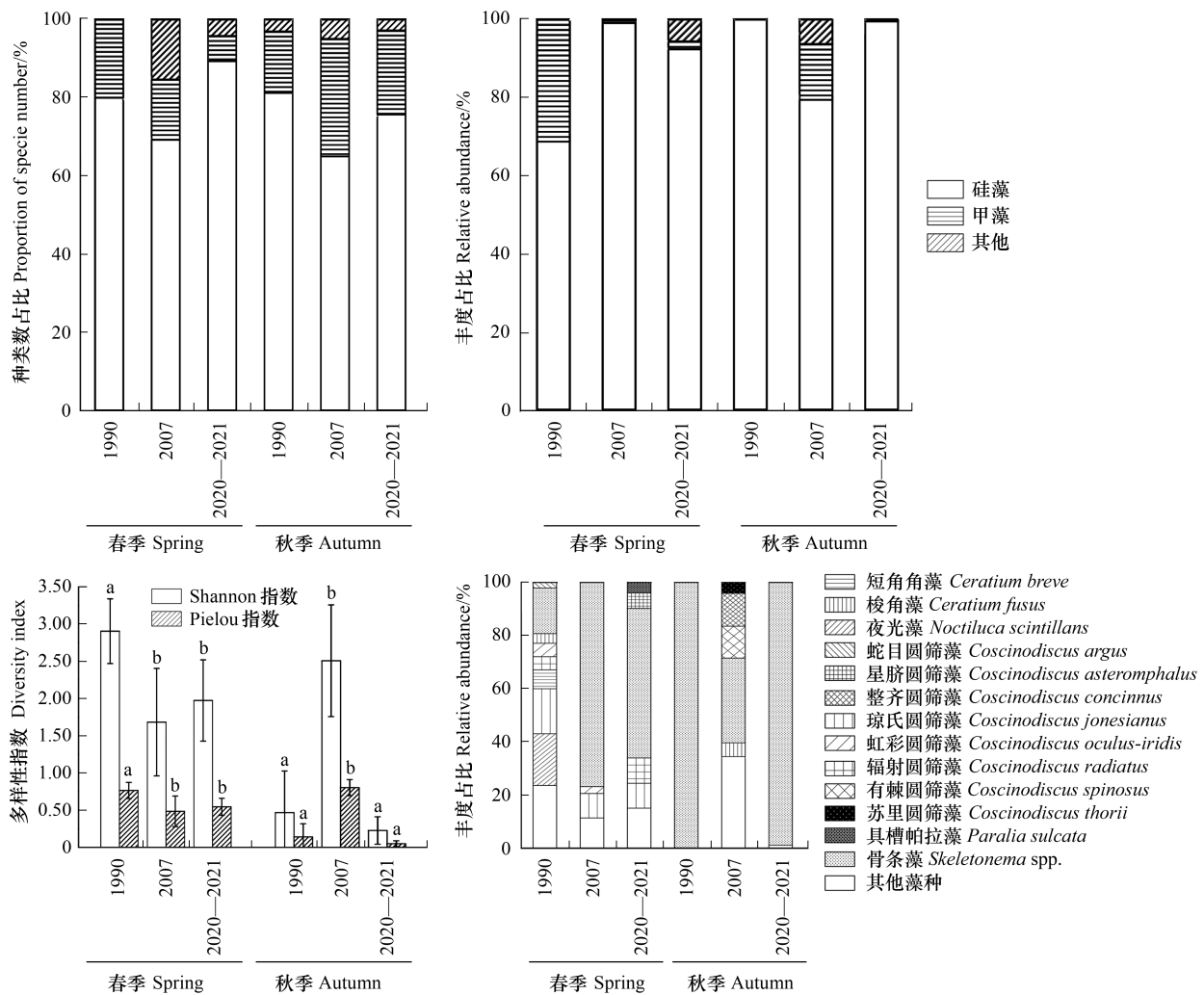


图5 1990年、2007年和2020—2021年春夏季网采浮游植物的种类数占比、丰度占比、多样性指数和主要优势种丰度占比

Fig.5 Proportion of species number, relative abundance, diversity index and relative abundances of main dominant species in spring and autumn in 1990, 2007 and 2020—2021

