

DOI: 10.12264/JFSC2024-0064

七连屿浮游植物群落特征及其影响因子

粟丽, 徐姗楠, 李纯厚, 陈作志

中国水产科学研究院南海水产研究所, 农业农村部外海渔业可持续利用重点实验室, 中国水产科学研究院南海渔业资源与环境大数据重点实验室, 广东 广州 510300

摘要: 根据 2018—2021 年七连屿海域 4 个航次的调查资料, 对该海域浮游植物群落特征及环境状况进行了分析, 以期为该海域生态环境保护及管理提供参考。结果显示, 该海域浮游植物共鉴定出 5 门 111 属 341 种, 种类组成以硅藻(69.21%)和甲藻(23.75%)为主。浮游植物丰度范围为 $(2.34\sim 2841.16)\times 10^3$ cells/m³, 2018 年秋季平均值最高(797.47×10^3 cells/m³), 2018 年夏季(675.40×10^3 cells/m³)次之, 2020 年夏季最低(91.39×10^3 cells/m³)。浮游植物丰度主要由硅藻(48.67%)和蓝藻(47.22%)组成。调查期间浮游植物群落存在显著性差异($P<0.01$)。浮游植物多样性和均匀度指数均呈先上升再下降趋势。RDA 分析结果显示, 影响七连屿浮游植物群落的环境因子主要为透明度、水深、氨氮、DIN 和氮磷比, 不同时期主导因子存在差异。该海域浮游植物生长限制因子由氮转为磷; 多样性降低可能与该海域氮含量猛增致氮磷比失衡有关, 因此应减少含氮污水的排放, 加强该海域生态环境的保护和管理。

关键词: 浮游植物; 演替; 影响因子; 七连屿; 南海

中图分类号: S931

文献标志码: A

文章编号: 1005-8737-(2024)06-0693-11

七连屿位于中国南海宣德群岛的东北部($16^{\circ}55'N\sim 17^{\circ}00'N$, $112^{\circ}12'E\sim 112^{\circ}21'E$), 由若干个岛礁和沙洲组成。该海域终年高温, 无明显季节区分, 受热带季风气候影响, 降水多集中于夏、秋季节, 海水清澈、纯净, 透明度达 30 m, 洁白、细腻的珊瑚沙遍布各个岛洲。七连屿是目前中国最大的绿海龟(*Chelonia mydas*)自然产卵场^[1]。该岛礁及邻近海域还拥有丰富的生物资源, 尤其是珊瑚礁鱼类资源^[2], 然而, 近年来由于该海域人类活动频繁、气候环境变化, 致使该海域鱼类生物多样性降低^[3], 珊瑚礁生态系统衰退^[2,4-5]。七连屿海域虽然远离陆地, 人烟稀少, 但近年来依然显现了生态环境污染破坏的问题^[1]。

浮游植物是海洋生态系统的重要组成部分, 作为海洋生态系统的初级生产者, 其不仅可以为

海洋生命活动提供能量, 还能通过光合作用为海洋生物提供氧气, 对水中的生物和环境都起着重要的影响作用。由于浮游植物种类多, 数量大, 分布广, 对水域生态环境变化非常敏感, 其种类组成、数量变化极易受理化环境因子的影响, 是反映环境状况的优良指标, 常用于水域生态环境健康状况评价^[6-8]。因此, 对浮游植物进行调查研究, 不仅可以了解海域生物资源的生产潜力, 还可以了解该海域生态环境健康状况, 为海域生态环境保护和管理提供依据。目前, 关于七连屿浮游植物调查研究的报道相对较少, 仅 2007 年春季^[9]和 2019 年秋冬季^[10]有过相关研究。本研究通过对 2018—2021 年 4 个航次浮游植物种类组成、丰度分布、多样性指数及影响因子等进行分析, 全面掌握七连屿海域浮游植物群落特征及环境状况, 以

收稿日期: 2024-03-07; **修订日期:** 2024-04-08.

基金项目: 农业农村部财政专项“南海渔业资源调查与评估”(NFZX2021); 农业财政项目“南海近海和外海渔业资源调查”(2021—2025); 中国水产科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目(2023TD05).

作者简介: 粟丽(1985—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向为海洋渔业资源生态研究. E-mail: suli@scsfri.ac.cn

通信作者: 陈作志, 研究员, 研究方向为海洋渔业资源和资源生态研究. E-mail: zzchen2000@163.com

期为该海域的生态环境保护及管理提供基础资料。

1 材料与方法

1.1 调查时间与位置

分别于 2018 年夏季、秋季、2020 年夏季和 2021 年春季对七连屿海域浮游植物进行了 4 个航次的采样调查。采样站点共布设了 17 个, 分别散落在各岛礁和沙洲附近(图 1), 其中 2018 年夏季和 2021 年春季未对 S17 进行采样。

1.2 样品采集

浮游植物样品采集依据海洋调查规范(GB/T 12763—2007)^[11], 用浅水Ⅲ型浮游生物网垂直拖拽获得, 采集的样品用鲁哥试剂固定。样品经过≥

48 h 沉淀浓缩后用 OLYMPUS 显微镜观察鉴定和计数。浮游植物种类鉴定参考《中国海洋生物图谱集》第 1 册^[12]、《中国海域常见浮游硅藻图谱》^[13]、《中国海藻志》第 5 卷(硅藻门)第 1 册(中心纲)^[14]、《中国海洋浮游硅藻类》^[15]等图谱资料。现场测定水温(T)、盐度(S)、溶解氧(DO)、pH、水深(D)、透明度(Tr)等理化环境因子。环境因子[亚硝酸盐(NO_2^-)、硝酸盐(NO_3^-)、氨氮(NH_4^+)、磷酸盐(DIP)、硅酸盐(SiO_3^{2-})和悬浮颗粒物(SS)]均依据海洋监测规范(GB/T 17378—2007)^[16]进行测定, 其中 2020 年夏季硅酸盐未采样。溶解性无机氮(DIN)为 NO_2^- 、 NO_3^- 和 NH_4^+ 三者之和。 DIN 和 DIP 的比值用 $N:P$ 表示。

