

广东汕头南澳岛近岸海域浮游植物群落结构与环境特征*

刘陈 魏南 王庆 刘之威 罗洪添 杨宇峰**

暨南大学水生生物研究所 广州 510632

摘要 浮游植物是海洋生态系统的主要生产者,其群落结构与水质密切相关。为揭示汕头南澳岛环境特征,于2018年1月(冬季)和4月(春季)在环南澳岛近岸海域设置12个采样站位,开展浮游植物群落结构和水环境调查。冬季共发现浮游植物74种,以硅藻为主,优势种为具槽帕拉藻(*Paralia sulcata*),浮游植物丰度平均值为 $(3.45 \pm 1.59) \times 10^4$ cells/L;春季共发现浮游植物80种,以硅藻和甲藻为主,优势种为新月菱形藻(*Nitzschia closterium*),浮游植物丰度平均值为 $(5.23 \pm 6.02) \times 10^4$ cells/L。春季浮游植物丰度和物种数较冬季高,优势种季节变化明显。冬季和春季浮游植物丰度均以青澳湾S11最高,该站位受到人类活动影响严重;深澳湾龙须菜栽培区S7浮游植物密度相对较低,说明龙须菜规模栽培对浮游植物生长抑制效应明显。冗余分析表明,冬季影响浮游植物群落结构的主要环境因子为总氮(TN)和水温(WT),春季为活性磷酸盐($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)和铵盐($\text{NH}_4\text{-N}$)。上述结果表明南澳岛近岸海域浮游植物群落结构与环境因子的时空分布差异显著,且浮游植物分布特征与水体营养盐关系密切,其中个别样点受人类活动影响较大,水质指标和浮游植物丰度都较高,呈现富营养化趋势;因此,应加强海岛环境和旅游业管理,控制陆源生活污水排放,保护海岛近海环境。(图5 表4 参41)

关键词 南澳岛;浮游植物;环境因子;冗余分析;近岸海域环境质量
CLC Q179.1 : Q948.1

Phytoplankton community and environmental characteristics in the coastal waters of Nanao Island, Shantou, Guangdong*

LIU Chen, WEI Nan, WANG Qing, LIU Zhiwei, LUO Hongtian & YANG Yufeng**

Institute of Hydrobiology, Jinan University, Guangzhou 510632, China

Abstract Phytoplankton is a major producer in marine ecosystems and its community structure is closely related to water quality. An investigation of the phytoplankton community and the water environment in the coastal waters of Nanao Island, was performed in January (winter) and April (spring), 2018. Seventy-four species of phytoplankton were identified in winter; these were mainly diatoms. The dominant species was *Paralia sulcata*. The average density of phytoplankton was $(3.45 \pm 1.59) \times 10^4$ cells/L. Eighty species of phytoplankton were identified in spring; these were mainly diatoms and dinoflagellates. The dominant species was *Nitzschia closterium*. The average density of phytoplankton was $(5.23 \pm 6.02) \times 10^4$ cells/L. The density and species composition of phytoplankton in spring was higher than that in winter, and there was a clear seasonal variation in the dominant species. The density of phytoplankton was the highest in Qingao Bay (S11) in winter and spring, whereas the cultivation area of *Gracilaria lemaneiformis* (S7) had a relatively low density. S11 was seriously affected by human activity. *G. lemaneiformis* cultivation had an obvious inhibitory effect on phytoplankton growth. Redundancy analysis revealed that the main environmental factors affecting the phytoplankton community structure in the coastal waters of Nanao Island were total nitrogen (TN) and water temperature (WT) in winter and reactive phosphate ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$), nitrite ($\text{NO}_2\text{-N}$), and ammonium ($\text{NH}_4\text{-N}$) in spring. This study showed that the phytoplankton community structure and environmental factors in the coastal waters of Nanao Island are significantly different depending on the season and region. The distribution characteristics of phytoplankton were closely related to the nutrient content of the coastal waters. Some of the sampling sites were affected by human activity. Water quality indicators and phytoplankton abundance were high, showing a trend of eutrophication. Therefore, it is necessary to strengthen the island environment, improve tourism management, control the discharge of domestic sewage, and protect the offshore environment of the island.

Keywords Nanao Island; phytoplankton; environmental factor; redundancy analysis; coastal water quality

收稿日期 Received: 2018-12-22 接受日期 Accepted: 2019-01-24

*公益性行业(农业)科研专项(201403008)资助 Supported by the Chinese Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (201403008)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: tyf@jnu.edu.cn)

浮游植物是海洋中重要的初级生产者，其群落结构组成、分布特征是多种环境因子综合作用的结果，研究浮游植物群落结构与功能对于评估浮游植物与环境的关系非常重要^[1-3]。研究表明，浮游植物在维持海洋生态系统结构功能方面扮演至关重要的角色^[4]，其群落空间分布会直接影响到水生生态系统结构与功能的稳定性，在物质循环和能量流动过程中作用重大^[5-6]。浮游植物群落对水体环境因子变化反应灵敏，能够在水体营养状态的变化迅速作出响应，是评价水体健康状况的重要指示生物^[7-9]，其群落结构变化对环境具有指示作用^[10]。因此研究浮游植物群落生态对了解海域生态系统的稳定性具有重要意义^[11-13]。

南澳岛为广东唯一的海岛县，地处粤东、南海与台湾海峡交界海域，面积106.14 km²，北回归线横贯岛屿，是具有典型热带亚热带特色的多海湾型岛屿，岛上人口约 7.2万，人口主要集中在云澳、深澳和青澳^[14-15]。南澳岛多为山区，居民多临海而居，海洋渔业资源丰富。环岛近岸海域有龙须菜栽培

区、贝类养殖区、网箱养殖鱼排、渔船码头等，人类活动对近岸环境影响较大。目前，有关南澳海域浮游植物分布与环境特征的研究主要集中在深澳湾龙须菜栽培区、鱼贝等养殖区域^[16-19]，探讨较小区域的养殖活动对浮游植物群落结构及水环境的影响，但缺乏对南澳主岛近岸海域其他区域浮游植物群落结构的全面调查。本调查围绕南澳岛环岛近岸海域，共设置12个采样站位，首次较全面地对南澳岛近岸海域浮游植物分布与环境特征进行了调查分析，以期对南澳岛近岸海域环境保护和管理提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 调查区域概况

调查环绕汕头南澳岛近岸海域（116°56'29"-117°7'58"E，23°24'28"-23°29'05" N）设置12个站点（S1-S12）（图1），采样点信息见表1，采样时间分别为2018年1月11日（冬季）和4月23