同一季节上标的小写字母代表差异显著 ($P < 0.05$)

因为秋季骨条藻大量繁殖显著增加了浮游植物的个体数,但是因其细胞较小,导致叶绿素 a 浓度并未显著升高。Spearman 相关分析表明,浮游植物丰度与水温呈显著正相关,而与盐度呈显著负相关(表 4)。骨条藻生长最适温度约为 25°C ,能够在盐度小于 23 的条件下大量繁殖^[10–11]。表 3 显示,春季水温 (16.9°C) 显著低于秋季 (19.6°C),春季盐度 (27.98) 显著高于秋季 (23.15)。相较于春季,秋季水温和盐度更有利于骨条藻的生长和繁殖,显著提高了秋季浮游植物的丰度值。从空间分布上看,丰度高值区主要位于嵊泗列岛海域的东南方向,可能是从东南向西北方向扩展的台湾暖流水,使嵊泗列岛迎流面相比于背流面拥有更高的透明度和浮游植物丰度^[16]。春季透明度 (0.36m) 显著低于秋季 (0.56m),悬浮物含量则刚好相反。相关性分析还表明,浮游植物丰度与透明度呈显著正相关,与悬浮物含量呈负相关。长江、钱塘江等径流携带的大量悬浮泥沙入海,高悬浮物含量导致水体浑浊、透明度下降,抑制光合作用,不利于浮游植物生长^[17]。GAM 结果表明,水温和 DRP 是影响浮游植物丰度变化的主要环境因子,秋季较高的水温、透明度、营养盐浓度和氮磷比有利于骨条藻的大量繁殖^[18–19],是导致秋季浮游植物丰度显著高于春季的主要原因(表 3 和表 5)。

春、秋季浮游植物群落组成差异显著。骨条藻、具槽帕拉藻、红海束毛藻、鞘丝藻和环纹委氏藻等优势种是两季浮游植物群落结构产生差异的主要贡献物种,其中,骨条藻的贡献率为 53.0%,远大于其他藻种。属于

近岸广温种的骨条藻和具槽帕拉藻在 RDA 排序图上与水温 and 营养盐无明显相关性(图 3)。它们是春、秋季共同优势种,但秋季较高的水温和较低的盐度使骨条藻更具竞争优势^[10-11],骨条藻的丰度占比和优势度明显高于春季,而具槽帕拉藻则更加适应于光照较弱、水温较低、营养盐较高的环境条件^[20],在春季拥有更高的丰度占比和优势度(分别为 20.3% 和 0.1522)。红海束毛藻是典型暖水种,两季都有出现,为春季优势种($Y=0.0097$),丰度为 0.83 个/mL。文献表明^[21],春季长江冲淡水对长江口海域的影响程度小于秋季,由于外海水的入侵强弱受到长江径流量和长江冲淡水扩展的影响,春季黑潮次表层水对该海域的入侵强于秋季。台湾暖流和黑潮次表层水等外海水在入侵的同时,带来红海束毛藻等暖水种。春季,势力逐渐增强的长江冲淡水也向嵊泗列岛海域输入了鞘丝藻等淡水藻种,共同增加了浮游植物种类数。同 RDA 排序结果一致,水温和营养盐是显著影响嵊泗列岛海域春、秋季浮游植物群落组成的主要环境因子,且水温的影响更为显著。

