

徐满秋, 江新琴, 詹琳, 盛留洋, 蒋雨露, 程方平, 曾江宁, 杨静文, 江志兵. 大小潮与采样方法对河口开阔海域浮游植物调查结果的影响: 以嵊泗列岛为例[J]. 应用与环境生物学报, 2025, 31 (6): 920-930

Xu MQ, Jiang XQ, Zhan L, Sheng LY, Jiang YL, Cheng FP, Zeng JN, Yang JW, Jiang ZB. Effects of tidal period and sampling method on phytoplankton investigation results in estuarine open waters: a case study of Shengsi Islands [J]. Chin J Appl Environ Biol, 2025, 31 (6): 920-930

大小潮与采样方法对河口开阔海域浮游植物调查结果的影响: 以嵊泗列岛为例

徐满秋^{1, 3}, 江新琴⁴, 詹琳¹, 盛留洋⁷, 蒋雨露¹, 程方平^{1, 5, 6}, 曾江宁^{1, 5, 6}, 杨静文³, 江志兵^{1, 2, 5, 6}✉

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

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

³浙江海洋大学海洋科学与技术学院, 舟山 316022;

⁴浙江海洋大学水产学院, 舟山 316022;

⁵浙江省近海海洋工程环境与生态安全重点实验室, 自然资源部第二海洋研究所, 杭州 310012;

⁶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;

⁷浙江省衢州生态环境监测中心, 衢州 324000

摘要 为认识河口开阔海域浮游植物群落的演变机制, 于2010年6月、8月大小潮期间在嵊泗列岛海域进行浮游植物垂直拖网、分层水采集, 探究潮周期变化和不同采样方法对河口开阔海域浮游植物调查结果的影响。共鉴定浮游植物7门94属323种, 其中硅藻57属213种, 甲藻19属79种, 绿藻5属11种, 蓝藻6属10种, 金藻3属5种, 黄藻1属2种, 裸藻1属2种。水采、网采物种数分别为284、199种。6月优势种仅有骨条藻 (*Skeletonema* spp.), 除骨条藻外8月网采样品中优势种为角毛藻 (*Chaetoceros* spp.)、尖刺伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*)、旋链海链藻 (*Thalassiosira curviseriata*) 等长链状、个体较大的类群, 水采样品中还出现了体型较小的锥状斯克里普藻 (*Scrippsiella trochoidea*) 和运动异双鞭藻 (*Eutreptiella gymnastica*)。同期水采样品中浮游植物丰度、物种数、多样性指数、均匀度指数均高于同期网采样品。相似性分析结果显示不同潮周期与采样方法下浮游植物群落组成均差异显著 ($P < 0.01$)。冗余分析结果显示浮游植物群落组成与盐度、营养盐、透明度密切相关。小潮期间水体较稳定、透明度较高有利于浮游植物生长, 增强了藻华暴发的可能性。结合历史数据发现1990-2010年夏季嵊泗列岛海域溶解无机氮和氮磷比升高, 富营养化加剧, 浮游植物群落结构受到影响。本研究表明在河口开阔海域, 不同潮周期和采样方法采集的浮游植物丰度与群落组成均具有显著差异。(图3 表6 参35)

关键词 嵊泗列岛; 浮游植物; 大小潮; 采样策略; 河口

Effects of tidal period and sampling method on phytoplankton investigation results in estuarine open waters: a case study of Shengsi Islands

XU Manqiu^{1, 3}, JIANG Xinqin⁴, ZHAN Lin¹, SHENG Liuyang⁷, JIANG Yulu¹, CHENG Fangping^{1, 5, 6}, ZENG Jiangning^{1, 5, 6}, YANG Jingwen³ & JIANG Zhibing^{1, 2, 5, 6}✉

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

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

³Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

⁴School of Fishery, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China;

⁵Key Laboratory of Nearshore Engineering Environment and Ecological Security of Zhejiang Province, Second Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources, Hangzhou 310012, China;

⁶Marine Ecosystem Observation and Research Station on the Yangtze River Estuary, Ministry of Natural Resources, Zhoushan 316021, China;

⁷Zhejiang Quzhou Ecological Environment Monitoring Center, Quzhou 324000, China

Abstract To investigate the influence of tidal period and sampling method on phytoplankton in open estuarine waters and understand the community change mechanism, we collected net and water samples of phytoplankton from the Shengsi Islands during spring and neap tides in June and August 2010. A total of 7 phyla, 94 genera,

收稿日期 Received: 2024-04-04 接受日期 Accepted: 2025-03-04

国家重点研发计划项目(2021YFC3101702)、浙江省自然科学基金项目(LR22D060001)和长江口-浙江近海-邻近东海多学科长期观测计划(LORCE)项目(SZ2001)资助 Supported by the National Key R&D Program of China (2021YFC3101702), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LR22D060001), and Long-term Observation and Research Plan in the Changjiang Estuary and Adjacent East China Sea (LORCE) Project (SZ2001)

✉通信作者 Corresponding author (E-mail: jzb@sio.org.cn)

and 323 species were identified, comprising 213 species and 57 genera of Bacillariophyta, 79 species and 19 genera of Pyrrophyta, 11 species and 5 genera of Chlorophyta, 10 species and 6 genera of Cyanophyta, 5 species and 3 genera of Chrysophyta, 2 species and 1 genus of Xanthophyta, 2 species and 1 genus of Euglenophyta. Species richness in water-collected and net-collected samples reached 284 and 199, respectively. In June, *Skeletonema* spp. dominated. In August, in addition to *Skeletonema* spp., the dominant species in the net samples included long-chain, larger-sized groups such as *Chaetoceros* spp., *Pseudo-nitzschia pungens*, and *Thalassiosira curviseriata*. The water samples also contained smaller species such as *Scrippsiella trochoidea* and *Eutreptiella gymnastica*. During the same period, phytoplankton abundance, species richness, Shannon index, and Pielou's evenness index were all higher in the water-collected samples than in the net-collected samples. Similarity analysis revealed significant differences ($P < 0.01$) in phytoplankton community composition between different tidal phases and sampling methods. Redundancy analysis indicated that phytoplankton community composition was closely associated with temperature, nutrients, and transparency. During spring tides, reduced transparency led to lower phytoplankton abundance due to light limitations. Historical data from 1990 to 2010 further indicated that, during summer in the Shengsi Islands, increasing levels of dissolved inorganic nitrogen and a rising N/P ratio contributed to intensified eutrophication and shifts in phytoplankton community structure. In conclusion, this study demonstrated that, in estuarine open waters, phytoplankton abundance and community composition showed significant variations under different tidal periods and sampling methods.

Keywords Shengsi Islands; phytoplankton; spring and neap tides; sampling strategy; estuary

浮游植物是近海生态系统中最重要初级生产者,在生态系统物质循环和能量流动中起重要作用^[1],由于对环境变化敏感,其细胞丰度、群落结构等可指示生态系统现状与演变^[2].河口为淡水和海水相互作用强烈的区域,同时受到陆地径流和海洋潮汐的影响^[3],在空间和时间尺度上有着盐度、浊度等环境梯度.其中潮汐是河口系统中盐混合和沉积物再悬浮的重要驱动力^[4],通过改变水动力条件、透明度和营养盐等环境要素影响浮游植物群落结构^[5-7].