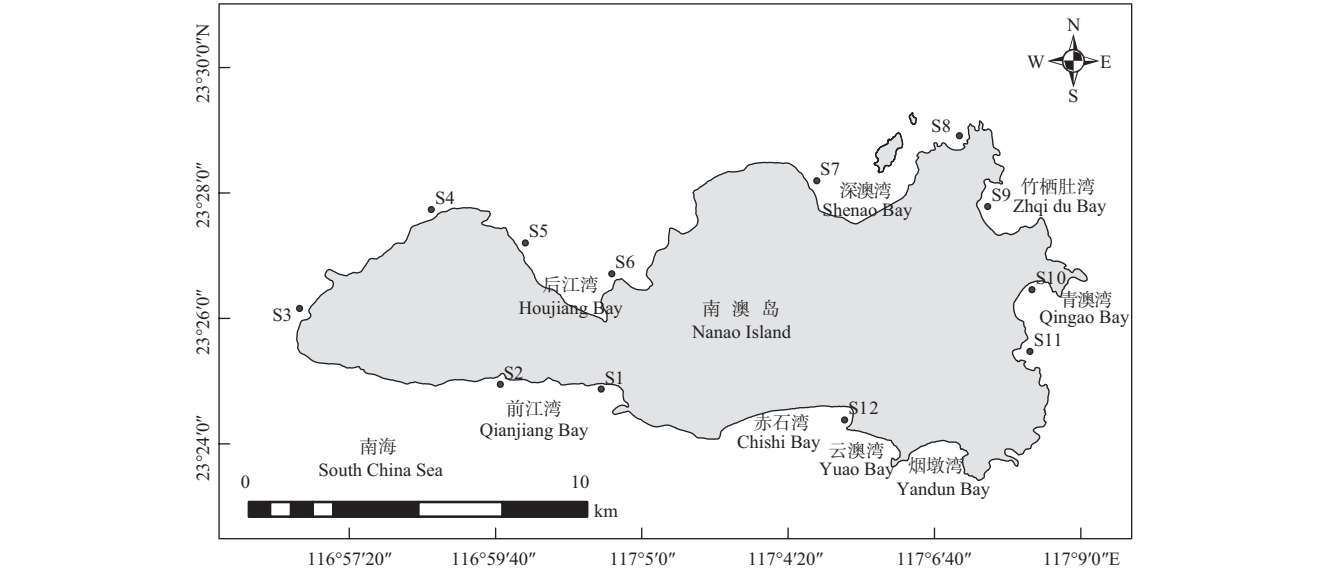


图1 南澳岛采样站位设置图。
Fig. 1 Sampling stations in Nanao Island.

表1 南澳岛采样点信息
Table 1 Information of the sampling sites in Nanao Island

采样站位 Sampling station	样点信息 Information of sampling site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)
S1	前江湾港口管理局附近，周围有大量船只停靠 Near the Port Authority of Qianjiang Bay, with a large number of boats around	117°1'35"	23°25'02"
S2	前江湾国家海洋局南澳海洋环境监测站附近海域 Near Nanao Marine Environmental Monitoring Station	116°59'44"	23°25'09"
S3	南澳大桥南澳岛码头附近，有少量船只停靠 Near Nanao Island Pier, with few boats around	116°56'30"	23°26'02"
S4	大猴澳近岸海域 Near the coastal waters of the Dahouao	116°58'35"	23°27'47"
S5	后江湾近岸海域、周围较多渔排和渔船 Near the shores of Houjiang Bay, with more fishing rafts and fishing boats around	117°0'00"	23°27'14"
S6	南澳航标管理站附近海域 Near the coastal waters of Nanao navigation mark management station	117°1'31"	23°26'43"
S7	深澳湾龙须菜栽培区 The area of Gracilaria lemaneiformis cultivation in Shenao Bay	117°6'20"	23°29'05"
S8	金银岛近岸贝类养殖区 The area of shellfish cultivation in the shores of Jinyin Island	117°6'59"	23°29'00"
S9	竹栖肚湾近岸海域 The coastal waters of Zhuqidu Bay	117°7'18"	23°27'40"
S10	青澳湾近岸海域 Near the coastal waters of Qingao Bay	117°7'57"	23°26'36"
S11	青澳湾近岸海域、附近有生活污水自九溪澳村入海水沟 Near the coastal waters of Qingao Bay, with wastewater from Jiuxiao Village flowing into ocean	117°7'57"	23°26'36"
S12	云澳湾南海三号海上餐厅附近海域，有大量船只停靠 Near the Yunao Bay, with a large number of boats around	117°5'38"	23°26'36"

日(春季)。

1.2 样品采集与处理

使用20 μm 孔径浮游生物网在海水表层缓慢拖取,将水样浓缩至50 mL,加入1-2 mL鲁哥试剂固定保存,用于浮游植物种类鉴定。使用有机玻璃采水器于表层海水采集1 L水样,立即加入1%体积的鲁哥试剂固定,于实验室中分级沉淀后浓缩至30 mL,用于浮游植物计数^[20]。浮游植物计数使用0.1 mL计数框在荧光显微镜(OLYMPUS BX51)(200x)下进行。

使用塞氏盘测定透明度(SD),YSI多功能水质分析仪测定水温(WT)、pH值、溶解氧(Dissolved oxygen, DO)、盐度(Salinity);采集1 L表层水测定总氮(TN)、硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、亚硝酸盐($\text{NO}_2\text{-N}$)、铵盐($\text{NH}_4\text{-N}$)、总磷(TP)、活性磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、活性硅酸盐($\text{SiO}_3\text{-Si}$)以及叶绿素a(Chl-a),具体测定方法参考《海洋调查规范》(GB/T 12763.4-2007)和《海洋监测规范》(GB17378.3-1998)。

1.3 数据统计与分析

浮游植物群落结构特征运用优势度指数(Y)分析,将优势度 $Y > 0.02$ 的藻类定为优势种^[11-21];使用CANOCO4.5对浮游植物丰度与环境因子的多元关系进行冗余分析(Redundancy analysis, RDA);应用Google Earth Pro和ArcGIS 10.4对站位图、浮游植物群落结构和环境因子的平面分布进行绘制;柱形图使用Excel 2016进行绘制;各理化因子冬季与春季两组数据间的差异性使用SPSS 25.0的单因素方差分析进行检验^[22]。

2 结果与讨论

2.1 环境特征

2.1.1 环境因子时空分布 冬季水温平均值为15.32 $^{\circ}\text{C}$,春季水温平均值为24.77 $^{\circ}\text{C}$,春季水温明显高于冬季($P < 0.01$, $F = 389.512$, $N = 23$);冬季、春季盐度平均值分别为29.94、32.61,春季较冬季有所增加($P < 0.01$, $F = 38.074$, $N = 23$);冬季与春季pH差异不显著($P > 0.05$, $F = 1.652$, $N = 23$),冬季均值比春季略低;冬季、春季DO质量浓度平均值分别为