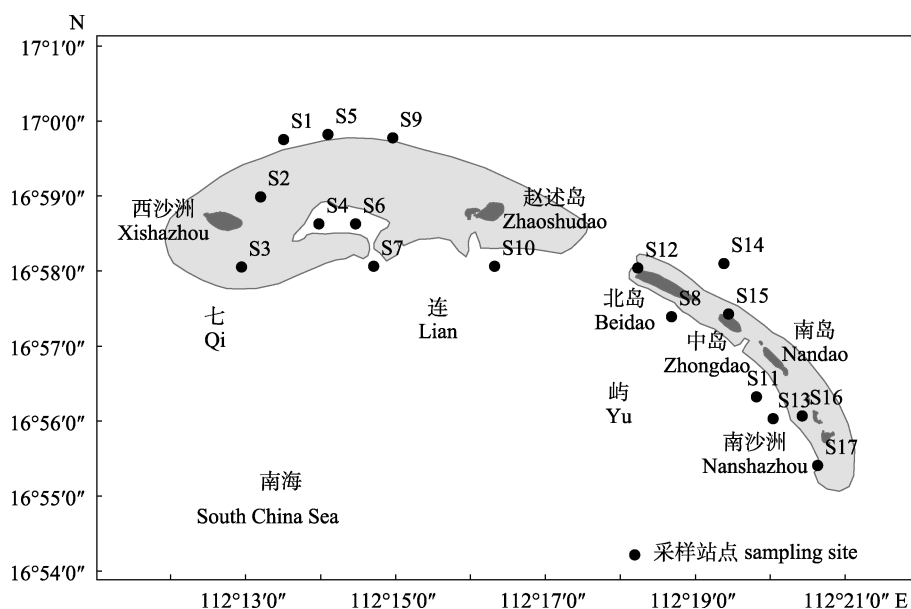


图 1 七连屿浮游植物调查站点分布

Fig. 1 Phytoplankton survey station at the Qilianyu Island

1.3 数据分析

浮游植物优势种利用优势度指数决定, 计算公式如下^[17]:

$$Y = n_i / N \times f_i$$

式中, n_i 为各站点第 i 种的总丰度; N 为各站点全部物种的总丰度; f_i 为第 i 种出现的频率, $Y \geq 0.02$ 作为优势种。

利用 Shannon-Weaver 多样性指数 (H') 和 Pielous 均匀度指数 (J') 来衡量调查海域浮游植物群落多样性状况, 计算公式如下^[18-19]:

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

$$J' = H' / \log_2 S$$

式中, P_i 为第 i 种丰度占各站点总丰度的比例; S 为各站点物种数。

七连屿浮游植物群落结构分析采用聚类分析(cluster analysis, CLUSTER)和非度量多维尺度分析(nonmetric multidimensional scaling, NMDS)进行。浮游植物群落组成年际差异采用相似性分析(analysis of similarities, ANOSIM)进行检验。浮游

植物与环境因子关系分析, 根据七连屿浮游植物组成特征构建主要类群及环境因子数据矩阵, 并对主要类群数据进行去趋势对应分析(detrended correspondence analysis, DCA), 分析结果显示排序轴的梯度长度值均<3, 故选用冗余分析(redundancy analysis, RDA)。环境因子进行 log(X+1)转换。聚类分析与 RDA 分析均通过 R4.3.0 中的 vegan 包进行, 群落相似性分析在免费作图网站(cloudtutu.com)中进行。

2 结果与分析

2.1 种类组成及优势种

2018—2021 年共鉴定出浮游植物 5 门 111 属 341 种, 其中硅藻 76 属 236 种, 占总种数的 69.21%, 甲藻 18 属 81 种, 占 23.75%, 蓝藻 13 属 20 种, 占 5.87%, 黄藻和金藻均为 2 属 2 种, 分别占 0.59%。4 次调查均出现的种类有海洋角管藻(*Cerataulina*

pelagica)、新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)、距端根管藻(*Rhizosolenia calcaravis*)、翼根管藻(*Rhizosolenia alata*)、翼根管藻纤细变型(*Rhizosolenia alata* f. *gracillima*)、钝根管藻半刺变型(*Rhizosolenia hebetata* f. *semispina*)、笔尖形根管藻(*Rhizosolenia styliiformis*)、佛氏海毛藻(*Thalassiothrix frauenfeldii*)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschiodes*)、长海毛藻(*Thalassiothrix longissima*)、微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)、红海束毛藻(*Trichodesmium erythraeum*)和汉氏束毛藻(*Trichodesmium hildebrandtii*)13 种, 仅占 3.81%。2018—2021 年七连屿海域浮游植物优势种组成更替明显(表 1)。4 次调查优势种共出现了 15 种, 分别隶属于硅藻门和蓝藻门, 除红海束毛藻和铁氏束毛藻(*Trichodesmium thiebautii*)出现频次和优势度均较高外, 其他种类出现频次低(仅 1 次)且优势度相对较低。

表 1 2018—2021 年七连屿浮游植物优势种组成
Tab. 1 Dominant species of phytoplankton in the Qilianyu Island from 2018 to 2021

优势种 dominant species	优势度 Y			
	2018 夏季 summer	2018 秋季 autumn	2020 夏季 summer	2021 春季 spring
日本星杆藻 <i>Asterionella japonica</i>	0.06			
海洋角毛藻 <i>Chaetoceros pelagicus</i>		0.05		
嘴状角毛藻 <i>Chaetoceros rostratus</i>		0.04		
北方角毛藻 <i>Chaetoceros borealis</i>		0.02		
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i>				0.02
菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschiodes</i>			0.10	
串珠梯楔藻 <i>Climacospheia moniligera</i>			0.11	
远距角毛藻 <i>Chaetoceros distans</i>				0.06
洛氏角毛藻 <i>Chaetoceros lorenzianus</i>				0.02
角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.				0.27
钝根管藻半刺变型 <i>Rhizosolenia hebetata</i> f. <i>semispina</i>				0.05
红海束毛藻 <i>Trichodesmium erythraeum</i>	0.24	0.02	0.05	0.25
铁氏束毛藻 <i>Trichodesmium thiebautii</i>	0.07		0.42	0.08
美丽颤藻 <i>Oscillatoria formasa</i>		0.05		
脆席藻 <i>Phormidium fragile</i>		0.04		

2.2 丰度分布

七连屿海域浮游植物丰度分布存在差异, 2018 年夏季丰度范围为(75.42~2841.16)×10³ cells/m³, 均值为 675.40×10³ cells/m³, 其中 S3 最高, S4 次之, S14 最低; 2018 年秋季丰度范围为(65.20~2826.67)×10³ cells/m³, 均值为 797.47×10³ cells/m³,

其中 S2 最高, S17 次之, S12 最低; 2020 年夏季丰度范围为(2.40~451.93)×10³ cells/m³, 均值为 91.39×10³ cells/m³, S2 最高, S4 次之, S10 最低; 2021 年春季丰度范围为(2.34~2064.30)×10³ cells/m³, 均值为 474.14×10³ cells/m³, S10 最高, 其次为 S14, S2 最低。2018 年夏季和秋季浮游植物丰度

水平分布较均匀,没有明显的高值区,而 2020 年夏季高值区主要集中在西沙洲,2021 年春季则主要集中在北岛至南沙洲附近(图 2)。浮游植物丰度 2018 年秋季最高,2018 年夏季次之,2020 夏季最低。

七连屿海域浮游植物丰度主要由硅藻、蓝藻和甲藻组成,三者占比合计达 99.83%以上。2018—2021 年硅藻丰度范围为 $(1.14 \sim 1905.90) \times 10^3 \text{ cells/m}^3$, 均值分别为 $157.96 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 、 $540.51 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 、 $36.42 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 和 $257.03 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 。蓝藻丰度范围为 $(0 \sim 257.03) \times 10^3 \text{ cells/m}^3$, 均值分别为 $499.57 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 、 $254.78 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 、 $52.24 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 和 $213.14 \times 10^3 \text{ cells/m}^3$ 。2018—2021 年硅藻占比范围为 24.19%~66.52%, 蓝藻为 31.18%~72.97%, 甲藻为 0.36%~10.34%, 硅藻和甲藻占比均呈先上升再下降的变化趋势, 蓝藻则与其相反(图 3)。