3.2 浮游植物群落结构的长期变化

从 1990 年、2007 年到 2020—2021 年,春季嵊泗列岛海域浮游植物丰度从 0.07×10^3 个/ m^3 、 77.03×10^3 个/ m^3 上升至 838.17×10^3 个/ m^3 ,秋季丰度从 159.37×10^3 个/ m^3 下降至 34.80×10^3 个/ m^3 后,再上升至 19406.43×10^3 个/ m^3 (图 5)。嵊泗列岛海域浮游植物丰度的升高趋势与长江口及邻近海域一致^[17,22],这可能与人类活动导致富营养化加剧有关。调查结果显示,从 1990 年、2007 年到 2020—2021 年,春季 DIN 浓度无显著变化,秋季 DIN 浓度从 $31.99 \mu\text{mol/L}$ 、 $34.15 \mu\text{mol/L}$ 显著上升至 $41.17 \mu\text{mol/L}$;春、秋季 DRP 浓度均显著下降,但仍高于浮游植物生长的最低阈值($\leq 0.1 \mu\text{mol/L}$)^[23];氮磷比均显著上升,春季从 66.9、40.1 上升至 111.0,秋季从 32.1、36.4 上升至 179.4(图 4)。Jiang 等^[10]研究了 1959 年到 2009 年夏季长江口及邻近海域浮游植物群落的长期变化,发现在富营养化加剧等影响下浮游植物丰度持续升高。Zhang 等^[11]调查了 2004 年到 2010 年夏季杭州湾浮游植物群落组成,并与历史数据对比,发现过去 30 年该海域浮游植物群落在富营养化加剧、悬浮物浓度降低等条件下丰度明显升高。陈悦等^[24]对比了杭州湾秦山核电站近 30 年浮游植物群落组成,认为调查海域丰度明显上升的原因可能是富营养化加剧和水温升高等因素的共同作用。王洁等^[25]的研究表明,长江口及邻近海域从 1982 年到 2017 年的 36 年间 SST 每 10 年升高 0.5°C ,四个季节均呈升温趋势,其中,春季 SST 增温最为明显,秋季最不明显。富营养化与 SST 上升使浮游植物生物量增加^[26]。先前研究表明,长江输沙量的时空变化影响了浙闽沿岸海域的泥沙浓度^[27],从 20 世纪 80 年代开始,长江输沙量的持续减少使得长江口及邻近海域浊度下降、透明度增加,缓解了该海域浮游植物生长的较严重的光限制,在水体营养盐充足的条件下,浮游植物大量繁殖,甚至引发赤潮^[28]。

图 5 显示了从 1990 年、2007 年到 2020—2021 年嵊泗列岛海域浮游植物群落组成变化,均表明该海域以硅藻为主,甲藻次之,其他门类占少数,这与以往研究结果一致^[13-14]。但春、秋季嵊泗列岛海域硅藻、甲藻种类数占比和丰度占比均未出现明显的上升或下降趋势,这与长江口及邻近海域硅藻占比下降、甲藻占比升高的趋势不同^[17,22]。从 1990 年、2007 年到 2020—2021 年,春季优势种数量减少,夜光藻、短角角藻、梭角藻等甲藻失去优势地位,圆筛藻种类减少,链状硅藻优势度上升,骨条藻优势度从 0.03、0.22 升高至 0.51;秋季除 2007 年外,1990 年和 2020—2021 年秋季骨条藻均是唯一优势种,优势度分别为 0.9994 和 0.99。作为长江口及邻近海域的主要优势种,骨条藻在嵊泗列岛海域同样表现出明显的优势地位^[17,22]。这可能是近 50 年以来,长江硅酸盐入海通量及长江口硅氮比下降^[29]不利于对硅酸盐需求更高的圆筛藻等大个体、硅质化强的硅藻的生长,小个体、硅质化弱的硅藻种类的优势度上升。气候变暖也使得浮游硅藻优势种出现小型化趋势^[30-31]。此外,相较于非群体生活的微藻,骨条藻、具槽帕拉藻等链状硅藻对环境的适应能力更强,更具竞争优势^[17]。研究海域相对较高的 DRP 浓度($0.1-1.1 \mu\text{mol/L}$),也有利于骨条藻维持其种群竞争能力,保持优势地位^[23]。相较于 1990 年和 2020—2021 年,2007 年秋季骨条藻优势度较低,可能是因为 2007 年秋季盐度(24.36 ± 4.66)高于骨条藻的最适盐度范围(-23),不利于骨条藻的生长。另外,本次调查根据网样计算的骨条藻丰度占比(春季占比为 56.2%,秋季占比为 99.0%)明显大于根据水样计算的丰度占比,可能是网采方法相较于水采方法,在对单细胞小个体硅藻采样不足的同时,高估了链状硅藻或大个体硅藻的优势度^[32-33]。这