嵎泗列岛海域位于浙江省舟山群岛最北侧,地处杭州湾以东、长江口东南,是舟山渔场的重要组成部分,也是沪、杭、宁等沿海开放城市群与南北海运大通道枢纽点,拥有丰富的自然资源和优异的区位优势.潮汐是海水在月球和太阳引力作用下的周期性涨落现象,大潮时太阳和月球的引潮力叠加,此时涨潮最高、落潮最低、潮差最大,小潮则太阳和月球的引潮力部分抵消,导致潮差最小、涨潮较低、落潮较高^[8].嵎泗列岛海域潮汐性质为正规半日潮,大潮时可达4.0-5.0 m,小潮时约为1.5-3.0 m,最大可能潮差为5.5 m,由于地形的集流作用潮流流速较快,最大涨潮流速1.8-2.0 m/s,最大落潮流速1.8-2.2 m/s,表层最大流速可达2.0-2.5 m/s,且自表层至底层流速递减,往复流性质明显,属强潮海区^[9-10].嵎泗列岛海域是典型的河口开阔海域^[6],相较于河流输入强烈的河口近岸,目前对潮周期变化如何影响河口开阔海域浮游植物群落的研究较少,嵎泗列岛海域复杂的水文条件可能使大、小潮转换对浮游植物丰度与群落组成造成较大影响.

嵎泗列岛海域的大面调查主要集中于20世纪90年代与21世纪初,在以往浮游植物群落结构研究中多采用77 μm 孔径的浮游生物网采集样品^[11-13],这种方法可能会丢失粒级较小的非群体生活种类,尤其是营

单个细胞生活的小型硅藻、甲藻、隐藻等,造成物种信息缺失和丰度低估.水采方法是采用一定体积的采水瓶从不同深度采集浮游植物样品,可在一定程度上弥补上述缺失,但水采法仅能获取特定水层的浮游植物,而无法采集整个水柱的浮游植物,造成一些稀有的、个体较大的物种的漏采.因此这两种采样方法得到的结果可能有较大差异,将两种采样方法相结合,可获取更完整的浮游植物物种信息^[14-15].

为探究潮周期变化和采样方法对河口开阔海域浮游植物群落的影响,我们以嵎泗列岛海域为研究区域,于2010年6、8月大小潮共计4个航次,分别采用网采、水采方式进行浮游植物群落结构调查.采用相似性分析(analyses of similarities, ANOSIM)判断大小潮时不同采样方法得到的浮游植物样品中群落组成差异;运用冗余分析(redundancy analysis, RDA)甄别群落组成的主要影响因子;在此基础上对比历史数据,揭示该海域浮游植物群落的变化规律.研究旨在为河口开阔海域浮游植物采样策略提供参考,并深入认识嵎泗列岛海域浮游植物群落的演变机制.

1 材料与方法

1.1 调查海域与站位设置

在嵎泗列岛(122.1°-122.7°N, 30.5°-30.9°E)海域共布设21个采样站位(图1),于2010年6月5-6日(小潮)、6月11-12日(大潮)、8月5-6日(小潮)和8月11-12日(大潮)进行了共4个航次的浮游植物垂直拖网、分层水样采集,表、底层分别为0.5 m与离底0.5 m.

1.2 样品采集与分析

参照《海洋调查规范 第6部分》^[16],采用浅水III型(网目孔径77 μm)浮游生物网自底至表进行垂



图1 嵊泗列岛海域采样站位。

Fig. 1 Sampling stations around the Shengsi Islands.

直拖网采集浮游植物样品,并用Hydro-bios流量计(HYDRO-BIOS公司,德国)记录滤水量,所采集样品用中性甲醛(终浓度4%)固定和保存。经浓缩制片后用Leica DM2500显微镜进行观察、鉴定和计数。通过温盐深(CTD)传感器(HACH Sea-bird公司,美国)测定盐度、温度和水深。用5 L采水器采集表(0.5 m)、底层(离底0.5 m)海水,用于浮游植物水样、溶解无机氮(dissolved inorganic nitrogen, DIN)、活性磷酸盐(dissolved inorganic phosphorus, DIP)、硅酸盐(dissolved silicate, DSi)和悬浮物浓度等测定。取表层水样100 mL带回实验室后用25 mm的Whatman GF/F滤膜过滤,并将滤膜保存在5 mL体积比为90%的丙酮中,避光冷藏保存24 h后通过Turner Trilogy荧光仪测定叶绿素a(chlorophyll a, Chla)。用JC-SSP赛氏盘测定透明度。

1.3 数据分析及处理

浮游植物群落物种数、Shannon-Wiener多样性指数(H')和Pielou均匀度指数(J')的计算使用PRIMER 6.0版。优势度(Y)计算公式为 $Y = n_i \times f_i / N \times 100\%$,式中: N 为样品的总丰度; n_i 为样品中第*i*种的丰度; f_i 为该种浮游植物在样品中的出现频率。当 $Y \geq 2\%$ 则认定为优势种。

由于相关数据不符合正态分布和方差齐次性检验,采用SPSS 20.0软件进行Kruskal-Wallis检验确定大小潮和不同采样方法的浮游植物多样性的差异。采用PRIMER 6.0软件对不同潮周期、采样方法的浮游植物群落组成差异进行ANOSIM分析。采用CANOCO 5.0软件进行RDA分析,以确定环境因子对浮游植物群落组成的影响。水采浮游植物进行Kruskal-Wallis检验、ANOSIM和RDA分析时采用表、底层数据的平均值。文中涉及地图基于自然资源部标准地图服务网站审图号为GS(2019)3333号的标准地

图制作,底图无修改。

2 结果

2.1 理化因子

调查海域水深范围为6-78 m,平均水深约18 m。表1展示了不同月份、潮周期时表层理化因子状况。6月环境因子中仅小潮期间DIP浓度显著高于大潮期间,8月大潮期间盐度、悬浮物浓度、DIP浓度均显著高于大潮期间。8月大、小潮平均水温显著($P < 0.05$)高于6月,最高水温出现在8月小潮的S01(28.50 °C),最低值出现在6月小潮的S08(19.10 °C)。大潮期间平均盐度均高于小潮,其中8月差异显著($P < 0.05$)。大潮期间透明度均低于小潮,其中8月差异显著($P < 0.05$)。4个时期平均DIN浓度无显著差异,N/P趋势与DIP相反。6、8月N/P范围为22.4-332.3,高于Redfield比值(16),呈现潜在磷限制状态。8月小潮期间Chla出现最高值并显著($P < 0.05$)高于其他时期。

2.2 种类组成与优势种

6月、8月大小潮期间共鉴定浮游植物7门94属323种(含变种和变型及未定种),其中硅藻57属213种(占66.0%),甲藻19属79种(占24.5%),绿藻5属11种(占3.4%),蓝藻6属10种(占3.1%),金藻3属5种(占1.6%),黄藻1属2种(占0.6%),裸藻1属2种(占0.6%)及未定类的三裂醉藻(*Ebria tripartita*)。

水采、网采物种分别有284、199种(含变种和变型及未定种)。水样中硅藻51属189种(占66.6%),甲藻18属70种(占24.7%),绿藻3属8种(占2.8%),蓝藻5属9种(占3.2%),金藻3属4种(占1.4%),黄藻1属1种(占0.4%),裸藻1属2种(占0.7%)及未定类的三裂醉藻(*Ebria tripartita*)。网样中硅藻40属130种(占65.3%),甲藻15属51种(占25.6%),绿藻2属4种(占2.0%),蓝藻3属6种(占3.0%),金藻3属3种(占1.5%),黄藻1属2种(占1.0%),裸藻1属2种(占1.0%)及未定类的三裂醉藻(*Ebria tripartita*)。