2.3 聚类分析

聚类分析(图 4)和 NMDS 分析(图 5a)结果均显示 4 个时期浮游植物大概可以划分为 4 个群落,除群落 II 全部由 2018 年秋季站点组成外,其他 3 个群落基本由二至三个时期的站点组成。ANOSIM 分析显示 4 个时期浮游植物群落结构存在显著性差异($R=0.661$, $P=0.001$)(图 5b)。

2.4 多样性评价

七连屿浮游植物多样性指数范围 2018 年夏季、秋季、2020 年夏季和 2021 年春季分别为 1.07~3.94、3.12~4.91、0.91~3.79 和 1.44~3.21, 均值分别为 2.38、4.19、2.76 和 2.15。均匀度指数波动范围 2018 年夏季、秋季、2020 年夏季和 2021 年春季分别为 0.20~0.71、0.69~0.87、0.22~0.90 和 0.31~0.84, 均值分别为 0.47、0.78、0.71 和 0.48。多样性指数和均匀度指数均呈现先上升再下降的变化趋势(图 6)。

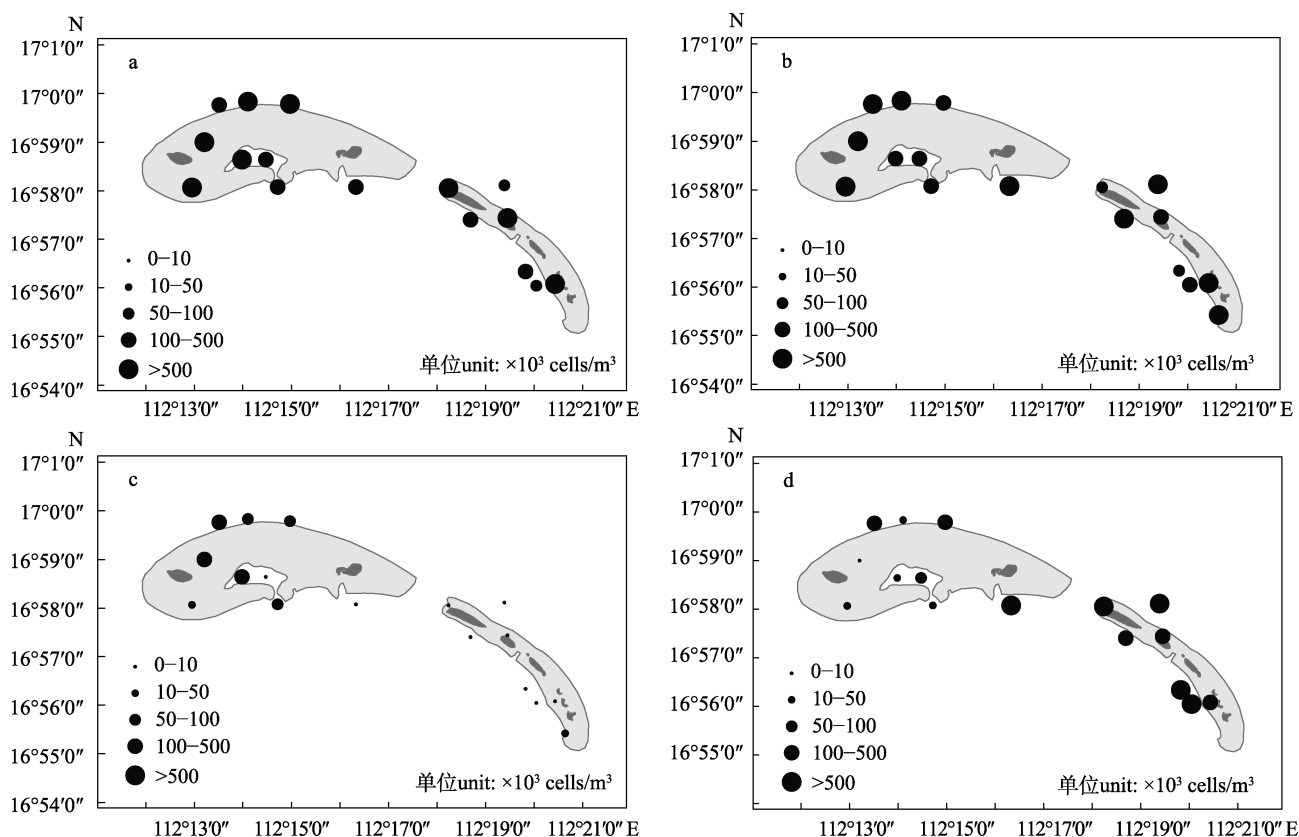


图 2 2018 年夏季(a)、秋季(b)、2020 年夏季(c)和 2021 年春季(d)七连屿浮游植物丰度分布

Fig. 2 Phytoplankton abundance distribution in the Qiliangyu Island in spring (a) and autumn (b) of 2018, summer (c) of 2020 and spring (d) of 2021

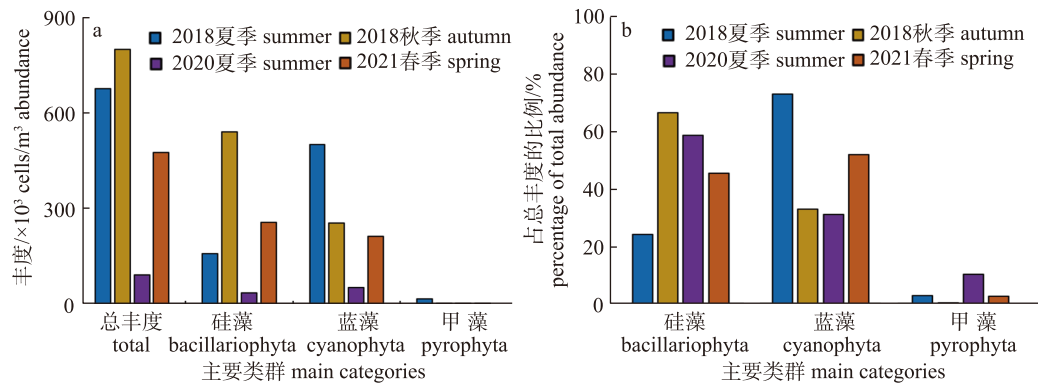


图 3 2018–2021 年七连屿浮游植物主要类群丰度均值(a)和占比(b)变化
Fig. 3 Abundance (a) and proportion (b) of major phytoplankton groups in the Qilanyu Island from 2018 to 2021