在优势种和多样性中均有所体现,相较于水样,利用网样计算的秋季嵊泗列岛海域的 H' 和 J' (平均值分别为 0.23 ± 0.18 和 0.05 ± 0.04) 较低,可能是小个体物种丢失以及骨条藻优势度被高估导致的,而骨条藻、圆筛藻等藻种更易被拖网捕获,使得网采优势种均为链状、群体细胞或大个体硅藻(表 2)。

相较于 1990 年和 2007 年,2020—2021 年的暖水种类数均显著增加。气候变暖使得嵊泗列岛海域水温升高,有利于暖水种生长。王洁等^[25]发现,从 1990 年到 2020—2021 年,长江口及邻近海域水温已经增长了约 1.5°C ,快速增长的水温深刻影响了浮游生物的群落组成和生物地理分布,相关研究也证实了这点。Jiang 等^[34]研究了 2011—2012 年东海和南黄海典型暖水种束毛藻的分布格局,发现与 20 世纪 70 年代相比,由于气候变暖引起的黑潮及台湾暖流入侵增强,研究海域束毛藻的密度增加,分布边界向北移动。孙振皓等^[35]调查了 2017 年夏季长江口的浮游植物,通过与 30 年来主要优势种进行对比,发现在气候变化背景下暖水种明显增多且分布范围向北扩展的现象。Zhang 等^[36]于 2004 年春夏秋冬四季对长江口浮游动物群落进行了采样分析,发现常分布于热带—亚热带的桡足类锥形宽水蚤(*Temora turbinata*)首次成为该研究海域丰度最高的优势种,推测可能是向北入侵的台湾暖流输入该物种的能力增强,而升高的水温为锥形宽水蚤提供了增殖的有利条件。长江口锥形宽水蚤成为优势物种是全球变暖导致暖水物种向北扩展的一个重要例子。随着气候变暖,黑潮、台湾暖流等外海水输入增强,携带了更多的暖水种进入长江口及邻近海域,水温升高则为暖水种提供了适宜的生长环境,改变了浮游植物种类组成和分布格局^[35,37]。

在多样性方面,图 5 显示三次调查总体上春季 H' 和 J' 的平均值高于秋季。在对海域浮游植物群落进行综合评价时,认为 $H' < 1$ 和 $J' < 0.3$ 的群落多样性较差^[38]。除 2007 年外,秋季的 H' 均小于 1, J' 小于 0.3;春季的 H' 均大于 1, J' 大于 0.3。骨条藻在 1990 年和 2020—2021 年秋季占有绝对优势且是唯一优势种,导致多样性降低,因此群落多样性较差,而 2007 年包括骨条藻在内有 5 种优势种,各优势种优势度较为均匀,多样性较好;春季优势种较多,物种多样性较好,群落结构相比于秋季更稳定^[39]。从长期变化上看,与 1990 年和 2007 年相比,2020—2021 年春、秋季的种类数均有明显增加,这可能与本次调查站位较多、暖水种输入增加以及浮游植物的研究方法和藻类分类技术进步能观察并计数的藻种增加有关^[17]。1990 年、2007 年到 2020—2021 年,春季优势种分别为 8 种、3 种和 5 种, H' 和 J' 显著降低,分别从 2.91 和 0.77、1.69 和 0.49 降低至 1.98 和 0.55;在 1990 年和 2020—2021 年秋季,骨条藻是该海域的唯一优势种, H' 和 J' 降低,而 2007 年骨条藻优势地位下降, H' 和 J' 明显升高。这表明近年来随骨条藻优势地位增强,嵊泗列岛海域浮游植物群落多样性降低,群落结构稳定性呈下降趋势。