如表2所示,本次调查共采到9种优势种,其中骨条藻为全部组共有,且6月优势种仅有骨条藻(*Skeletonema* spp.),优势度范围为93.5%-97.8%,8月骨条藻优势度下降,范围为4.9%-64.8%,同时出现了角毛藻(*Chaetoceros* spp.)、尖刺伪菱形藻(*Pseudo-nitzschia pungens*)、旋链海链藻(*Thalassiosira curviseriata*)等硅藻和甲藻锥状斯克累藻(*Scrippsiella trochoidea*)、裸藻运动异双鞭藻(*Eutreptiella gymnastica*)。

2.3 细胞丰度

6、8月嵊泗列岛海域浮游植物水采丰度均高于同期网采丰度(表1),其中6月差异显著,8月差异不显著。6月网样、水样中大潮丰度均高于小潮,其中网样差异显著。两种采样方式获得的浮游植物平均丰度均在8

表1 6、8月嵎泗列岛海域表层环境理化因子（平均值±标准差）和网采、水采浮游植物丰度

Table 4 Environmental factors (mean ± S.D.) of surface water around Shengsi Islands in June and August, and abundance of net- and water-collected phytoplankton

环境参数 Environmental parameter	6月大潮 Spring tide in June	6月小潮 Neap tide in June	8月大潮 Spring tide in August	8月小潮 Neap tide in August
水温 Temperature (θ/°C)	20.84 ± 1.22 ^b (19.70 - 24.10)	20.14 ± 0.85 ^b (19.10 - 21.80)	25.86 ± 0.99 ^a (24.50 - 28.40)	27.74 ± 0.93 ^a (25.30 - 28.50)
盐度 Salinity	20.94 ± 6.80 ^{ab} (5.50 - 25.20)	19.97 ± 6.29 ^{ab} (8.50 - 23.50)	21.80 ± 3.05 ^a (15.20 - 22.40)	17.19 ± 5.23 ^b (8.80 - 21.30)
透明度 Transparency (δ/m)	1.30 ± 0.41 ^a (0.50 - 2.30)	1.60 ± 1.07 ^a (0.30 - 4.40)	0.41 ± 0.17 ^b (0.20 - 0.70)	0.81 ± 0.37 ^a (0.40 - 1.80)
悬浮物浓度 Suspended solids (ρ/mg L ⁻¹)	17.63 ± 6.92 ^b (9.00 - 36.60)	12.22 ± 5.71 ^b (1.40 - 75.60)	46.23 ± 36.24 ^a (15.80 - 167.80)	12.09 ± 6.94 ^b (2.80 - 36.20)
DSi (ρ/mg L ⁻¹)	/	/	1.90 ± 0.27 (1.38 - 2.39)	2.13 ± 0.86 (0.99 - 3.24)
DIN (ρ/mg L ⁻¹)	0.98 ± 0.45 ^a (0.44 - 2.23)	1.00 ± 0.43 ^a (0.37 - 1.80)	0.95 ± 0.25 ^a (0.63 - 1.66)	0.93 ± 0.37 ^a (0.45 - 1.60)
DIP (ρ/mg L ⁻¹)	0.017 ± 0.009 ^b (0.01 - 0.05)	0.027 ± 0.010 ^a (0.009 - 0.042)	0.029 ± 0.005 ^a (0.016 - 0.038)	0.007 ± 0.005 ^c (0.002 - 0.017)
N/P	59.60 ± 13.85 ^b (41.65 - 97.07)	37.53 ± 10.60 ^c (22.42 - 66.79)	33.02 ± 8.10 ^c (23.22 - 53.68)	170.15 ± 80.99 ^a (56.32 - 332.29)
Chla (ρ/μg L ⁻¹)	4.23 ± 3.88 ^b (0.65 - 13.75)	4.97 ± 3.51 ^b (0.67 - 13.70)	8.92 ± 8.91 ^b (2.37 - 32.41)	35.48 ± 13.13 ^a (19.66 - 65.07)
网采丰度 Net-collected abundance (n/cells mL ⁻¹)	44.01 ± 48.17 ^b (1.23 - 135.86)	7.23 ± 22.27 ^c (0.13 - 103.81)	60.15 ± 74.89 ^b (6.26 - 304.44)	788.62 ± 1105.48 ^a (23.91 - 4 254.09)
水采丰度 Water-collected abundance (n/cells mL ⁻¹)	349.51 ± 349.97 ^b (15.40 - 942.25)	304.32 ± 405.03 ^b (12.63 - 1 401.87)	221.07 ± 427.74 ^b (30.47 - 1 099.49)	1 163.05 ± 863.72 ^a (216.31 - 2 768.15)

DSi: 活性硅酸盐; DIN: 溶解无机氮; DIP: 活性磷酸盐; Chla: 叶绿素a. 同行不同上标小写字母表示季节差异显著 ($P < 0.05$). /: 未测定.

DSi: Dissolved silicate; DIN: Dissolved inorganic nitrogen; DIP: Dissolved inorganic phosphorus; Chla: Chlorophyll a. Different superscript lowercase letters in the same line indicate significant seasonal differences ($P < 0.05$). /: Not measured.

表2 6、8月大小潮期间网采、水采浮游植物优势种的平均丰度和优势度

Table 2 Average abundance and dominance of dominant phytoplankton species (net- and water-collected) in spring and neap tides during June and August

月份 Month	潮周期 Tidal cycle	采样方法 Method	物种 Species	丰度 Abundance (n/cells mL ⁻¹)	优势度 Dominance (P/%)
6	大潮 Spring tide	网采 Net collection	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	43.05	97.8
	小潮 Neap tide	网采 Net collection	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	6.85	94.8
	大潮 Spring tide	水采 Water collection	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	321.17	95.6
	小潮 Neap tide	水采 Water collection	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	247.11	93.5
8	大潮 Spring tide	网采 Net collection	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	25.62	42.6
			洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>	10.87	12.7
			窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>	10.22	12.0
			尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	5.86	6.9
			深环沟角毛藻 <i>Chaetoceros constrictus</i>	2.74	3.2
	小潮 Neap tide	网采 Net collection	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	510.88	64.8
			旋链海链藻 <i>Thalassiosira curviseriata</i>	266.90	33.8
	大潮 Spring tide	水采 Water collection	锥状斯克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	155.27	75.6
			骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	10.03	4.9
			小细柱藻 <i>Leptocylindrus minimus</i>	5.43	2.3
			尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	4.46	2.2
			运动异双鞭藻 <i>Eutreptiella gymnastica</i>	4.28	2.1
			骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	494.34	47.0
			旋链海链藻 <i>Thalassiosira curviseriata</i>	376.05	35.7
			锥状斯克里普藻 <i>Scrippsiella trochoidea</i>	33.46	3.2
			小细柱藻 <i>Leptocylindrus minimus</i>	26.27	2.5

月小潮时达到最高,并显著高于其余3个时期.嵎泗列岛海域浮游植物细胞丰度平面分布如图2所示.与小潮时相比,大潮时高值区多出现在采样区东部.6、8月大、小潮水采浮游植物丰度均显著 ($P < 0.01$) 高于同时期网采丰度.

2.4 多样性和均匀度

如表3所示,在6、8月浮游植物物种数最高值均出现在大潮水样中,6月水采物种数均显著 ($P < 0.01$) 高

于同潮周期网采物种数,8月大潮物种数均显著高于相同采样方法获得的小潮物种数.8月水采 H' 、 J' 均显著 ($P < 0.01$) 高于同期网采 H' 、 J' ,大潮 H' 、 J' 均显著 ($P < 0.01$) 高于相同采样方法获得的小潮 H' 、 J' .