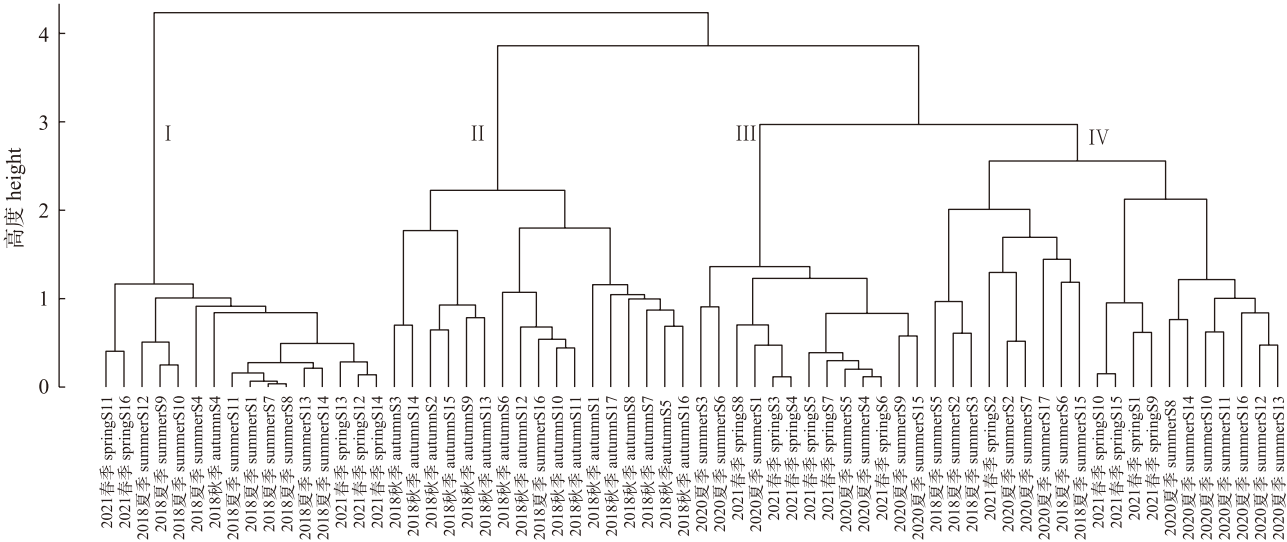


图 4 2018–2021 年七连屿浮游植物群落聚类分析
Fig. 4 Cluster analysis of phytoplankton communities in the Qilanyu Island from 2018 to 2021

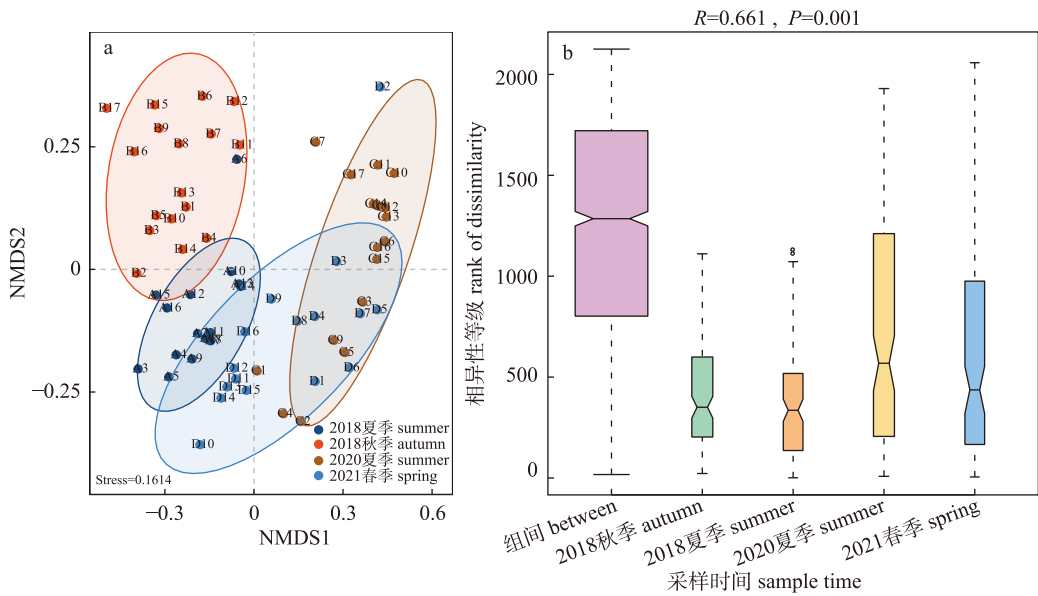


图 5 2018–2021 年七连屿浮游植物群落 NMDS 排序(a)和 ANOSIM 分析(b)
Fig. 5 NMDS (a) and ANOSIM analysis (b) of phytoplankton community in the Qilanyu Island from 2018 to 2021

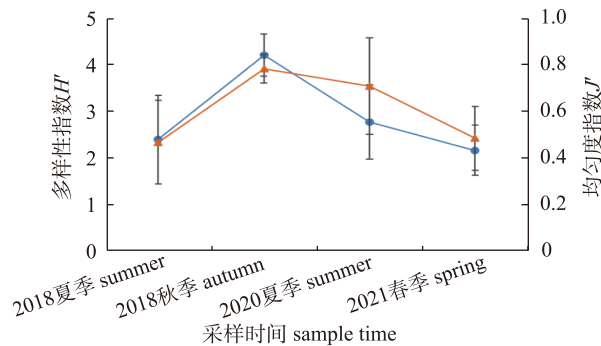


图 6 2018—2021 年七连屿海域浮游植物群落多样性指数(H')和均匀度(J')

Fig. 6 Shannon-Weaver diversity index (H') and Pielous evenness index (J') of phytoplankton community in the Qilianyu Island from 2018 to 2021

2.5 与环境因子关系

七连屿海域调查站点水深范围为 0.7~64 m, 水体透明度范围为 0.7~30 m。表层海水温度、盐度、pH、悬浮物、 NH_4^+ 、DIN、DIP 和 N : P 均为 2020 年夏季最高, DO 含量 2018 年秋季最高, SiO_3^{2-} 和 NO_3^- 含量 2018 年夏季最高, NO_2^- 含量 2021 年春季最高(表 2)。RDA 分析结果显示(图 7), 2018 年夏季影响浮游植物群落的重要环境因子依次为水深($P=0.013$)、透明度($P=0.037$)、pH ($P=0.153$)、

氨氮($P=0.182$)和水温($P=0.227$); 2018 年秋季为透明度($P=0.015$)、水深($P=0.036$)、氨氮($P=0.115$)、DIN ($P=0.142$)和 N : P ($P=0.234$); 2020 年夏季为硝酸盐($P=0.073$)、N : P ($P=0.150$)、透明度($P=0.192$)、DIN ($P=0.234$)和氨氮($P=0.256$); 2021 年春季为盐度($P=0.144$)、水深($P=0.255$)、透明度($P=0.255$)、硅酸盐($P=0.259$)和 DIP ($P=0.381$)。调查期间对七连屿海域浮游植物影响最为突出的环境因子为透明度、水深、氨氮、DIN 和 N : P, 不同时期主导因子存在差异。