嵊泗列岛海域属于岛礁海域,其空间异质性仅影响了浮游植物的丰度分布(图 1),但未显著影响浮游植物群落结构特征。这可能是因为嵊泗列岛海域作为长江口的一部分,主要受长江冲淡水 and 台湾暖流的影响^[40],理化环境因子(温度、盐度、浊度、无机氮、磷酸盐、硅酸盐及营养盐结构等)的变化与长江口较为一致^[40—41],使得该海域浮游植物群落特征未显著区别于长江口。苏芯莹等^[16]对珠江口庙湾岛和外伶仃岛周边海域的浮游植物分布特征的研究也得出了类似观点,即珠江径流的时空变化是引起海岛周边海域浮游植物群落组成季节差异的主导因子,岛屿的屏蔽效应显著影响了丰水期的浮游植物丰度区域分布特征,而未明显影响群落结构。与长江口、珠江口、黄河口等沿岸开放海域相比,嵊泗列岛海域浮游植物群落同样呈现优势种组成变化、暖水种类数明显增加等变化特征,体现了人类活动和气候变化共同影响下近海浮游植物群落结构的变化趋势^[17,42—43]。

4 结论

(1) 2020—2021 年春、秋季嵊泗列岛海域浮游植物群落以硅藻为主,甲藻次之。优势种主要为硅藻门的骨条藻。与春季相比,秋季较高的水温、透明度、营养盐浓度和较低的盐度有利于骨条藻大量繁殖并形成绝对优势,使得秋季的平均细胞丰度较高,而多样性指数和均匀度指数较低。

(2) 结合 1990 年和 2007 年调查的历史资料与相关文献,发现在富营养化加剧、悬浮物浓度和硅酸盐通

量降低、海表温度上升等环境条件下,近 30 年来嵊泗列岛海域浮游植物群落出现丰度显著升高,暖水种类数增加,骨条藻优势地位增强,多样性和均匀度指数下降等变化特征。

(3) 骨条藻演变成绝对优势种,使嵊泗海域浮游植物群落多样性降低,稳定性下降,骨条藻赤潮风险加剧。浮游植物变化特征较好地指示了嵊泗列岛海域在富营养化和气候变化下的生态环境变化。但本研究仅对比了 1990 年和 2007 年的调查资料,为了进一步探究嵊泗列岛海域的生态环境变化特征,还需对嵊泗列岛海域浮游植物开展长期监测,更好地反映该海域的健康状况和环境治理成效。

参考文献(References):