2.5 群落组成差异

ANOSIM结果表明,调查区域网采与水采、大潮与小潮之间的浮游植物群落组成均有极显著 ($P < 0.01$) 差异(表4). R 值表明6、8月,采样方法对浮游植

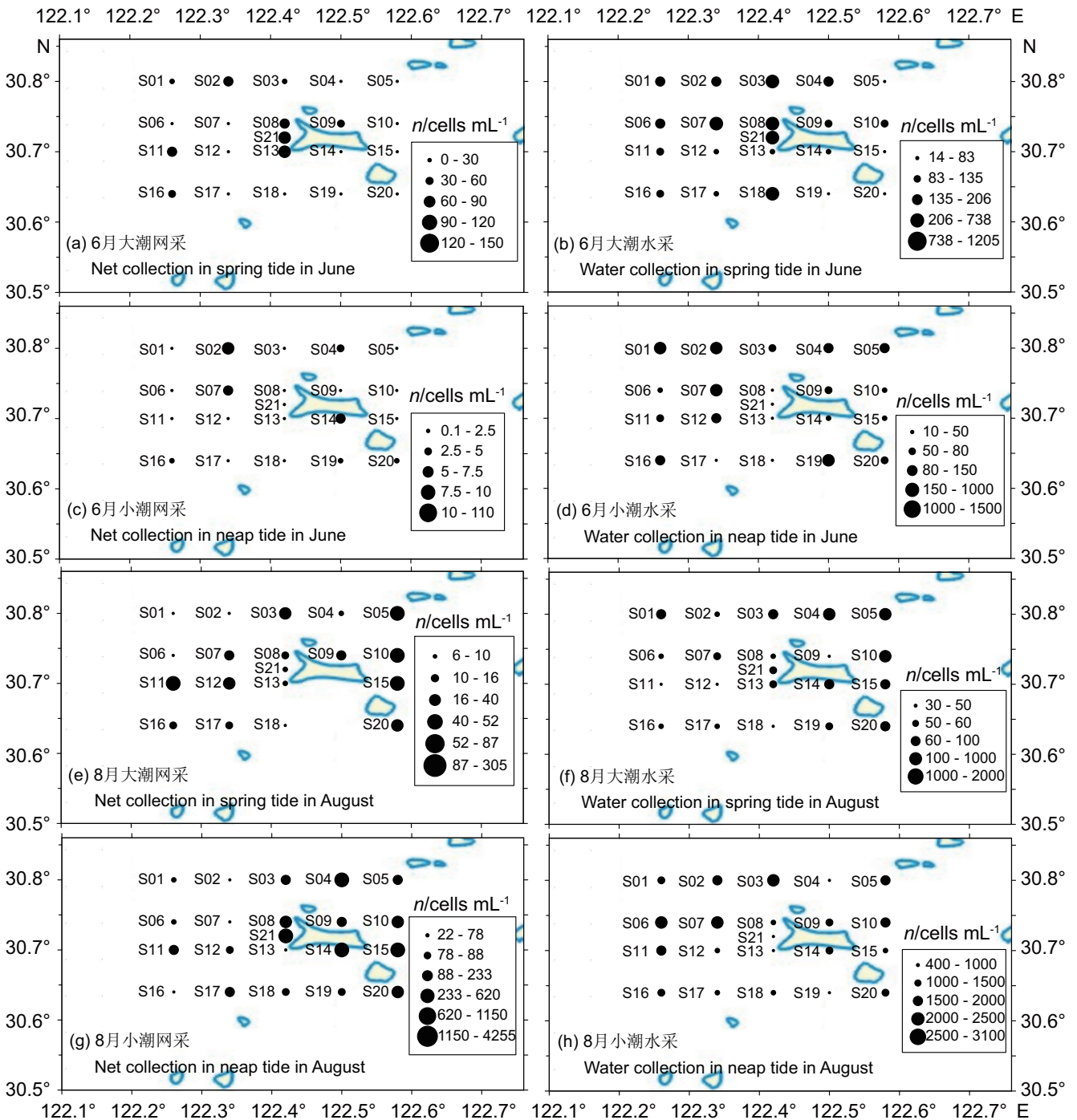


图2 6、8月大小潮期间的网采、水采浮游植物丰度分布.

Fig. 2 Horizontal distribution of net- and water-collected phytoplankton abundance in spring and neap tides during June and August.

物群落组成影响均大于潮周期。

2.6 浮游植物群落结构与环境因子的关系

为降低偶见种权重，对优势度大于0.01的浮游植物种类进行除趋势对应分析（detrended correspondence analysis, DCA），分析结果表明各轴梯度最大值均小于3，故采用RDA进行物种-环境分析。蒙特卡罗检验表明，4个航次RDA结果中第1轴和全部轴均呈极显著差异（ $P < 0.01$ ），说明RDA排序结果可信。6月大潮水样第1轴和第2轴的特征值分别为0.49和0.06，分别解释了48.9%和54.7%的变量；6月小潮水样第1轴和第2轴的特征值分别为0.42和0.23，分别解释了41.8%和64.8%的变量；8月大潮水样第1轴和第

2轴的特征值分别为0.41和0.12，分别解释了40.6%和52.2%的变量；8月小潮水样第1轴和第2轴的特征值分别为0.44和0.10，分别解释了43.9%和53.5%的变量。图3表明，盐度和营养盐是影响嵎泗列岛浮游植物群落组成与分布的主要环境因子。此外，在大潮期间，透明度与悬浮物的影响也较大。其中，颤藻（*Oscillatoria* spp.）、骨条藻和运动异双鞭藻（*Eutreptiella gymnastica*）等淡水种或低盐种与盐度呈明显负相关；伪菱形藻和锥状斯克里普藻等与盐度呈明显正相关；骨条藻与DIN呈明显正相关；具槽帕拉藻（*Paralia sulcata*）等底栖种与悬浮物浓度呈明显正相关。

表3 6、8月大小潮期间浮游植物的群落参数（平均值±标准差）
Table 3 Community parameters (mean ± S.D.) of phytoplankton in spring and neap tides during June and August

月份 Month	潮周期 Tidal cycle	采样方法 Method	物种数 Species number	多样性指数 H'	均匀度指数 J'
6	大潮 Spring tide	网采 Net collection	25 ± 5 ^b (16 - 38)	0.72 ± 0.80 ^b (0.03 - 2.37)	0.16 ± 0.18 ^b (0.007 - 0.53)
	小潮 Neap tide	网采 Net collection	26 ± 6 ^b (15 - 38)	1.43 ± 1.00 ^b (0.01 - 3.10)	0.31 ± 0.22 ^a (0.002 - 0.68)
	大潮 Spring tide	水采 Water collection	57 ± 7 ^a (44 - 69)	1.30 ± 1.45 ^{ab} (0.16 - 4.50)	0.22 ± 0.25 ^a (0.03 - 0.80)
	小潮 Neap tide	水采 Water collection	52 ± 10 ^a (24 - 63)	1.44 ± 1.23 ^a (0.17 - 3.73)	0.25 ± 0.19 ^a (0.03 - 0.65)
8	大潮 Spring tide	网采 Net collection	34 ± 6 ^{ab} (24 - 45)	2.11 ± 0.86 ^b (0.73 - 3.34)	0.42 ± 0.18 ^b (0.15 - 0.67)
	小潮 Neap tide	网采 Net collection	21 ± 6 ^c (9 - 32)	0.91 ± 0.30 ^c (0.37 - 1.49)	0.22 ± 0.079 ^c (0.078 - 0.40)
	大潮 Spring tide	水采 Water collection	48 ± 11 ^a (30 - 69)	3.10 ± 1.25 ^a (0.56 - 4.71)	0.57 ± 0.23 ^a (0.096 - 0.81)
	小潮 Neap tide	水采 Water collection	31 ± 7 ^{bc} (16 - 44)	1.97 ± 0.31 ^b (1.54 - 2.59)	0.40 ± 0.068 ^b (0.30 - 0.56)

同列不同上标字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。
Different superscript letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$).