3 讨论

3.1 七连屿海域浮游植物群落结构特征

七连屿位于中国南海西沙群岛里, 为岛礁生态系统, 该海域浮游植物种类组成与南海北部近岸海域相似^[20-22], 均以硅藻和甲藻为主。常见种类除 4 次调查均出现的 13 种外, 还有并基角毛藻(*Chaetoceros decipiens*)、奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)、海洋角管藻、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、洛氏菱形藻(*Nitzschia lorenziana*)、

表 2 七连屿海域环境因子基本情况
Tab. 2 Basic situation of environmental factors in the Qilianyu Island

环境因子 Environmental factors	范围 Range	均值 Mean			
		2018 夏季 summer	2018 秋季 autumn	2020 夏季 summer	2021 春季 spring
水深/m	0.70–64.10	11.63	11.22	13.50	6.25
透明度/m	0.70–30.00	5.89	8.04	9.63	6.25
水温/℃	28.00–33.30	29.53	29.82	31.64	28.69
盐度	33.40–34.50	33.65	33.82	34.28	34.12
pH	7.00–8.60	7.92	7.84	8.09	7.84
DO/(mg/L)	3.60–7.60	5.73	6.17	5.79	4.95
悬浮物/(mg/L)	0.30–37.10	2.95	1.41	13.45	2.91
$\text{SiO}_3^{2-}/(\text{mg/L})$	0.034–0.143	0.1139	0.0679	—	0.0463
$\text{NO}_3^-/(\text{mg/L})$	0–0.02	0.0077	0.0004	0.0005	0.0003
$\text{NO}_2^-/(\text{mg/L})$	0–0.076	0.0007	0.0040	0.0055	0.0531
$\text{NH}_4^+/(\text{mg/L})$	0.0001–0.722	0.0069	0.0087	0.5155	0.1836
DIN/(mg/L)	0.003–0.791	0.0156	0.0132	0.5215	0.2469
DIP/(mg/L)	0.0006–0.0224	0.0018	0.0030	0.0052	0.0025
N : P	1.30–771.00	13.04	8.06	255.79	106.66

注: 2020 年夏季 SiO_3^{2-} 缺数据。
Note: Lack of data on SiO_3^{2-} in summer 2020.

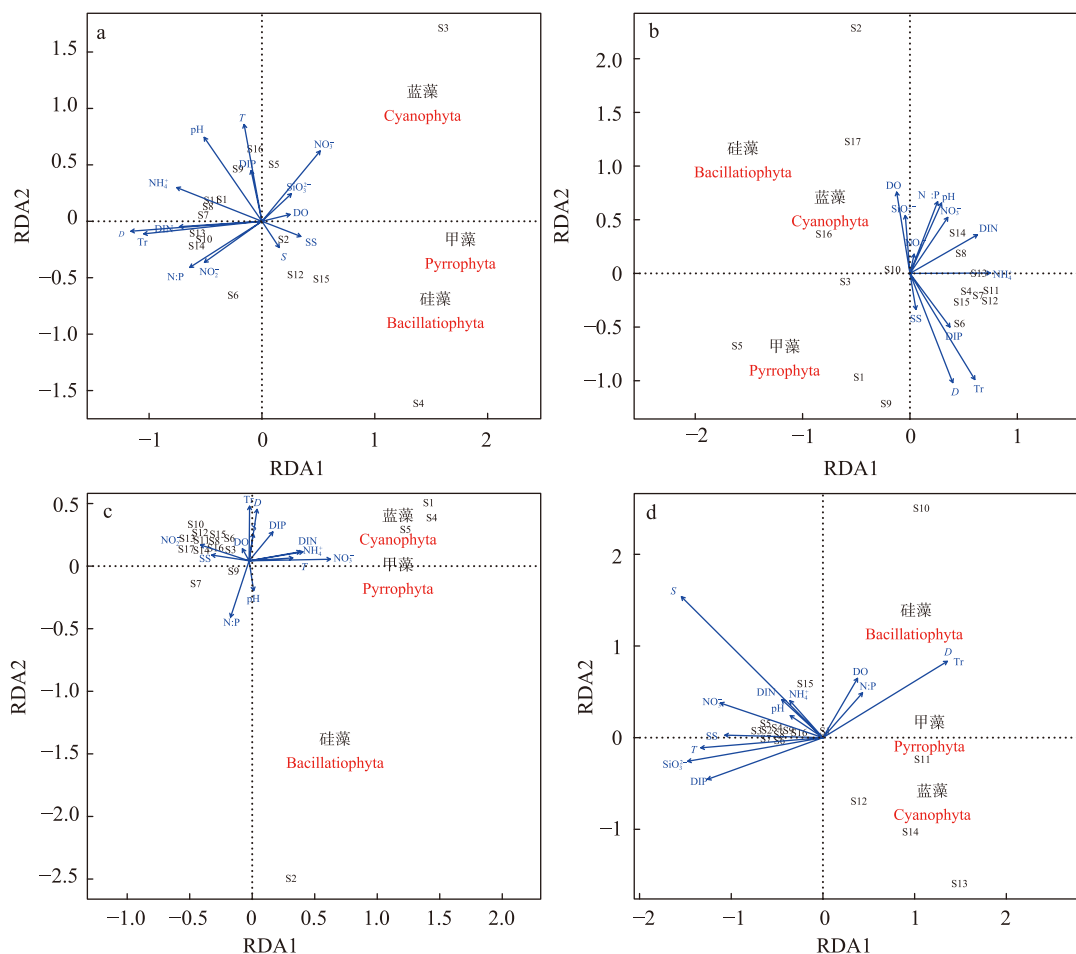


图 7 2018 年夏季(a)、秋季(b)、2020 年夏季(c)和 2021 年春季(d)七连屿浮游植物主要类群与环境因子 RDA 排序图

Fig. 7 RDA sequence of major phytoplankton groups and environmental factors in the Qilianyu Island in summer (a), autumn (b) 2018, summer (c) 2020 and spring (d) 2021

长菱形藻(*Nitzschia longissima*)、透明根管藻(*Rhizosolenia hyalina*)、梭角藻(*Ceratium fusus*)、三角角藻(*Ceratium trichoceros*)、大角角藻(*Ceratium macroceros*)、短角角藻(*Ceratium breve*)、斯氏扁甲藻(*Pyrophacus steinii*)等种类在南海北部近岸水域也常出现。然而,七连屿海域也有着自己的独特种类,如西沙角毛藻(*Chaetoceros xishaensis*)、金色角毛藻(*Chaetoceros aurivillius*)等热带外洋性种类。浮游植物优势种窄隙角毛藻(*Chaetoceros affinis*)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*)、海洋角毛藻(*Chaetoceros pelagicus*)、菱形海线藻、日本星杆藻(*Asterionella japonica*)和红海束毛藻等种类在近岸海域也常形成优势^[20-24],而串珠梯楔藻(*Climacosphenia moniligera*)和钝根管藻半刺变型在近岸海域则较少成为优势种。七连