8.03、6.70,春季较冬季显著降低($P < 0.01$, $F = 24.235$, $N = 23$);总氮($P < 0.05$, $F = 16.492$, $N = 23$)、铵盐($P < 0.05$, $F = 58.768$, $N = 23$)、硝酸盐($P < 0.05$, $F = 39.916$, $N = 23$)、无机氮($P < 0.05$, $F = 161.133$, $N = 23$)、活性磷酸盐($P < 0.05$, $F = 9.735$, $N = 23$)冬季显著高于春季;亚硝酸盐($P < 0.05$, $F = 266.455$, $N = 23$)、总磷($P < 0.05$, $F = 11.444$, $N = 23$)和活性硅酸盐($P < 0.05$, $F = 12.569$, $N = 23$)均冬季显著低于春季;冬季到春季的叶绿素变化不明显($P > 0.05$, $F = 0.274$, $N = 23$) (表2)。

冬季,总氮、总磷分布无明显特征;无机氮分布均匀;活性磷酸盐在海岛南部近海(S1、S2、S3)处较低,其他站位较高。春季,总氮空间分布情况与冬季类似;总磷在S7、S8较低;无机氮在海岛南部近海(S1、S2)、龙须菜栽培区(S7)较低;活性磷酸盐浓度在S7、S8较高(图2)。研究表明,龙须菜栽培与贝类养殖能抑制浮游植物的生长^[18, 23],同时龙须菜对水体中营养盐吸收作用较强,能够净化水质,贝类可通过滤食作用吸收营养盐^[24-27],因此可以考虑春季龙须菜栽培期间对近海水体营养盐结构的影响。春季较冬季无机氮、活性磷酸盐显著下降可能是由于春季采样期间有降雨,增加了氮输入量,使浮游植物生长速度加快,消耗更多的无机营养盐^[28]。

冬季N/P值在海岛南部近海(S1、S2、S3)处较高;春季N/P值无明显分布特征;冬季显著高于春季(图2)。冬季N/P比范围在7.21-58.43,平均值为 21.24 ± 16.11 ,春季N/P比范围在3.09-14.46,平均值为 8.08 ± 1.43 ;研究发现,当 $\text{N/P} < 8$ 时,对于浮游植物的生长为氮限制,当 $\text{N/P} > 30$ 时,浮游植物的生长可能受到磷限制。冬季氮、磷营养盐较为均衡;春季水体N/P平均值接近8,说明春季浮游植物生长受到潜在性氮限制。

2.1.2 水环境质量 冬季,无机氮浓度范围为25.39-47.15 $\mu\text{mol/L}$,活性磷酸盐为4.21-13.58 $\mu\text{mol/L}$;春季,无机氮浓度为4.21-13.58 $\mu\text{mol/L}$,活性磷酸盐为0.21-0.84 $\mu\text{mol/L}$ (表2)。冬季南澳岛近岸海域水质大部分符合三、四类海水水质标准(GB 3097-1997),春季南澳岛近岸海域水质大部分符合一、二类海水水质标准。本文运用郭卫东等提出的海水富营养化

表2 南澳近海水体冬春季环境因子的变化

Table 2 Variations of environmental factors in the coastal waters in Nanao Island

环境因子 Environmental factor	冬季(1月) Winter (January)		春季(4月) Spring (April)	
	范围 Range	Mean $\pm$ SD	范围 Range	Mean $\pm$ SD
WT ($^{\circ}\text{C}$)	13.90-16.6	15.32 ± 0.88	23.10-27.80	24.77 ± 1.32
Salinity	28.6-31.11	29.94 ± 0.83	29.24-33.70	32.61 ± 1.17
pH	7.08-8.07	7.95 ± 0.27	7.90-8.20	8.06 ± 0.08
DO (μmgL^{-1})	7.24-8.50	8.03 ± 0.32	5.11-8.67	6.70 ± 0.84
TN (μmolL^{-1})	30.49-113.42	60.45 ± 26.11	8.42-59.92	24.61 ± 13.19
$\text{NH}_4\text{-N}$ (μmolL^{-1})	2.22-6.84	4.34 ± 1.54	0.69-0.97	0.77 ± 0.08
$\text{NO}_3\text{-N}$ (μmolL^{-1})	22.15-40.76	27.35 ± 5.08	2.44-10.31	4.83 ± 2.09
$\text{NO}_2\text{-N}$ (μmolL^{-1})	0.15-1.68	0.71 ± 0.54	0.90-3.86	2.07 ± 0.77
DIN (μmolL^{-1})	25.39-47.15	32.40 ± 5.89	4.21-13.58	7.67 ± 2.65
TP (μmolL^{-1})	2.91-17.21	7.48 ± 4.14	2.32-27.71	15.95 ± 7.20
$\text{PO}_4\text{-P}$ (μmolL^{-1})	0.30-1.54	0.98 ± 0.44	0.21-0.84	0.52 ± 0.21
$\text{SiO}_3\text{-Si}$ (μmolL^{-1})	17.39-30.33	22.05 ± 3.66	29.39-125.82	50.32 ± 26.20
Chl-a (μgL^{-1})	1.11-4.23	2.61 ± 1.08	0.62-3.90	2.33 ± 1.43

WT: 水温; DO: 溶解氧; TN: 总磷; $\text{NH}_4\text{-N}$: 氨氮; $\text{NO}_3\text{-N}$: 硝氮; $\text{NO}_2\text{-N}$: 亚硝氮; DIN: 可溶性无机氮; TP: 总磷; $\text{PO}_4\text{-P}$: 活性磷酸盐; $\text{SiO}_3\text{-Si}$: 活性硅酸盐; Chl-a: 叶绿素a。

WT: Water temperature; DO: Dissolved oxygen; TN: Total nitrogen; $\text{NH}_4\text{-N}$: Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3\text{-N}$: Nitrate nitrogen; $\text{NO}_2\text{-N}$: Nitrite nitrogen; DIN: Dissolved inorganic nitrogen; TP: Total phosphorus; $\text{PO}_4\text{-P}$: Soluble reactive phosphorus; $\text{SiO}_3\text{-Si}$: Reactive silicate; Chl-a: Chlorophyll a.