表4 采样方法和大小潮对6、8月浮游植物群落影响的相似性分析
Table 4 Analysis of similarities (ANOSIM) for phytoplankton communities collected using different sampling methods in different tides during June and August

6月 June			8月 August		
组别 Group	R	P	组别 Group	R	P
大潮网采 vs. 大潮水采 Net collection in spring tide vs. water collection in spring tide	0.629	0.001	大潮网采 vs. 大潮水采 Net collection in spring tide vs. water collection in spring tide	0.993	0.001
小潮网采 vs. 小潮水采 Net collection in neap tide vs. water collection in neap tide	0.394	0.001	小潮网采 vs. 小潮水采 Net collection in neap tide vs. water collection in neap tide	0.985	0.001
大潮网采 vs. 小潮网采 Net collection in spring tide vs. net collection in neap tide	0.254	0.001	大潮网采 vs. 小潮网采 Net collection in spring tide vs. net collection in neap tide	0.521	0.001
大潮水采 vs. 小潮水采 Water collection in spring tide vs. water collection in neap tide	0.030	0.001	大潮水采 vs. 小潮水采 Water collection in spring tide vs. water collection in neap tide	0.851	0.001

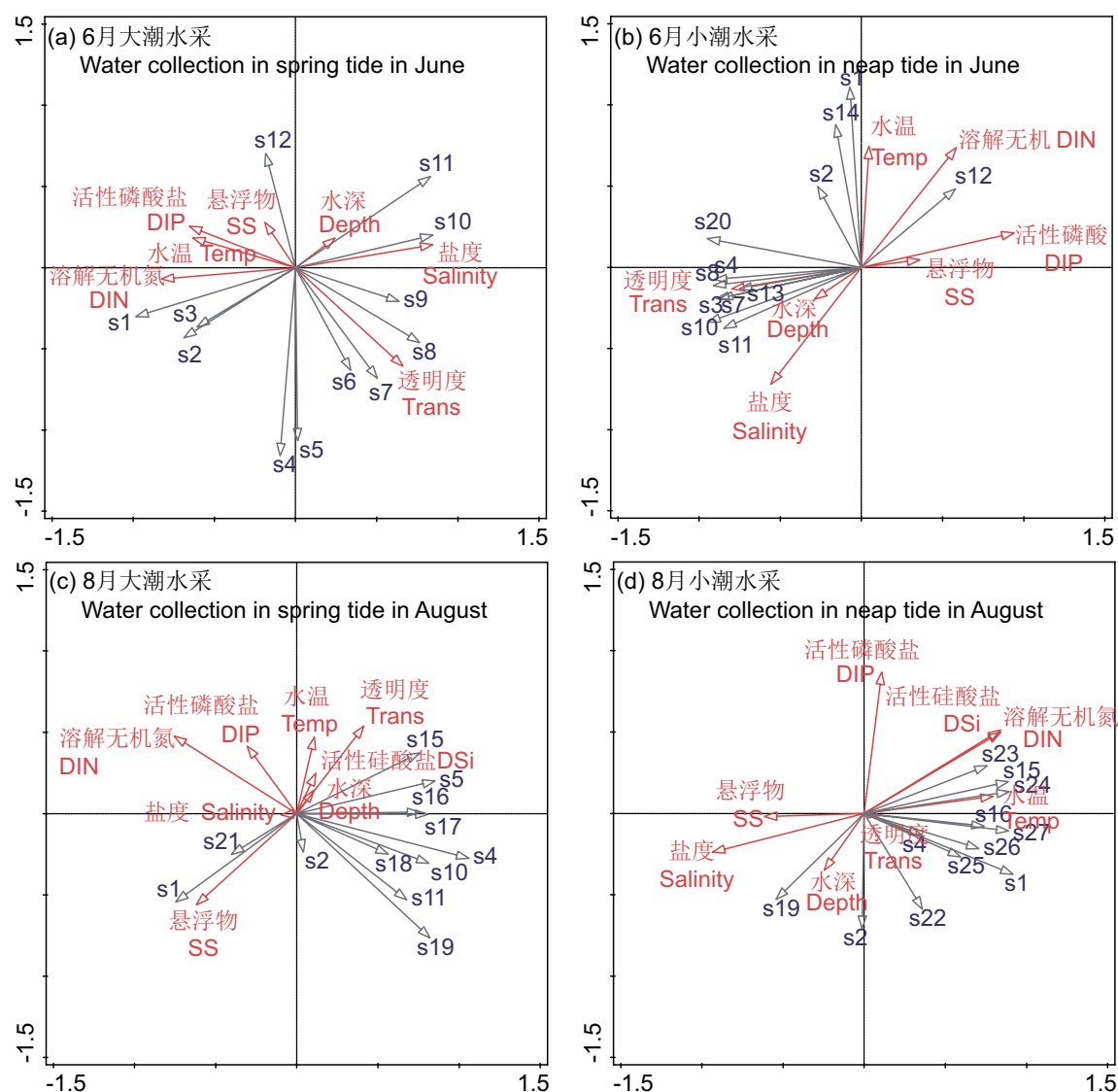


图3 主要浮游植物种类与环境因子间的冗余分析 (RDA). s1: 骨条藻; s2: 旋链海链藻; s3: 丹麦细柱藻; s4: 锥状斯克里普藻; s5: 兰氏双鞭藻; s6: 东海原甲藻; s7: 光甲原多甲藻; s8: 链状亚历山大藻; s9: 夜光藻; s10: 柔弱伪菱形藻; s11: 尖刺伪菱形藻; s12: 具槽帕拉藻; s13: 渐尖鳍藻; s14: 派格棍形藻; s15: 运动异双鞭藻; s16: 异弯藻; s17: 三棘原甲藻; s18: 盾卵形藻; s19: 小细柱藻; s20: 拟翼藻; s21: 具槽直链藻; s22: 克尼角毛藻; s23: 颤藻; s24: 铁氏束毛藻; s25: 拟旋链角毛藻; s26: 长菱形藻; s27: 纤细原甲藻.

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of main phytoplankton species associated with environmental variables. DSi: Dissolved silicate; DIN: Dissolved inorganic nitrogen; DIP: Dissolved inorganic phosphorus; SS: Suspended solids; Temp: Temperature; Trans: Transparency. s1: *Skeletonema* spp.; s2: *Thalassiosira curviseriata*; s3: *Leptocylindrus danicus*; s4: *Scrippsiella trochoidea*; s5: *Eutreptia lanowii*; s6: *Prorocentrum donghaiense*; s7: *Protoperidinium pallidum*; s8: *Alexandrium catenella*; s9: *Noctiluca scintillans*; s10: *Pseudo-nitzschia delicatissima*; s11: *Pseudo-nitzschia pungens*; s12: *Paralia sulcata*; s13: *Dinophysis acuminata*; s14: *Bacillaria paxillifera*; s15: *Eutreptiella gymnastica*; s16: *Heterosigma* spp.; s17: *Prorocentrum triestinum*; s18: *Cocconeis scutellum*; s19: *Leptocylindrus minimus*; s20: *Diplopsalopsis* spp.; s21: *Melosira sulcata*; s22: *Chaetoceros knipowitschi*; s23: *Oscillatoria* spp.; s24: *Trichodesmium thiebautii*; s25: *Chaetoceros pseudocurvisetus*; s26: *Nitzschia longissimi*; s27: *Prorocentrum gracile*.