屿海域浮游植物优势种更替明显,除蓝藻门的红海束毛藻和铁氏束毛藻外,其他种类基本不重复出现。束毛藻能长期在该海域成为优势类群与其自身特性息息相关,其具有固氮作用,对环境中的无机氮的需求低于其他种类,同时还能耐高温,这些特性使其能在像七连屿这种常年高温、营养盐贫瘠的海域获得竞争优势。

七连屿海域浮游植物丰度普遍较南海北部近岸海域低^[21-26],与陆架^[27]和海陵湾养殖区^[28]海域相近。七连屿海域浮游植物丰度组成与南海北部近岸海域不同,近岸海域常以硅藻和甲藻为优势类群,其中硅藻常占绝对优势^[24-26,28],而七连屿海域则以硅藻和蓝藻为优势类群,且两者占比较接近。这些差异的产生可能主要由两海域营养盐水平不同引起的^[29-31]。近岸海域受人类活动等影

响频繁,海域氮、磷、硅等营养盐含量丰富,硅藻较易成为优势类群^[29];而岛礁及离岸海域营养盐较贫瘠,能耐受贫营养的种类(如束毛藻)常成为优势类群^[32]。本次调查秋季丰度与刘晓红等^[10]2019年的调查结果相近,而春季丰度则高于2007年^[9],表明近年来七连屿海域浮游植物丰度增加,这可能与营养盐含量增加有关。相比其他3次调查,2020年夏季浮游植物丰度最低,然而此时的DIN、DIP和N:P均最高,导致该时期浮游植物丰度偏低的原因可能是此时的氮、磷浓度及组成不利于该海域浮游植物的生长和繁殖。从RDA分析结果也可以看出该时期DIN和DIP与硅藻丰度呈负相关,而氮磷比与蓝藻和甲藻丰度均呈负相关。

3.2 七连屿海域浮游植物多样性

物种多样性是判断浮游植物群落稳定性的重要指标。调查期间七连屿海域浮游植物多样性处于中上水平,但相较于2007年^[9]呈下降趋势,表明七连屿海域浮游植物群落稳定性在下降。导致浮游植物多样性下降的主要原因可能是优势种的集中化和单一化,与2018年秋季(4.19)相比,2018年夏季、2020年夏季和2021年春季优势种均相对较集中,优势度也相对较高。有研究发现海水中营养盐构成,尤其是氮磷比的变化会引起浮游植物种间竞争和群落结构的改变^[30-31],在氮高磷少的环境中,对磷利用率低的种类生长受到限制,而能适应高氮磷比环境的种类快速生长,形成优势种群,导致多样性指数降低。近年来七连屿海域浮游植物多样性不断下降,表明该海域生态环境受到了不同程度的污染破坏,因此,应加强该海域生态环境保护,严格控制污水排放,特别是含氮污水。

3.3 七连屿海域浮游植物影响因子

七连屿海域虽然无明显的季节变化,但不同时期该海域浮游植物群落仍存在显著差异,这也表明除温度外还有其他理化环境因子影响着该海域浮游植物种类组成及丰度。RDA分析结果显示,影响该海域浮游植物群落的重要环境因子主要为透明度、水深、氨氮、DIN和N:P等,不同时期主导因子存在差异。其中透明度和水深对该海域

浮游植物群落组成和分布影响最为广泛,是该海域的重要影响因子。由于该海域海水清澈见底,透明度与水深几乎相同,致使水深也成为影响该海域浮游植物群落的重要因子。除透明度和水深外,氮营养盐和氮磷比也是影响该海域浮游植物群落的重要环境因子。氮和磷是维持浮游植物生长和光合作用的重要元素,氮磷限制会直接影响浮游植物体内多种有机化合物的合成,从而降低浮游植物的生长^[33-34]。本次调查2018年氮、磷含量均相对较低,氮磷比也相对较低(<16),因此,氨氮等氮源对浮游植物生长影响较大。然而,至2020年该海域氮含量虽然大幅增多,但浮游植物丰度并没有增加,相反还有所降低,这可能与磷含量未相应增加,氮磷比失衡有关,氮磷比成为该时期影响浮游植物群落的重要因子。有研究发现海洋浮游植物生长繁殖所需的最适氮、磷原子比为 $16:1$ ^[35],当海水中的氮磷比大于 $22:1$,为磷限制,小于 $10:1$ 时为氮限制^[36]。据此七连屿海域浮游植物生长的营养盐限制因子由氮转为磷。朱旭宇等^[37]对浙江省洞头岛海区浮游植物研究发现高N:P组($128:1$ 和 $256:1$)细胞丰度显著高于低N:P组($1:1$ 、 $4:1$ 和 $8:1$),其结果与本研究刚好相反,这可能与两个海区浮游植物种类组成不同有关。浮游植物种类不同对氮磷比的反应也不尽相同^[38-41]。甲藻和蓝藻较偏好低氮磷比^[31,40-41],而硅藻中的一些种类偏好高氮磷比^[37],有些则在正常比例状态($N:P=16:1$)生长得最好^[36,40]。除了氮磷比外,氮、磷浓度水平对浮游植物生长的影响也是不容忽视的,浓度过高或过低均不利于浮游植物的生长繁殖^[42],从而影响其丰度水平。

参考文献:

- [1] Zhang T, Lin L, Jian L, et al. Investigation of beach debris at spawning ground of Green Sea Turtles (*Chelonia mydas*) at Qilianyu Islands, Northeastern Xisha Islands[J]. Chinese Journal of Ecology, 2020, 39(7): 2408-2415. [张婷, 林柳, 蹇丽, 等. 西沙群岛七连屿绿海龟(*Chelonia mydas*)产卵场海滩垃圾调查[J]. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2408-2415.]
- [2] Wang T, Liu Y, Quan Q M, et al. Species composition characteristics analysis of Qilianyu reef fishes of Xisha