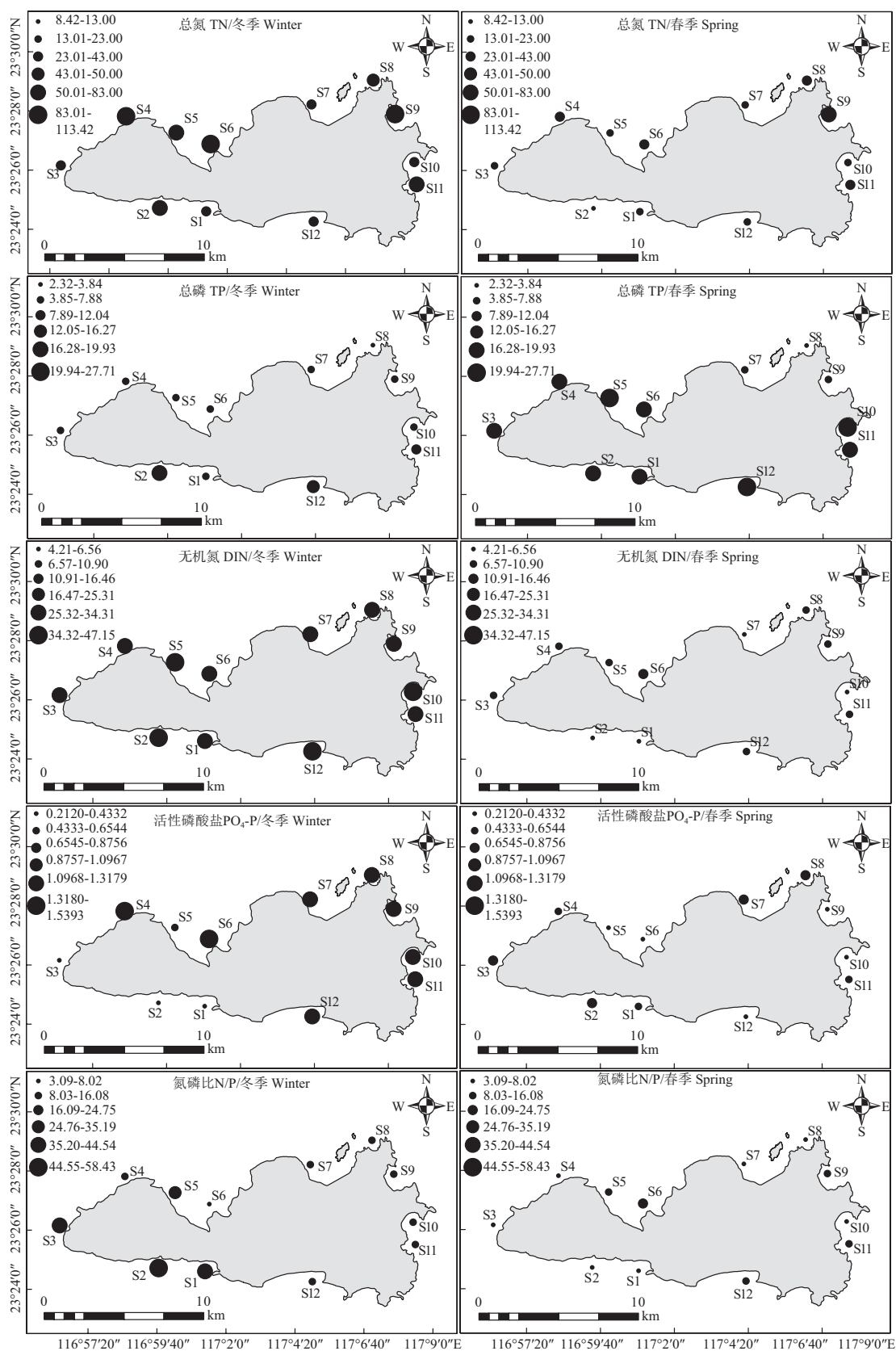


图2 南澳近海水体营养盐浓度 ($\mu\text{mol/L}$) 和N/P值的平面分布。TN: 总氮; TP: 总磷; DIN: 可溶性无机氮; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$: 活性磷酸盐; N/P: 可溶性无机氮/活性磷酸盐。

Fig. 2 Horizontal distribution of nutrient concentrations ($\mu\text{mol/L}$) and N/P in the coastal waters in Nanao Island. TN: Total nitrogen; TP: Total phosphorus; DIN: Dissolved inorganic nitrogen; $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$: Soluble reactive phosphorus; N/P: DIN/ $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$.

评价模式^[29]对南澳岛各站位营养化程度进行评估,结果表明,冬季,S1、S2、S3、S5为磷中等限制潜在性富营养,S4为富营养状态,S6为氮中等限制潜在性富营养,S7-S12处于中度营养状态;春季,S1-S12均处于贫营养状态.这表明冬季富营养程度要高于春季,春季水质较好.

2.2 浮游植物种类组成

2.2.1 浮游植物种类组成 冬季共发现浮游植物6门47属74种,其中蓝藻门2属2种,绿藻门1属1种,金藻门1属1种,甲藻门1属1种,裸藻门1属1种,硅藻门41属68种,硅藻占浮游植物种类数的91.9%. 冬季最优势物种为具槽帕拉藻 (*Paralia sulcata*),其次为小环藻 (*Cyclotella* sp.)、针杆藻 (*Synedra* sp.)、菱形藻 (*Nitzschia* sp.)、直链藻 (*Melosira* sp.)、中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) (表3). 春季共发现浮游植物共5门57属80种,其中绿藻门2属5种,金藻门1属1种,甲藻门3属3种,裸藻门1属1种,硅藻门50属70种,硅藻占浮游植物种类数的87.5%. 春季最优势物种是新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*),其次为中肋骨条藻、角毛藻 (*Chaetoceros* sp.)、多甲藻 (*Peridinium* sp.)等 (表3). 与以往调查结果相似,中肋骨条藻在深澳湾海域一直保持优势地位^[16-17, 30]. 冬季、春季调查水域浮游植物种类组成主要为硅藻,多为广温广盐性、温带近岸种,符合调查站位的环境特征. Holopainen等发现不同时间和空间水体浮游植物群落结构差异较大^[31]. 浮游植物群落由冬季的硅藻占绝对优势变为春季的硅藻和甲藻共同占优势,浮游植物优势种有明显的季节变化,这可能是由于春季

水温初升,适合甲藻的生长环境使得甲藻的生长速度加快,甲藻的种类和密度均大量增加^[32]. 三门湾海域也呈现随水温升高甲藻种类和密度增加的趋势^[33]. 冬季、春季部分站位发现极少数栅藻,蓝藻、绿藻,可能是由于调查站位距离居民生活区较近,附近有生活污水排入,使得水体营养盐浓度发生变化促使蓝藻和绿藻的繁殖.