3 讨论

3.1 夏季浮游植物月际变化

此次调查共检出嵎泗列岛海域浮游植物323种, 硅藻最多, 甲藻次之, 与以往调查结果^[17-18]一致. 受长

江径流、沿岸流、外海水等影响, 调查区域内既有淡水种 (如颤藻和单角盘星藻), 也有河口半咸水种 (如克尼角毛藻)、近岸低盐种 (如骨条藻、夜光藻)、外海高盐种 (如大角角藻和束毛藻)、广布性种类 (具槽帕拉藻). 浮游植物丰度均在8月小潮时达到最高值, 6月

丰度高值区较8月向东移动。本次调查嵊泗列岛海域N/P范围为22.4-332.3,磷是该海域浮游植物生长的限制因子,8月富含磷酸盐^[19]的台湾暖流较6月势力增强,使嵊泗列岛迎流面磷限制减轻,叠加8月更强的太阳辐射,在小潮期间共同促进浮游植物生长。

6月调查海域优势种只有骨条藻,骨条藻丰度高值站位H'、J'相对较低,表明单一优势种不利于调查区域的生物多样性。骨条藻个体较小,直径仅6-22 μm ,一般单独生活或多个细胞组成长短不同的链状细胞群体。网目孔径77 μm 的浅水III型浮游生物网采集时易漏采单独生活和短链状细胞群体,大潮时透明度更低,泥沙和藻类细胞的混合在一定程度上降低了网具过滤效率,保留了更多骨条藻细胞。优势种的月际变化与水动力和营养盐条件有关,嵊泗列岛海域营养盐丰富,硅藻在高营养环境中竞争力较强,能迅速吸收长江冲淡水富含的营养盐供自身生长繁殖^[20],在调查海域长期占据优势种地位,尤其是骨条藻^[21]。嵊泗列岛位于长江口与杭州湾的交汇区,盐度波动大,骨条藻属于低盐种,但可耐受一定范围的盐度波动^[22],在春、夏、秋季均能形成繁殖高峰,易旺发形成赤潮^[22]。8月嵊泗列岛海域上层相对高温低盐的长江冲淡水与下层相对低温高盐的台湾暖流的势力在8月均强于6月,加之更强的太阳辐射使得层化更明显^[23-24]。8月除骨条藻等硅藻外,水采优势种中还出现了具有一定运动能力的锥状斯克里普藻和运动异双鞭藻,可在层化水体中获得更多的营养盐^[25]。但在水体动荡环境中,甲藻不易生长^[26-27],甲藻优势度最高的8月大潮水采结果中高值区相较网采结果,其分布范围更偏离河口方向。

3.2 网采、水采方法对浮游植物的影响

东海浮游植物已有近60年的研究历史,最初以网采为主,但在垂直拖网过程中,细胞个体较小(< 77 μm)的物种容易丢失,特别是营单个细胞生活的甲藻和硅藻^[14, 28]。如细胞大小仅16-36 μm 的锥状斯克里普藻,本次调查水采样品中除6月小潮S12外,其余站位均观察到该藻,并在8月大潮时表现出较高的优势度(75.6%),而所有网采样品中有56%的站位未观察到该藻,同时检出该藻的网样中其丰度仅为同期水样的0.02%-4.48%,这说明营单个细胞生活、个体较小的锥状斯克里普藻在网采过程中被大量遗漏。这些物种的遗漏除影响丰度外,还造成了对物种数的低估,使得同期水样中H'、J'均高于网样(表3),从而使网采与水采方法得到的浮游植物群落组成表现出极显著差异(表4)。

尽管水样物种数均高于网样,仍有部分物种仅出现在网样中,这是由于水采方法仅在特定深度采集样品,难以代表整个水柱的浮游植物群落组成,而底及表的垂直拖网可以捕捉到整个水柱的微小型链状浮

游植物和个体较大的营单个细胞生活的浮游植物,有更大概率采集到一些丰度较低的大粒级硅藻(如圆筛藻和根管藻)、链状硅藻和甲藻(如角藻和原多甲藻)^[17],如本研究中8月网采的优势种均为长链状、个体较大的类群(表2)。但在对小个体浮游植物采样不充分的情况下,可能造成大个体类群优势度被高估。

3.3 大小潮对浮游植物的影响

嵊泗列岛海域具有明显的大小潮变化特征^[10],本研究中大、小潮期间浮游植物群落具有极显著差异($P < 0.01$)。底质再悬浮与大小潮变化密切相关,长江口和杭州湾含沙量均较高^[29-30],这使得嵊泗列岛海域透明度较低。在高浊度河口,潮汐可诱导周期性的沉积物再悬浮,影响浮游植物生长的光照条件^[7]。大潮时较强的潮汐作用下悬浮通量明显高于小潮^[31],低透明度会抑制浮游植物的生长,RDA结果也表明悬浮物和透明度是影响浮游植物群落的重要环境因子。

小潮期间相对较高的Chla浓度也证明了此时相对稳定的水体环境和较高的透明度有利于浮游植物生长,这增强了藻华暴发的可能性。本次调查中8月小潮藻华暴发后大量DIP被消耗,加上层化作用阻碍了上下层海水的混合,使表层DIP含量降低。8月大潮期间甲藻旺发,甲藻对磷的亲和能力较硅藻更高且具备吸收和存储策略^[31-32],而甲藻可在低磷环境下继续生长^[33]。8月小潮硅藻藻华消亡后,大潮水样中兼性营养型的锥状斯克里普藻成为绝对优势种,该物种除吸收有机营养盐外,还可通过摄食有机质、细菌等进行生长繁殖^[34]。

大、小潮转换同样影响浮游植物空间分布(图3)。与小潮相比,8月大潮期间浮游植物丰度高值出现区域较河口远。长江口8-9月潮差最大^[30],大潮期间河流营养盐输送距离增加,使得浮游植物丰度高值在较远的地方出现。这与浮游植物水平最大界线在小潮期间向上游移动结果^[7]一致。

3.4 浮游植物的长期变化

与历史数据比较,自1990年来在未发生赤潮情况下浮游植物丰度升高了约1个量级(表5)。本研究中该海域DIN、DIP浓度呈升高趋势,氮磷比(N/P)升高(表6),富营养化加剧;同时本研究中浮游植物优势种数量减少,尤其是6月优势种仅骨条藻1种,近20年来嵊泗列岛海域浮游植物优势种变化,骨条藻一直是夏季嵊泗列岛浮游植物的优势种,海洋原甲藻、菱形裸甲藻、尖刺伪菱形藻、夜光藻等优势度值降低,这也表明嵊泗列岛浮游植物群落结构发生变化,随骨条藻优势度值增大,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。

有研究发现长江硅酸盐入海通量及长江口硅氮比下降,圆筛藻等大个体、硅质化强的硅藻对硅酸盐需

表5 不同年份嵊泗列岛海域浮游植物优势种和丰度

Table 5 Dominant species and abundance of phytoplankton around Shengsi Islands in different years