- [1] 李清雪,陶建华.应用浮游植物群落结构指数评价海域富营养化.中国环境科学,1999,19(6):548-551.
- [2] Cui Z M, Xu Q, Gibson K, Liu S Y, Chen N S. Metabarcoding analysis of harmful algal bloom species in the Changjiang Estuary, China. Science of the Total Environment, 2021, 782: 146823.
- [3] 苏天骄,黄明伟,杨锋,王飞,马家志,臧迎亮,刘舜斌,宋伟华.嵊泗沿岸渔业现状调查分析.水产科技情报,2018,45(1):56-60.
- [4] 周名江,颜天,邹景忠.长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探.应用生态学报,2003,14(7):1031-1038.
- [5] Cai R S, Tan H J, Kontoyiannis H. Robust surface warming in offshore China Seas and its relationship to the East Asian monsoon wind field and ocean forcing on interdecadal time scales. Journal of Climate, 2017, 30(22):8987-9005.
- [6] Domis L N, Van de Waal D B, Helmsing N R, Van Donk E, Mooij W M. Community stoichiometry in a changing world: combined effects of warming and eutrophication on phytoplankton dynamics. Ecology, 2014, 95(6):1485-1495.
- [7] 陈怡卉,汪振华,章守宇,程晓鹏,邹沁东,林沅.大陈岛礁海域甲壳类群落结构时空格局及其环境驱动.生态学报,2023,43(23):9577-9596.
- [8] 韩旭东,章守宇,汪振华,王凯,林军,邓明星,吴星辰.马鞍列岛及其东部海域鱼类群落格局与环境因子之间的关系.水产学报,2019,43(6):1483-1497.
- [9] Messié M, Petrenko A, Doglioli A M, Martinez E, Alvain S. Basin-scale biogeochemical and ecological impacts of islands in the tropical Pacific Ocean. Nature Geoscience, 2022, 15: 469-474.
- [10] Jiang Z B, Liu J J, Chen J F, Chen Q Z, Yan X J, Xuan J L, Zeng J N. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years. Water Research, 2014, 54: 1-11.
- [11] Zhang Y X, Yu J, Jiang Z B, Wang Q, Wang H. Variations of summer phytoplankton community related to environmental factors in a macro-tidal estuarine embayment, Hangzhou Bay, China. Journal of Ocean University of China, 2015, 14(6):1025-1033.
- [12] 黄海燕,王秋璐,许艳,刘捷,曲艳敏.2004—2016 年夏季长江口网采浮游植物及其影响因素.海洋与湖沼,2018,49(2):319-330.
- [13] 魏娜,王文娟,柴小平,黄备,王婕妤.舟山海域浮游植物生态调查与研究.浙江海洋学院学报:自然科学版,2015,34(3):233-237.
- [14] 唐锋,蒋霞敏,王弢,孙元,林清菁.舟山典型海区浮游植物的动态变化.海洋环境科学,2013,32(1):67-72.
- [15] 刘兴泉,侯一筠,尹宝树,杨德周.长江口及其邻近海区环流和温、盐结构动力学研究Ⅳ盐度结构.海洋与湖沼,2015,46(3):534-540.
- [16] 苏芯莹,钟瑜,李尧,谭美婷,黄亚东,刘珊,徐向荣,宋星宇.珠江口典型海岛周边水域浮游植物分布特征及其影响因素.热带海洋学报,2020,39(5):30-42.
- [17] 林梅,李扬.长江口海域春季浮游植物的年际变化.海洋与湖沼,2017,48(2):303-311.
- [18] 易斌,陈凯彪,周俊杰,吕意华.2009 年至 2016 年华南近海赤潮分布特征.海洋湖沼通报,2018(2):23-31.
- [19] Huang K X, Feng Q L, Zhang Y, Ou L J, Cen J Y, Lu S H, Qi Y Z. Comparative uptake and assimilation of nitrate, ammonium, and urea by dinoflagellate *Karenia mikimotoi* and diatom *Skeletonema costatum* s.l. in the coastal waters of the East China Sea. Marine Pollution Bulletin, 2020, 155: 111200.
- [20] Gebühr C, Wiltshire K H, Aberle N, van Beusekom J, Gerdt G. Influence of nutrients, temperature, light and salinity on the occurrence of *Paralia sulcata* at Helgoland Roads, North Sea. Aquatic Biology, 2009, 7: 185-197.
- [21] 石晓勇,王修林,韩秀荣,祝陈坚,孙霞,张传松.长江口邻近海域营养盐分布特征及其控制过程的初步研究.应用生态学报,2003,14(7):1086-1092.
- [22] 贾海波,邵君波,胡颖琰,王益鸣,魏娜,胡序朋.三峡水库蓄水前后长江口及其邻近海域浮游植物群落结构的变化及原因分析.海洋通报,2014,33(3):305-314.
- [23] 江兴龙,宋立荣.泉州湾赤潮藻类优势种演替影响因子探讨.海洋与湖沼,2009,40(6):761-767.
- [24] 陈悦,江志兵,寿鹿,朱根海,王志富,廖一波,高月鑫.秦山核电站邻近海域网采浮游植物群落分布及其影响因素.海洋通报,2018,37(2):149-157.