2.2.2 浮游植物密度与分布 冬季浮游植物丰度介于 1.14×10^4 - 7.32×10^4 cells/L,平均值为 $(3.45 \pm 1.59) \times 10^4$ cells/L; S11丰度最高, S7、S8丰度较低 (图3). 春季浮游植物丰度介于 0.3×10^4 - 23.67×10^4 cells/L,平均值为 $(5.23 \pm 6.02) \times 10^4$ cells/L; S11丰度最高,贝类养殖区S8、青澳湾附近海域 (S9、S10、S11)和S12较其他站位 (S1-S7) 浮游植物丰度高 (图3). 冬季和春季S11浮游植物丰度均达到最高,可能是由于自九溪澳村的生活污水流入S11海域丰富了浮游植物种类与丰度,同时该处水温较其他各站位高;加上青澳湾属于旅游区,游客较多,可能加剧了青澳湾海域的污染,促进了浮游植物的生长. 南澳岛目前正大力发展旅游业,随着南澳人口的增加,可能增加对近岸海域的污染,特别是青澳湾旅游区应加强管理和环境保护. S7为龙须菜栽培区,浮游植物丰度较小. 龙须菜能够吸收水体中浮游植物生长所需N、P等营养盐,因此抑制了浮游植物生长^[34-35]. 冬季硅藻和甲藻相对丰度分别为94.42%和1.88%,春季硅藻和甲藻相对丰度分别为88.68%和9.41%. 各站位优势种相对丰度季节变化明显 (图4). 冬季具槽帕拉藻 (*Paralia sulcata*) 相对丰度最高;春季变为新月菱形藻

表3 南澳近海浮游植物优势物种
Table 3 Phytoplankton dominant species in Nanao Island

时期 Time	代码 Code	优势物种 Dominant species	丰度比例(P/%) Relative proportion	频度(f) Occurrence frequency	优势度(Y) Dominance value
冬季 Winter	P1	具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	42.68	1.00	0.4268
	P2	小环藻属 <i>Cyclotella</i> sp.	8.62	0.83	0.0719
	P3	针杆藻属 <i>Synedra</i> sp.	6.45	0.83	0.0537
	P4	菱形藻属 <i>Nitzschia</i> sp.	5.51	0.83	0.0459
	P5	直链藻属 <i>Melosira</i> sp.	4.78	0.83	0.0399
	P6	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	6.67	0.42	0.0278
春季 Spring	P7	新月菱形藻 <i>Nitzschia closterium</i>	19.11	1.00	0.1911
	P6	中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>	17.05	0.58	0.0995
	P8	角毛藻属 <i>Chaetoceros</i> sp.	8.93	0.50	0.0447
	P9	多甲藻 <i>Peridinium</i> sp.	7.21	0.58	0.0421
	P10	舟形藻属 <i>Navicula</i> sp.	4.16	0.83	0.0346

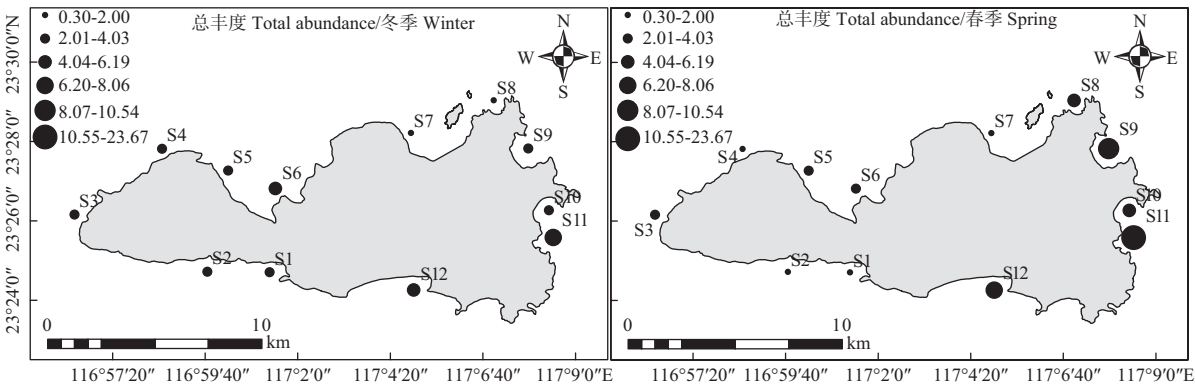


图3 南澳岛近岸海域浮游植物丰度 (10^4 cells/L) 的平面分布.
Fig. 3 Horizontal distribution of phytoplankton abundance (10^4 cells/L) in the coastal waters in Nanao Island.

(*Nitzschia closterium*) 相对丰度最高, 具槽帕拉藻相对丰度显著下降, 中肋骨条藻、角甲藻相对丰度显著上升. 春季浮游植物密度较冬季上升与新月菱形藻、中肋骨条藻的大量繁殖密切相关.

2.3 浮游植物群落结构与环境因子的关系

冬季和春季RDA分析显示, 前两轴环境因子都解释了超过70%的物种信息(表4), 说明两季RDA排序结果均能够较好地反映浮游植物优势物种与环境因子的关系(图5).

浮游植物群落结构能在一定范围对环境因子的变化作出响应, 光照、温度、深度、透明度是影响浮游植物生长的主要物理环境因素; 氮磷等营养元素是影响浮游植物的主要化学环境因素^[13]. 浮游植物在不同时期对营养的需求不同, 其群落结构会受到营养供求状况的调节^[36]. 通过对环境因子进行蒙特卡洛置换检验^[37]发现, 对浮游植物群落结构产生显著影响的环境因子, 冬季为总氮($P < 0.05$)、水温($P < 0.05$); 春季包括活性磷酸盐($P < 0.01$)、亚硝酸盐($P < 0.01$)和铵盐($P < 0.05$). 冬季, 浮游植物总丰度、具槽帕拉藻与水温呈正相关关系, 与总氮呈负相关关系, 随着水

温的升高浮游植物丰度增加, 总氮浓度的增加对大部分硅藻(P1-P5)生长具有抑制作用, 但促进了中肋骨条藻(P6)的生长(图5A). 春季, 浮游植物总丰度、硅藻(P2, P6-P8, P10-P12)与亚硝酸盐呈正相关关系, 与活性磷酸盐、铵盐呈负相关关系; 甲藻(P9)随盐度的升高而降低, 这与2014年莱州湾甲藻变化趋势^[38]相同, 其他营养盐浓度的升高均对甲藻(P9)的生长有促进作用, 说明与冬季对比, 春季营养盐环境更适宜于甲藻的生长(图5B). 有研究发现, 低浓度磷酸盐会使硅藻的生长较其他浮游植物更容易受到抑制^[39], 因此春季低浓度活性磷酸盐可能是造成除硅藻外其他浮游植物种群较冬季更为丰富的原因之一. 冬季、春季都呈现出N/P值与硅藻呈现负相关关系, 与甲藻呈现正相关关系, 随着N/P比的升高, 硅藻相对丰度下降, 甲藻的相对丰度升高, 这一结论与以往一些调查结果^[40-41]相同.