时间 Time	优势种 Dominant species	平均丰度 Average abundance		参考文献 Reference
		网采丰度 Net-collected abundance (n/cells mL ⁻¹)	表层水采丰度 Surface water- collected abundance (n/cells mL ⁻¹)	
1990.06	三叶原甲藻、海洋原甲藻 <i>Prorocentrum triestinum</i> , <i>Prorocentrum micans</i>	0.33	10.97	[11]
1990.08	中肋骨条藻、尖刺伪菱形藻、菱形裸甲藻、夜光藻、海洋角毛藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i> , <i>Gymnodinium rhomboids</i> , <i>Noctiluca scintillans</i> , <i>Chaetoceros pelagicus</i>	139.10	894.60	[11]
1991.06.12	海洋原甲藻、菱形裸甲藻、中肋骨条藻 <i>Prorocentrum micans</i> , <i>Gymnodinium rhomboids</i> , <i>Skeletonema costatum</i>	0.19	79.80	[12]
1991.07.13	中肋骨条藻、菱形裸甲藻、三角角藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Gymnodinium rhomboids</i> , <i>Ceratium tripos</i>	2.51	2536.00	[12]
1991.07.14	中肋骨条藻、菱形裸甲藻、三角角藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Gymnodinium rhomboids</i> , <i>Ceratium tripos</i>	0.45	748.60	[12]
2000.06.23	中肋骨条藻、尖刺伪菱形藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	2200.00	/	[13]
2000.07.09	中肋骨条藻、尖刺伪菱形藻 <i>Skeletonema costatum</i> , <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	69.00	/	[13]
2000.08.19	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	8400.00	/	[13]
2010.06.05	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	7.23	264.33	本次调查 This survey
2010.06.11	骨条藻 <i>Skeletonema</i> spp.	44.01	335.78	本次调查 This survey
2010.08.05	骨条藻、旋链海链藻、锥状斯克里普藻、小细柱藻 <i>Skeletonema</i> spp., <i>Thalassiosira curviseriata</i> <i>Scrippsiella trochoidea</i> , <i>Leptocylindrus minimus</i>	788.62	1052.29	本次调查 This survey
2010.08.11	骨条藻、锥状斯克里普藻 <i>Skeletonema</i> spp., <i>Scrippsiella trochoidea</i>	60.15	205.28	本次调查 This survey

表6 不同年份嵊泗列岛赤潮发生和未发生期间的营养盐浓度和氮磷比（N/P）

Table 6 Nutrient concentrations and N/P ratio during occurrence or non-occurrence of red-tide around Shengsi Islands in different years

时间 Time	是否赤潮 Yes or No	营养盐 Nutrient			参考文献 Reference
		DIN (μg/L)	DIP (μg/L)	N/P	
1990.06	否 No	0.31	0.013	52.80	[11]
1990.08	是 Yes	0.17	0.009	41.83	[11]
1991.06.12	是 Yes	0.32	0.021	33.74	[12]
1991.07.13	是 Yes	0.40	0.014	63.27	[12]
1991.07.14	否 No	0.57	0.023	54.88	[12]
2000.06.23	否 No	0.18	< 0.005	> 79.71	[13]
2000.07.09	是 Yes	1.00	0.012	184.52	[13]
2000.08.19	否 No	0.41	< 0.005	> 181.57	[13]
2010.06.05	否 No	1.00	0.027	82.01	本次调查 This survey
2010.06.11	否 No	0.98	0.017	127.65	本次调查 This survey
2010.08.05	是 Yes	0.93	0.007	294.18	本次调查 This survey
2010.08.11	否 No	0.95	0.029	72.54	本次调查 This survey

求更高,硅氮比下降可加强小个体、硅质化弱的硅藻种类的优势度^[35]。遗憾的是此次调查6月未测定DSi,同时本次调查未能追踪完整潮周期变化过程对浮游植物群落结构的影响,后续调查中可通过增加采样频率,并采用遥感或自动监测系统等手段获得长时序的浮游植物群落结构变化数据。

4 结论

关于不同采样方法和潮周期变化对嵎泗列岛海域浮游植物群落调查结果的影响研究结果证明:(1)采样方法显著影响浮游植物群落组成信息的完整性,网采样品中优势种多为长链状、细胞个体较大的浮游植物,水采样品中补充了营单个细胞生活、个体较小的甲藻和裸藻;(2)大、小潮显著影响浮游植物群落组成,小潮期间水体较稳定、透明度较高,有利于浮游植物

生长,增强了藻华暴发的潜在风险;(3)结合历史资料发现,20年来夏季嵎泗列岛海域DIN和N/P呈升高趋势,富营养化加剧,浮游植物群落结构受到较大影响。建议在浮游植物调查中选择固定潮周期采样,典型站位同时进行垂直拖网和分层水采集,以获取更全面的浮游植物物种信息进行长时间序列比较。以上结果揭示了采样方法、潮周期和富营养化对浮游植物群落结构的重要影响,为海洋浮游植物的监测与管理提供了科学依据。潮周期的影响尚需长期验证,未来研究应增加时间跨度和采样频率,加强跨学科合作,以便更全面地评估潮周期、富营养化等因素对浮游植物群落的长期影响。

致谢 感谢刘小涯高级实验师协助采样并提供相关理化参数。

参考文献 [References]

- 1 Trombetta T, Vidussi F, Roques C, Scotti M, Mostajir B. Marine microbial food web networks during phytoplankton bloom and non-bloom periods: warming favors smaller organism interactions and intensifies trophic cascade [J]. *Front Microbiol*, 2020, **11**: 502336
- 2 Villegas I, Giner GD. Phytoplankton as a biological indicator of water quality [J]. *Water Res*, 1973, **3**: 479-487
- 3 Wang QQ, Wang XJ, Xiao K, Zhang Y, Li HL. Submarine groundwater discharge and associated nutrient fluxes in the Greater Bay Area, China revealed by radium and stable isotopes [J]. *Geosci Front*, 2021, **12** (3-4): 101223
- 4 Chang TS, Flemming BW. Sedimentation on a wave-dominated, open-coast tidal flat, south-western Korea: summer tidal flat-winter shoreface [J]. *Sedimentol*, 2006, **53** (3): 693-696
- 5 Monbet Y. Control of phytoplankton biomass in estuaries: a comparative analysis of microtidal and macrotidal estuaries [J]. *Estuar Coast*, 1992, **15** (4): 563-571
- 6 Jiang ZB, Chen JF, Zhou F, Shou L, Wang K. Controlling factors of summer phytoplankton community in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and adjacent East China Sea shelf [J]. *Cont Shelf Res*, 2015, **101**: 71-84
- 7 Wang YH, Xu MM, Feng ZX, Zhang F, Cao F, Wu H. Tidal variability of phytoplankton distribution in the highly turbid Changjiang River Estuary: mechanisms and Implications[J]. *J Geophys Res Oceans*, 2023, **128**: e2023JC020090
- 8 冯士筌, 李凤岐, 王辉. 海洋科学导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999: 208-231 [Feng SZ, Li FQ, Wang H. Introduction to Marine Science [M]. Beijing: Higher Education Press, 1999: 208-231]
- 9 倪冉. 海平面上升对舟山海域水动力影响数值模拟研究[D]. 连云港: 江苏海洋大学, 2022 [Ni R. Numerical simulation study on the impact of sea level rise on the hydrodynamics of Zhoushan sea area [D]. Lianyungang: Jiangsu Ocean University, 2022]
- 10 陈倩, 黄大吉, 章本照, 王敏芳. 浙江近海潮流和余流的特征 [J]. 东海海洋, 2003, **21** (4): 1-14 [Chen Q, Huang DJ, Zhang BZ, Wang MF. Characteristics of the tidal current and residual current in the seas adjacent to Zhejiang [J]. *Donghai Mar Sci*, 2003, **21** (4): 1-14]
- 11 欧阳怡然, 陈逸华, 于波. 嵎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, 1993 **12**(4): 257-64 [Ouyang YR, Chen YH, Yu B. Studies on phytoplankton and red tide organisms in mariculture area around Shengsi Islands, China [J]. *J Zhejiang Coll Fish*, 1993, **12** (4): 257-264]
- 12 欧阳怡然, 陈逸华, 于波. 嵎泗列岛养殖海区发生的菱形裸甲藻 *Gymnodinium rhomboides* SCHUTT 赤潮 [J]. 浙江水产学院学报, 1993 **12** (1): 14-20 [Ouyang YR, Chen YH, Yu B. Occurrence of *Gymnodinium rhomboides* (SCHUTT) red tides in Shensi Islands culture area [J]. *J Zhejiang Coll Fish*, 1993 **12** (1): 14-20]
- 13 张捷, 于波. 长江口至嵎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 [Zhang J, Yu B. The Phytoplankton and the red tide monitoring in Yangtze Estuary and Shengshi Islands [J]. *J Zhejiang Ocean Univ Nat Sci*, 2001, **20** (3): 213-216]
- 14 Jiang ZB, Liu JJ, Zhu XY, Chen QZ, Chen JF. Quantitative comparison of phytoplankton community