- [25] 王洁, 王杰, 许佳峰, 栾奎峰, 杨奕杰, 吕阳阳. 长江口邻近海域海表温度变化特征分析. 海洋科学进展, 2020, 38(4): 624-634.
- [26] Gerhard M, Koussoroplis A M, Hillebrand H, Striebel M. Phytoplankton community responses to temperature fluctuations under different nutrient concentrations and stoichiometry. Ecology, 2019, 100(11): e02834.
- [27] 陈瑞瑞, 蒋雪中. 长江河口悬浮泥沙向浙闽沿岸输运近期变化的遥感分析. 海洋科学, 2017, 41(3): 89-101.
- [28] Wang B D, Xin M, Sun X, Wei Q S, Zhang X L. Does reduced sediment load contribute to increased outbreaks of harmful algal blooms off the Changjiang Estuary? Acta Oceanologica Sinica, 2016, 35(8): 16-21.
- [29] Dai Z J, Du J Z, Zhang X L, Su N, Li J F. Variation of riverine material loads and environmental consequences on the Changjiang (Yangtze) estuary in recent decades (1955-2008). Environmental Science & Technology, 2011, 45(1): 223-227.
- [30] 林更铭, 杨清良. 全球气候变化背景下台湾海峡浮游植物的长期变化. 应用与环境生物学报, 2011, 17(5): 616-621.
- [31] Finkel Z V, Beardall J, Flynn K J, Quigg A, Rees T A V, Raven J A. Phytoplankton in a changing world: cell size and elemental stoichiometry. Journal of Plankton Research, 2010, 32(1): 119-137.
- [32] 高月鑫, 江志兵, 曾江宁, 陈悦, 寿鹿. 春季长江口北支邻近海域浮游植物群落及其影响因子. 海洋通报, 2018, 37(4): 430-439.
- [33] Jiang Z B, Liu J J, Zhu X Y, Chen Y, Chen Q Z, Chen J F. Quantitative comparison of phytoplankton community sampled using net and water collection methods in the southern Yellow Sea. Regional Studies in Marine Science, 2020, 35: 101250.
- [34] Jiang Z B, Li H L, Zhai H C, Zhou F, Chen Q Z, Chen J F, Zhang D S, Yan X J. Seasonal and spatial changes in *Trichodesmium* associated with physicochemical properties in East China Sea and southern Yellow Sea. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2018, 123(2): 509-530.
- [35] 孙振皓, 盛留洋, 江新琴, 马晓, 王斌, 曾江宁, 江志兵. 2017 年夏季长江口浮游植物暖水种增多现象分析. 海洋学研究, 2021, 39(4): 82-90.
- [36] Zhang G T, Song S, Xu Z, Zhang Q. Unexpected dominance of the subtropical copepod *Temora turbinata* in the temperate Changjiang River Estuary and its possible causes. Zoological Studies, 2010, 49(4): 492-503.
- [37] 江志兵, 曾江宁, 李宏亮, 周锋, 陈全震, 朱根海, 张东声, 严小军. 长江口及其邻近陆架区夏季网采浮游植物及其影响因素. 海洋学报, 2014, 36(6): 112-123.
- [38] 马建新, 郑振虎, 李云平, 邢红艳, 刘义豪. 莱州湾浮游植物分布特征. 海洋湖沼通报, 2002(4): 63-67.
- [39] 张文静, 董志军, 孙西艳, 张晨, 刘永亮, 侯朝伟, 赵建民. 2018 年烟台四十里湾及其邻近海域网采浮游植物群落结构的时空变化. 海洋与湖沼, 2020, 51(5): 1151-1161.
- [40] 胡亚丽, 梁君, 许永久, 郑基, 王慧君, 朱文斌, 郭爱, 张洪亮, 蒋日进, 吴丽航, 徐纪晓, 杨丽萍, 姜洪俊, 李立华. 2019 年舟山近海浮游动物群落结构变化与水团的关系. 水产科学, 2022, 41(5): 788-798.
- [41] 何柄震, 王艳, 王彪, 卢士强, 雷坤, 李立群, 程全国. 2016—2021 年长江口海域营养盐时空变化特征及其影响因素研究. 环境科学研究, 2024, 37(2): 221-232.
- [42] 栾青杉, 康元德, 王俊. 黄河口邻近海域浮游植物群落及其多样性的长期变化(1960—2010). 中国水产科学, 2017, 24(5): 913-921.
- [43] 唐森铭, 蔡榕硕, 郭海峡, 王磊. 中国近海区域浮游植物生态对气候变化的响应. 应用海洋学学报, 2017, 36(4): 455-465.