3 结论

南澳岛近岸海域冬季水体氮、磷营养盐分布较均衡, 而

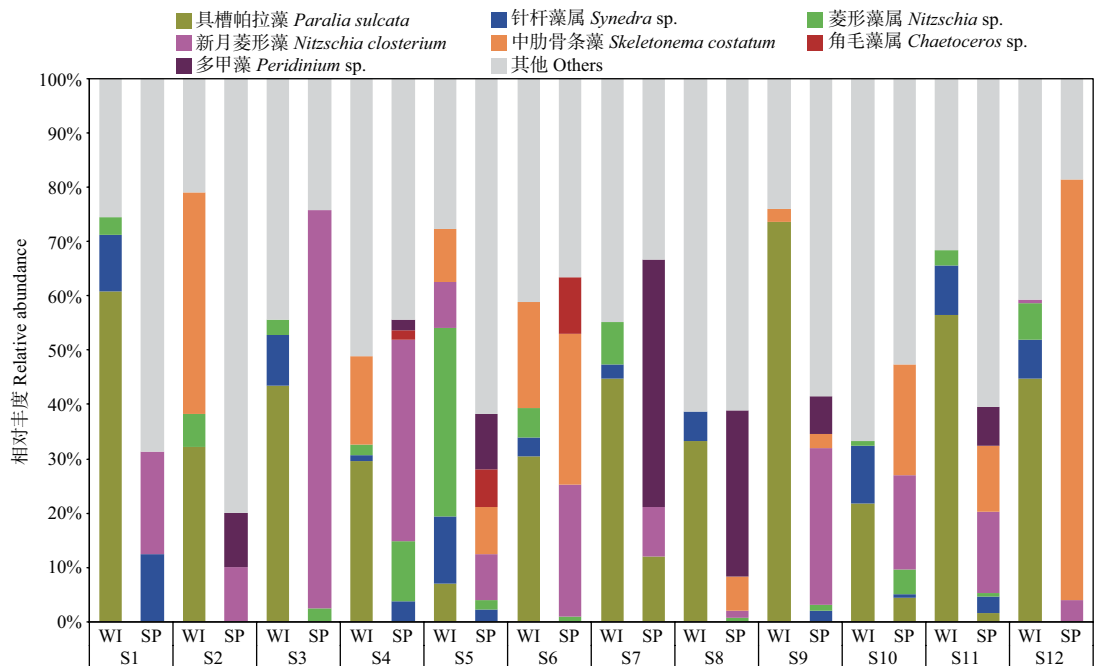


图4 南澳岛浮游植物冬季 (WI) 和春季 (SP) 主要优势种相对丰度.
Fig. 4 Relative abundance of main dominant phytoplankton species in Nanao Island in winter (WI) and spring (SP).

表4 南澳岛浮游植物优势种与环境因子RDA分析结果
Table 4 Summary of RDA on dominant species and environmental factors in Nanao Island

时间 Time	轴 Axe	特征值 Eigenvalue	物种-环境相关性 Species-environment correlation	累计变量百分比 Cumulative percentage variance (P/%)		总特征值 Sum of all eigenvalue	所有典范特征值 Sum of all canonical eigenvalue
				物种数据 Of species date	物种-环境相关性 Of species-environment relation		
冬季 Winter	1	0.405	0.922	40.5	55.5	1.000	0.730
	2	0.182	0.839	58.7	80.4		
	3	0.089	0.781	67.7	92.7		
	4	0.050	0.739	72.6	99.5		
春季 Spring	1	0.460	0.977	46.0	50.8	1.000	0.906
	2	0.191	0.971	65.1	71.9		
	3	0.104	0.959	75.5	83.4		
	4	0.090	0.940	84.5	93.3		

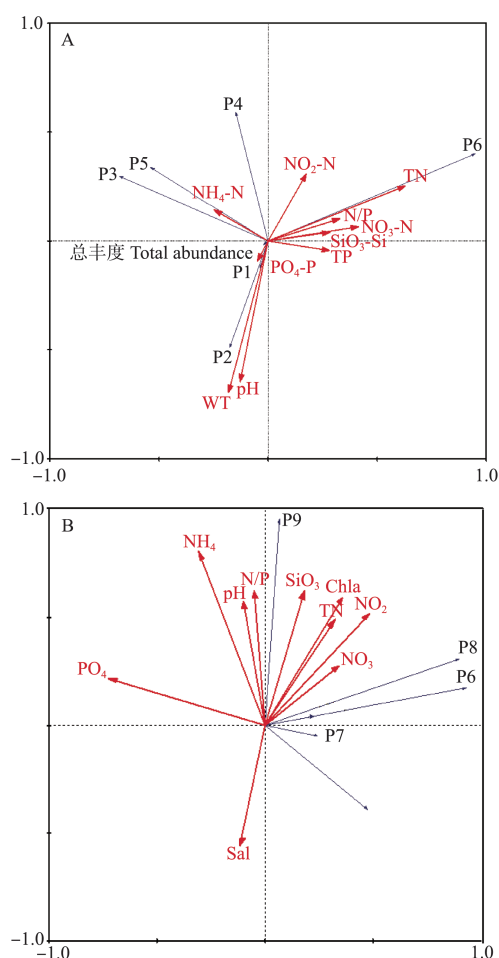


图5 南澳岛冬季 (A) 和春季 (B) 浮游植物与环境因子的RDA排序图。P1-P10为优势种, 代码见表2。

Fig. 5 RDA triplot of phytoplankton and environmental factors in winter (A) and in Spring (B) in Nanao Island. P1-P12 indicate dominant species in Table 2.