- Islands[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2022, 29(1): 102-117. [王腾, 刘永, 全秋梅, 等. 七连屿珊瑚礁鱼类种类组成特征分析[J]. *中国水产科学*, 2022, 29(1): 102-117.]
- [3] Li Y J, Chen Z Z, Zhang J, et al. Species and taxonomic diversity of Qilanyu Island reef fish in the Xisha Islands[J]. *Journal of Fishery Sciences of China*, 2020, 27(7): 815-823. [李媛洁, 陈作志, 张俊, 等. 西沙群岛七连屿礁栖鱼类物种和分类多样性[J]. *中国水产科学*, 2020, 27(7): 815-823.]
- [4] Li Y C, Wu Z J, Chen S Q, et al. Discussion of the diversity of the coral reef fish in the shallow reefs along the Yongxing and Qilanyu Island[J]. *Marine Environmental Science*, 2017, 36(4): 509-516. [李元超, 吴钟解, 陈石泉, 等. 永兴岛及七连屿浅水礁区珊瑚礁鱼类多样性探讨[J]. *海洋环境科学*, 2017, 36(4): 509-516.]
- [5] Li Y C, Chen S Q, Zheng X Q, et al. Analysis of the change of hermatypic corals in Yongxing Island and Qilanyu Island in nearly a decade[J]. *Haiyang Xuebao*, 2018, 40(8): 97-109. [李元超, 陈石泉, 郑新庆, 等. 永兴岛及七连屿造礁石珊瑚近 10 年变化分析[J]. *海洋学报*, 2018, 40(8): 97-109.]
- [6] Rakocevic-Nedovic J, Hollert H. Phytoplankton community and chlorophyll a as trophic state indices of lake skadar (montenegro, balkan)[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2005, 12(3): 146-152.
- [7] Wan Maznah W O, Makhloogh A. Water quality of tropical reservoir based on spatio-temporal variation in phytoplankton composition and physico-chemical analysis[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(7): 2221-2232.
- [8] Toudjani A A, Çelekli A, Gümüş E Y, et al. Assessment of ecological status using phytoplankton indices and multivariate analyses in the western Mediterranean Basin[J]. *Fundamental and Applied Limnology*, 2018, 191(2): 155-167.
- [9] Wu Z J, Wang D R, Li Y C, et al. The ecological status of phytoplankton in monitored Xisha areas[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2010, 31(6): 1020-1025. [吴钟解, 王道儒, 李元超, 等. 西沙监控区浮游植物生态现状[J]. *热带作物学报*, 2010, 31(6): 1020-1025.]
- [10] Liu X H, Shi J. Phytoplankton community and its influencing factors in Xuande Islands of Xisha Sea area[J]. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2023, 31(2): 223-231. [刘晓红, 石军. 西沙宣德群岛海域浮游植物群落及其影响因子[J]. *热带亚热带植物学报*, 2023, 31(2): 223-231.]
- [11] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 12763.6-2007 specifications for oceanographic survey. Part 6: Marine biological survey[S]. Beijing: China Standards Press, 2007. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 12763.6-2007 海洋调查规范 第 6 部分: 海洋生物调查[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [12] Huang Z G, Lin M. An illustrated guide to species in China's Seas[M]. Beijing: China Ocean Press, 2012: 1-283. [黄宗国, 林茂. 中国海洋生物图集(第 1 册)[M]. 北京: 海洋出版社, 2012: 1-283.]
- [13] Yang S M, Dong S G. An fuyouguizao tupu[M]. Qingdao: China Ocean University Press, 2006: 1-267. [杨世民, 董树刚. 中国海域常见浮游硅藻图谱[M]. 青岛: 中国海洋大学出版社, 2006: 1-267.]
- [14] Guo Y J. Seaweed annals of China volume 5 (diatomata) volume 1 (central class)[M]. Beijing: Science Press, 2003: 1-493. [郭玉洁. 中国海藻志第 5 卷(硅藻门)第 1 册(中心纲)[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 1-493.]
- [15] Jin D X, Chen J H, Huang K G. Planktonic diatoms of the Chinese ocean[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1965: 1-230. [金德祥, 陈金环, 黄凯歌. 中国海洋浮游硅藻类[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1965: 1-230.]
- [16] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. GB/T 17378.4-2007 the specification for marine monitoring. Part 4: Seawater analysis[S]. Beijing: China Standards Press, 2007. [中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 17378.4-2007 海洋监测规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.]
- [17] Fu M Z, Sun P, Sun X, et al. Phytoplankton community structure and its ecological responses to environmental changes in Jinzhou Bay, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(13): 3650-3660. [傅明珠, 孙萍, 孙霞, 等. 锦州湾浮游植物群落结构特征及其对环境变化的响应[J]. *生态学报*, 2014, 34(13): 3650-3660.]
- [18] Shannon C E, Weaver W. The mathematical theory of communication[M]. Urbana: University of Illinois Press, 1963: 117-125.
- [19] Pielou E C. Species-diversity and pattern-diversity in the study of ecological succession[J]. *Journal of Theoretical Biology*, 1966, 10(2): 370-383.
- [20] Yang X, Li K Z, Tan Y H, et al. Long-term changes of phytoplankton community structure with relation to environmental factors in the Daya Bay in summer[J]. *Haiyang Xuebao*, 2022, 44(8): 110-122. [杨熙, 李开枝, 谭烨辉, 等. 大亚湾夏季浮游植物群落结构的长期变化及其与环境因