- sampled using net and water collection methods in the southern Yellow Sea [J]. *Reg Stud Mar Sci*, 2020, **35**: 101250
- 15 Wasmund N, Göbel J, Bodungen BV. 100-years-changes in the phytoplankton community of Kiel Bight (Baltic Sea) [J]. *J Mar Syst*, 2008, **73** (3): 300-322
 - 16 国家海洋局第三海洋研究所. GB/T 12763.6—2007 海洋调查规范第6部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 国家标准化管理委员会, 2007 [Third Institute of Oceanography, Ministry of Natural Resources. Specifications for Oceanographic Survey - Part 6: Marine Biological Survey [S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision of China; Standardization Administration of China, 2007]
 - 17 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、秋季嵎泗列岛浮游植物群落现状及长期变化[J]. *生态学报*, 2024, **44** (13): 5867-5881 [Zhan L, Jiang ZB, Du W, Sun ZH, Wang DG, Jiang YL, Du P, Li HL, Zeng JN. Current status and long-term change of phytoplankton community around the Shengsi Islands in spring and autumn from 2021 to 2022 [J]. *Acta Ecol Sin*, 2024, **44** (13): 5867-5881]
 - 18 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[J]. *海洋环境科学*, 2013, **32** (1): 67-72 [Tang F, Jiang XM, Wang T, Sun Y, Lin QJ. Dynamic of phytoplankton in typical sea areas of Zhoushan [J]. *Mar Environ Sci*, 2013, **32** (1): 67-72]
 - 19 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[J]. *应用生态学报*, 2003, **14** (7): 1031-1038 [Zhou MJ, Yan T, Zou JZ. Preliminary analysis of the characteristics of red tide areas in Changjiang River estuary and its adjacent sea [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, **14** (7): 1031-1038]
 - 20 Yoshinori T, Anggara M, Yusuke M. Evolutionarily distinct strategies for the acquisition of inorganic carbon from seawater in marine diatoms [J]. *J Exp Bot*, 2017, **68** (14): 3949-3958
 - 21 Jiang ZB, Liu JJ, Chen J, Chen QZ, Yan XJ, Zeng JN. Responses of summer phytoplankton community to drastic environmental changes in the Changjiang (Yangtze River) estuary during the past 50 years [J]. *Water Res*, 2014, **54**: 1-11
 - 22 霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 宋秀贤, 郝建华. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2001 **32** (3): 311-318 [Huo WY, Yu ZM, Zou JZ, Song XX, Hao JH. Outbreak of *Skeletonema costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay [J]. *Oceanol Limnol Sinica*, 2001 **32** (3): 311-318]
 - 23 Costanza R, Groot RD, Sutton P, Ploeg SVD, Anderson SJ, Kubiszewski I, Farber S, Turner RK. Changes in the global value of ecosystem services [J]. *Elsevier*, 2014, **26**: 152-158
 - 24 Guo SJ, Feng YY, Wang L, Dai MH, Liu ZL, Bai Y, Sun J. Seasonal variation in the phytoplankton community of a continental-shelf sea: the East China Sea [J]. *Mar Ecol Prog Ser*, 2014, **516**: 103-126
 - 25 Guo SJ, Zhu ML, Zhao ZX, Liang JH, Zhao YF, Du J, Sun XX. Spatial-temporal variation of phytoplankton community structure in Jiaozhou Bay, China [J]. *J Oceanol Limnol*, 2019, **37** (5): 1611-1624
 - 26 Shikata T, Kitatsuji S, Abe K, Onitsuka G, Matsubara T, Nakayama N, Yuasa K, Nishiyama Y, Mizuno KI, Masuda T, Nagai K. Vertical distribution of a harmful red-tide dinoflagellate, *Karenia mikimotoi*, at the decline stage of blooms [J]. *J Sea Res*, 2020, **165**: 101960
 - 27 Telesh I, Schubert H, Skarlato S. Abiotic stability promotes dinoflagellate blooms in marine coastal ecosystems [J]. *Estuar Coast Shelf Sci*, 2021, **251**: 107239
 - 28 Wu NC, Schmalz B, Fohrer N. A comparison of phytoplankton assemblages generated by two sampling protocols in a German lowland catchment [J]. *Ann Limnol-Int J Limnol*, 2011, **47** (4): 313-323
 - 29 寿玮玮. 舟山群岛附近海域水动力特征及其对物质运输的影响分析[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009 [Shou WW. Hydrodynamic characteristics and its impact on mass transport in the Zhoushan Archipelago sea area Abstract [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009]
 - 30 李东义, 陈坚, 汪亚平, 王爱军, 杨旸. 强潮河口区近底部沉积动力过程的高分辨率观测与分析[J]. *沉积学报*, 2014, **32** (2): 278-289 [Li DY, Chen J, Wang YP, Wang AJ, Yang Y. High resolution measurement and analysis of sediment dynamics in bottom boundary layer of the Macro Tidal Estuary [J]. *Acta Sedimentol Sin*, 2014, **32** (2): 278-289]
 - 31 Egge J. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations? [J]. *J Mar Syst*, 1998, **16** (3-4): 191-198
 - 32 Solovchenko A, Khozin-Goldberg I, Selyakh I, Semenova L, Ismagulova T, Lukyanov A, Mamedov I, Vinogradova E, Karpova O, Konyukhov I, Vasilieva S, Mojzes P, Dijkema C, Vecherskaya M, Zvyagin I, Nedbal L, Gorelova O. Phosphorus starvation and luxury uptake in green microalgae revisited [J]. *Algal Res-Biomass Biofuels Bioproducts*, 2019, **43**: 101651
 - 33 Chu Q, Liu Y, Shi J, Zhang C, Gong X, Yao XH, Guo XY, Gao HW. Promotion effect of Asian dust on phytoplankton growth and potential dissolved organic phosphorus utilization in the South China Sea [J]. *J Geophys Res Biogeosci*, 2018, **123** (3): 1101-1116
 - 34 Norbert K, Tanja H, Ursula G. Phosphorus gain by bacterivory promotes the mixotrophic flagellate *Dinobryon* spp. during re-oligotrophication [J]. *J Plankton Res*, 2007, **1**: 39-46
 - 35 Dai ZJ, Du JZ, Zhang XL, Su N, Li JF. Variation of riverine material loads and environmental consequences on the Changjiang (Yangtze) estuary in recent decades (1955-2008). *Environ Sci Technol*, 2011, **45** (1): 223-227