春季水体则呈现氮低磷高的潜在性氮限制状态。氮、磷各营养盐的季节差异分析得出变化显著, 春季水体环境更适合甲藻生长。各站经营养程度评估, 冬季水体大部分处于中度营养状态, 春季水体处于贫营养状态, 春季水质总体优于冬季。

南澳岛近岸海域浮游植物群落结构分析表明: (1) 优势种季节变化明显, 冬季绝对优势物种为具槽帕拉藻, 丰度比例达到42.68%; 春季优势物种主要为新月菱形藻和中肋骨条藻, 丰度比例分别达到19.11%和17.05%, 中肋骨条藻在冬季和春季均为优势物种; (2) 浮游植物种类组成和丰度季节变化明显, 春季种类数和丰度较冬季均增加, 其中硅藻在冬季和春季都占绝对优势, 但春季较冬季硅藻相对丰度下降, 甲藻在春季较冬季具有相对较高的丰度和优势度。

调查发现, 龙须菜栽培区 (S7) 浮游植物丰度较低, 可能是龙须菜的大规模栽培抑制了浮游植物的生长。青澳湾海域 (S11) 浮游植物丰度最高, 可能是大量生活污水排入近岸海域丰富了水体营养盐促进了藻类繁殖。南澳岛近海环境受到海水养殖、生活污水排放、旅游等人类活动多重因素影响, 因此, 应结合南澳岛近岸海域的水文条件、地理特征等数据进一步分析论证; 同时加强海岛环境和旅游业管理, 控制生

活污水排放, 保护海岛近海环境。

参考文献 [References]

- Willen E. Phytoplankton in Water Quality Assessment—An Indicator Concept. Hydrological and Limnological Aspects of Lake Monitoring [M]. Chichester: Wiley & Sons, Ltd, 2000: 57-80
- Naselli-Flores L, Padisák J, Albay M. Shape and size in phytoplankton ecology: do they matter [J]? *Hydrobiologia*, 2007, **578** (1): 157-161
- Akhurst DJ, Jones GB, Clark M, Reichelt-Brushett A. Effects of fish and macrophytes on phytoplankton and zooplankton community structure in a subtropical freshwater reservoir [J]. *Limnologia*, 2017, **62**: 5-18
- Malone T, Azzaro M, Bode A, Brown E, Duce R, Kamykowski D, Kang SH, Kedong Y, Thorndyke M, Wang J, Park C, Calumpong H, Eghtesadi P. Primary production, cycling of nutrients, surface layer and plankton [M]// The First Global Integrated Marine Assessment World Ocean Oceans and Law of the Sea. New York: United Nations, 2016
- Reynolds CS. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability [J]. *FreshwBiol*, 1984, **14** (2): 111-142
- Beisner BE, Longhi ML. Spatial overlap in lake phytoplankton: relations with environmental factors and consequences for diversity [J]. *Limnol Ocean*, 2013, **58** (4): 1419-1430
- Reynolds CS. What factors influence the species composition of phytoplankton in lakes of different trophic status [J]? *Hydrobiologia*, 1998, **369**: 11-26
- Salmaso N, Morabito G, Buzzi F, Garibaldi L, Simona M, Mosello. Phytoplankton as an indicator of the water quality of the Deep Lakes South of the Alps [J]. *Hydrobiologia*, 2006, **563** (1): 167-187
- Suikkanen S, Laamanen M, Huttunen M. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea [J]. *Est Coast Shelf Sci*, 2007, **71** (3): 580-592
- 宋贤英, 张捷, 白春节, 周蓉蓉, 刘伟, 徐石林, 谭大鹏, 黄平沙. 甬江干流浮游植物的群落结构及其季节变化[J]. 应用与环境生物学报, 2013, **19** (4): 663-669 [Seasonal change in structure of phytoplankton communities in the Yongjiang River [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2013, **19** (4): 663-669]
- 孙军, 刘东艳. 多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J]. 海洋学报(中文版), 2004, **26** (1): 62-75 [Sun J, Liu DY. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies [J]. *Acta Oceanol Sin*, 2004, **26** (1): 62-75]
- Reynolds CS, Huszar V, Kruk C, Naselli-Flores L, Melo S. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton [J]. *J Plankt Res*, 2002, **24**: 417-428
- Reynolds CS. Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability [J]. *FreshwBiol*, 1984, **14**: 111-142
- 乔永民, 顾继光, 杨扬, 黄长江. 南澳岛海域表层沉积物重金属分布、富集与污染评价[J]. 热带海洋学报, 2010, **29** (1): 77-84 [Qiao YM, Gu JG, Yang Y, Huang CJ. The distribution, enrichment and pollution assessment of heavy metals in surface sediments of sea areas around the Nanao Island [J]. *J Trop Ocean*, 2010, **29** (10): 77-84]
- 杨宇峰, 林学群. 南澳海洋资源综合开发与持续利用[J]. 海洋科学, 1999 (3): 69-71 [Yang YF, Lin XQ. Exploitation and sustainable utilization of marine resources in Nanao [J]. *Mar Sci*, 1999 (3): 69-71]