- 子的关系[J]. 海洋学报, 2022, 44(8): 110-122.]
- [21] Lv S L, Wang X F, Zeng J W, et al. Phytoplankton community structure and its environmental adaptation in Fangcheng coastal waters[J]. South China Fisheries Science, 2017, 13(4): 17-25. [吕少梁, 王学锋, 曾嘉维, 等. 防城港海域浮游植物群落结构及其环境适应性[J]. 南方水产科学, 2017, 13(4): 17-25.]
- [22] Su L, Huang Z R, Chen Z Z. Characteristics of phytoplankton community in Shuidong Bay in spring and autumn[J]. South China Fisheries Science, 2015, 11(4): 27-33. [粟丽, 黄梓荣, 陈作志. 水东湾春、秋季浮游植物群落结构特征[J]. 南方水产科学, 2015, 11(4): 27-33.]
- [23] He R, Jiang R, Zhang X F, et al. Characteristics of phytoplankton community and its relationship with environmental factors in sea waters near Maoming City in summer and autumn[J]. Marine Fisheries, 2022, 44(2): 152-163. [何瑞, 蒋然, 张心凤, 等. 茂名市近岸海域夏秋季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系[J]. 海洋渔业, 2022, 44(2): 152-163.]
- [24] Chen S, Chen H G, Tian F, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship to environmental factors in Shenzhen Bay[J]. Ecological Science, 2021, 40(1): 9-16. [陈思, 陈海刚, 田斐, 等. 深圳湾浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. 生态科学, 2021, 40(1): 9-16.]
- [25] Yang X, Tan Y H. Effects of shelf seawater intrusion on phytoplankton community structure in Daya Bay in the summer[J]. Marine Sciences, 2019, 43(7): 96-105. [杨熙, 谭烨辉. 夏季外海水入侵对大亚湾浮游植物群落结构的影响[J]. 海洋科学, 2019, 43(7): 96-105.]
- [26] Dai M, Liu H X, Wu F X, et al. Net-phytoplankton community and its relationship with environmental factors in the Wanshan Islands adjacent sea[J]. Marine Environmental Science, 2019, 38(4): 540-547, 554. [戴明, 刘华雪, 吴风霞, 等. 万山群岛海域网采浮游植物与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 2019, 38(4): 540-547, 554.]
- [27] Su L, Chen Z Z, Huang Z R, et al. Net-collected phytoplankton community structure in relation to environmental factors in the continental shelf of the northern South China Sea in spring 2015[J]. Journal of Marine Sciences, 2019, 37(3): 86-96. [粟丽, 陈作志, 黄梓荣, 等. 2015 年春季南海北部陆架海域网采浮游植物群落结构及其与环境因子关系[J]. 海洋学研究, 2019, 37(3): 86-96.]
- [28] Su J Q, Zhu C B, Zhang B, et al. Structure characteristics of phytoplankton community and the relationship with environmental factors in cage fish farming area in Hailing Bay[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2022, 31(4): 929-939. [苏家齐, 朱长波, 张博, 等. 海陵湾网箱养殖区浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. 上海海洋大学学报, 2022, 31(4): 929-939.]
- [29] Qu K M, Chen B J, Yuan Y X, et al. A preliminary study on influence of N and P on population constituent of planktonic diatoms in seawater[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 445-448. [曲克明, 陈碧鹃, 袁有宪, 等. 氮磷营养盐影响海水浮游硅藻种群组成的初步研究[J]. 应用生态学报, 2000, 11(3): 445-448.]
- [30] Hodgkiss I J, Ho K C. Are changes in N: P ratios in coastal waters the key to increased red tide blooms?[J]. Hydrobiologia, 1997, 352(1-3): 141-147.
- [31] Huang W, Zhu X Y, Zeng J N, et al. Microcosm experiments on the influence of different N/P ratios on phytoplankton community structure in the coast of Zhejiang Province[J]. Haiyang Xuebao, 2012, 34(5): 128-138. [黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 等. 氮磷比对浙江近岸浮游植物群落结构影响的实验研究[J]. 海洋学报, 2012, 34(5): 128-138.]
- [32] Wang Y, He X B, Huang J, et al. The population of *Trichodesmium* cyanobacteria in the northern Pacific Ocean associated with Kuroshio Extension[J]. Aquatic Sciences, 2022, 84(3): Article No.44.
- [33] Li G, Campbell D A. Interactive effects of nitrogen and light on growth rates and RUBISCO content of small and large centric diatoms[J]. Photosynthesis Research, 2017, 131(1): 93-103.
- [34] Wu Y P, Jia F, Hou R, et al. Physiological responses of marine diatom to different nitrogen sources and N/P ratios[J]. Journal of Jiangsu Ocean University (Natural Science Edition), 2023, 32(2): 30-38. [吴亚平, 贾非, 侯睿, 等. 海洋硅藻对不同氮源及氮磷比的生理学响应[J]. 江苏海洋大学学报(自然科学版), 2023, 32(2): 30-38.]
- [35] Redfield A C. The biological control of chemical factors in the environment[J]. American Scientist, 1958, 46(3): 230A, 205-221.
- [36] Justić D, Rabalais N N, Turner R E, et al. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine Coastal and Shelf Science, 1995, 40(3): 339-356.
- [37] Zhu X Y, Huang W, Zeng J N, et al. Effects of nitrogen and phosphorus ratios on phytoplankton community structure in winter[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2013, 19(2): 293-299. [朱旭宇, 黄伟, 曾江宁, 等. 氮磷比对冬季浮游植物群落结构的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19(2): 293-299.]
- [38] Sun J, Liu D Y, Chen Z T, et al. Growth of *Platymonas helgolandica* var. *tsingtaoensis*, *Cylindrotheca closterium* and *Karenia mikimotoi* and their survival strategies under

- different N/P ratios[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2004, 15(11): 2122-2126. [孙军, 刘东艳, 陈宗涛, 等. 不同氮磷比率对青岛大扁藻、新月柱鞘藻和米氏凯伦藻生长影响及其生存策略研究[J]. 应用生态学报, 2004, 15(11): 2122-2126.]
- [39] Liu H, Gao Y L, Yin K D, et al. Effects of N to P ratio on the growth of two red tide diatom *Skeletonema costatum* and *Thalassiosira weissflogii*[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(6): 92-97. [刘皓, 高永利, 殷克东, 等. 不同氮磷比对中肋骨条藻和威氏海链藻生长特性的影响[J]. 热带海洋学报, 2010, 29(6): 92-97.]
- [40] Kang Y Y, Liang J R, Gao Y H, et al. Influence of N/P ratio on the growth and competition of two red tide algae[J]. Haiyang Xuebao, 2006, 28(5): 117-122. [康燕玉, 梁君荣, 高亚辉, 等. 氮磷比对两种赤潮藻生长特性的影响及藻间竞争作用[J]. 海洋学报, 2006, 28(5): 117-122.]
- [41] Meng S L, Qiu L P, Hu G D, et al. Effect of nitrogen and phosphorus ratios on growth and competition of two blue-green algae[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(7): 1438-1444. [孟顺龙, 裘丽萍, 胡庚东, 等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1438-1444.]
- [42] Wang L P, Zheng B H, Meng W. Response of two marine diatoms to change nitrogen and phosphorus concentrations in medium[J]. Marine Environmental Science, 2007, 26(6): 546-549. [王丽平, 郑丙辉, 孟伟. 两种海洋硅藻对生源要素 N、P 浓度变化的响应[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(6): 546-549.]

Phytoplankton community characteristics and influencing factors in Qilianyu Island

SU Li, XU Shannan, LI Chunhou, CHEN Zuozhi

South China Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences; Key Laboratory for Sustainable Utilization of Open-sea Fishery, Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Laboratory of Big Data for South China Sea Fishery Resources and Environment, Chinese Academy of Fishery Sciences, Guangzhou 510300, China

Abstract: To provide reference for the protection and management of the ecological environment in the sea area around Qilianyu Island, the characteristics of phytoplankton communities and environmental conditions in this area were analyzed based on survey data of four voyages from 2018 to 2021. The results showed that 341 species of phytoplankton were identified from 111 genera of five phyla, with diatoms (69.21%) and dinoflagellates (23.75%) as the major species. Phytoplankton abundance fluctuated in the range of $(2.34-2841.16) \times 10^3$ cells/m³, with the highest mean value in autumn 2018 (797.47×10^3 cells/m³), followed by summer 2018 (675.40×10^3 cells/m³), with the lowest value found in summer 2020 (91.39×10^3 cells/m³). Phytoplankton abundance was mainly composed of diatoms (48.67%) and cyanobacteria (47.22%). Significant differences were observed in phytoplankton communities between the four periods ($P=0.001$). The diversity and evenness index of phytoplankton first increased and then decreased. The RDA analysis results showed that the main environmental factors affecting phytoplankton communities in Qilianyu Island were transparency, water depth, ammonia nitrogen, DIN, and N : P with dominant factors changing in different periods. The nutrient factor limiting phytoplankton growth in this area changed from nitrogen to phosphorus. The decrease in phytoplankton diversity may be related to a nitrogen-phosphorus ratio imbalance caused by a surge of nitrogen content in the sea area. Therefore, the discharge of nitrogen-containing wastewater must be reduced and the protection and management of the ecological environment in the sea area must be strengthened.

Key words: phytoplankton; succession; influencing factor; Qilianyu Island; the South China Sea

Corresponding author: CHEN Zuozhi. E-mail: zzchen2000@163.com