- 16 张俊梅, 刘擎, 王庆, 杨宇峰. 汕头南澳白沙湾浮游植物群落结构及水体营养盐分布特征[J]. 水生生态学杂志, 2012, **33** (2): 61-68 [Zhang JM, Liu Q, Wang Q, Yang YF. The phytoplankton community and distribution of nutrient in Baisha bay, Shoutou [J]. *J Hydroecol*, 2012, **33** (2): 61-68]
- 17 王亮根, 杜虹, 陈伟洲, 黄显兵, 郑兵, 曹会彬. 深澳湾浮游植物群落特征及其多样性研究[J]. 生态科学, 2010, **29** (3): 200-206 [Wang LG, Du H, Chen WZ, Huang XB, Zheng B, Cao HB. Phytoplankton community characteristics and diversity in Shenao bay, China [J]. *Ecol Sci*, 2010, **29** (3): 200-206]
- 18 武宇辉, 王庆, 魏南, 刘之威, 欧林坚, 杨宇峰. 不同鲍养殖模式下浮游植物群落结构与水质特征的比较[J]. 南方水产科学, 2017, **6** (13): 73-81 [Wu YH, Wang Q, Wei N, Liu ZW, Ou LJ, Yang YF. Comparison community structure and water quality in different modes of abalone mariculture [J]. *S China Fish Sci*, 2017, **6** (13): 73-81]
- 19 黄银爽, 欧林坚, 杨宇峰. 广东南澳岛大型海藻龙须菜与浮游植物对营养盐的竞争利用[J]. 海洋与湖沼, 2017, **48** (4): 806-813 [Huang YS, Ou LJ, Yang YF. Nutrient competition between macroalgae *Gracilarialemaneiformis* and phytoplankton in coastal waters of Nanao Island [J]. *Oceanol Limnol Sin*, 2017, **48** (4): 806-813]
- 20 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法[M]. 北京: 科学出版社, 1995: 334-337 [Zhang ZS, Huang XF. The research method of plankton in freshwater [M]. Beijing: Science Press, 2006]
- 21 Danilov R, Ekelund NGA. The efficiency of seven diversity and one similarity indices based on phytoplankton data for assessing the level of eutrophication in lakes in central Sweden [J]. *Sci Total Environ*, 1999, **234**: 15-23
- 22 高忠江, 施树良, 李钰. SPSS方差分析在生物统计的应用[J]. 现代生物医学进展, 2008, **8** (11): 2116-2120 [Gao ZJ, Shu SL, Li Y. Application of SPSS in AVOVA of biological statistics [J]. *Progr Mod Biom*, 2008, **8** (11): 2116-2120]
- 23 Yang YY, Liu Q, Chai ZY, Tang YZ. Inhibition of marine coastal bloom-forming phytoplankton by commercially cultivated *Gracilaria lemaneiformis* (Rhodophyta) [J]. *J Appl Phycol*, 2014, **27** (6): 2341-2352
- 24 马晓娜, 李蕊, 孙国祥, 王顺奎, 于凯松, 刘鹰. 贝藻混养对大西洋鲑养殖废水的生物滤除[J]. 海洋科学, 2016, **40** (1): 32-39 [Ma XN, Li H, Sun GX, Wang SK, Yu KS, Liu Y. Biological purification of Atlantic salmon (*Salmosalar*) waste-water with the polyculture of Bivalves and Macroalgae [J]. *Mar Sci*, 2016, **40** (1): 32-39]
- 25 Yang YY, Chai ZY, Wang Q, Chen W, He ZL, Jiang SJ. Cultivation of seaweed *Gracilaria* in Chinese coastal waters and its contribution to environmental improvements [J]. *Algal Res*, 2015, **9**: 236-244
- 26 李宵, 杨宇峰, 陈伟洲. 大型海藻龙须菜对浮游植物群落结构影响的实验研究[J]. 生态科学, 2009, **28** (2): 102-106 [Li X. Yang YF, Chen WZ. Experimental study on the effects of seaweed *Gracilarialemaneiformis* on the phytoplankton community structure [J]. *Ecol Sci*, 2009, **28** (2): 102-106]
- 27 杨宇峰, 费修缙. 大型海藻对富营养化海水养殖区生物修复的研究与展望[J]. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 2003, **33** (1): 53-57 [Yang YF, Fei XG. Prospects for bioremediation of cultivation of large-sizes seaweed in eutrophic mariculture areas [J]. *J Ocean Univ Qingdao (Nat Sci Ed)*, 2003, **33** (1): 53-57]
- 28 郑兵. 深澳湾环境因子的变化特征与龙须菜养殖的生态效应[D]. 汕头: 汕头大学, 2009 [Zheng B. The variation characteristics of environmental factors and the ecological effects of *Gracilaria lemaneiformis* culture in Shenao Bay [D]. Shantou: Shantou university, 2009]
- 29 郭卫东, 章小明, 杨逸萍, 胡明辉. 中国近岸海域潜在性富营养化程度的评价[J]. 台湾海峡, 1998, **17** (1): 64-70 [Guo WD, Zhang XM, Yang YP, Hu MH. Potential eutrophication assessment for Chinese coastal waters [J]. *J Ocean Taiwan Strait*, 1998, **17** (1): 64-70]
- 30 翁卫立, 关万春. 汕头南澳岛沿岸浮游植物对阳光紫外辐射响应的研究[J]. 浙江农业学报, 2012, **24** (3): 425-429 [Weng WL, Guan WC. Response of phytoplankton to solar UVR in Nanao Island, Shantou [J]. *Acta Agric Zhejiangensis*, 2012, **24** (3): 425-429]
- 31 Holopainen, AL, Niinioja R, Rämö A. Seasonal succession, vertical distribution and long term variation of phytoplankton communities in two shallow forest lakes in eastern Finland [J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506**: 237-245
- 32 王朝晖, 陈菊芳, 徐宁, 齐雨藻. 大亚湾汕头海域硅藻、甲藻的数量变动及其与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2005, **6** (2): 186-192 [Wang ZH, Chen JF, Xu N, Qi YZ. Dynamics on cell densities of diatom, dinoflagellate and relationship with environmental factors in Aotou area, Daya bay, South China Sea [J]. *Oceanol Limnol Sin*, 2005, **6** (2): 186-192]
- 33 陈丹琴, 叶然, 魏永杰, 俞海波, 杨晴, 王玉除, 廖有根. 三门湾浮游植物群落结构与环境因子的关系研究[J]. 海洋环境科学, 2018, **36** (1): 70-75 [Chen DQ, Ye R, Wei YB, Yu HB, Yang Q, Wang YC, Liao YG. Correlation between phytoplankton community and environmental variables in Sanmen bay, East China Sea [J]. *Mar Environ Sci*, 2018, **36** (1): 70-75]
- 34 He PM, Xu SS, Zhang HY, Wen SS, Dai YJ, Lin SJ, Yarish C. Bioremediation efficiency in the removal of dissolved inorganic nutrients by the red seaweed, *Porphyraezoensis*, cultivated in the open sea [J]. *Water Res*, 2008, **42** (4-5): 1281-1289
- 35 Yang YF, Fei XG, Song JM, Hu HY, Wang GC, Chung IK. Growth of *Gracilaria lemaneiformis* under different cultivation conditions and its effects on nutrient removal in Chinese coastal waters [J]. *Aquaculture*, 2006, **254**: 248-255
- 36 蒲新明, 吴玉霖. 浮游植物的营养限制研究进展[J]. 海洋科学, 2000, **24** (2): 27-30 [Pu XM, Wu YF. Review of nutrients limitation of phytoplankton [J]. *Mar Sci*, 2000, **24** (2): 27-30]
- 37 Leps J, Smilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003: 149-162
- 38 孙慧慧, 刘西汉, 孙西艳, 王玉珏, 刘东艳. 莱州湾浮游植物群落结构与环境因子的时空变化特征研究[J]. 海洋环境科学, 2017, **36** (5): 662-669 [Sun HH, Liu XH, Sun XY, Wang YJ, Liu DY. Temporal and spatial variations of phytoplankton community and environmental factors in Laizhou bay [J]. *Mar Environ Sci*, 2017, **36** (5): 662-669]
- 39 Riegman R, Boer Md, DomisLdS. Growth of harmful marine algae in multispecies cultures [J]. *J Plankt Res*, 1996, **18**: 1851-1866
- 40 李照, 宋书群, 李才文, 俞志明. 丰、枯水期长江口邻近海域浮游植物群落结构特征及其环境影响初探[J]. 海洋学报, 2017, **29** (10): 124-144 [Li Z, Song SQ, Li CW, Yu ZM. Preliminary discussion on the phytoplankton assemblages and its response to the environmental changes in the Changjiang (Yangtze) river estuary and its adjacent waters during the dry season and the wet season [J]. *Acta Oceanol Sin*, 2017, **29** (10): 124-144]
- 41 Egge JK. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations [J]? *J Mar Syst*, 1998, **16**: 191-198