

DOI: 10.5846/stxb201803090472

骆鑫, 蓝文陆, 李天深, 黎明民. 钦州湾春、夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系. 生态学报, 2019, 39(7): - .

Luo X, Lan W L, Li T S, Li M M. Distribution of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Qinzhou Bay in spring and summer. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): - .

# 钦州湾春、夏季浮游植物群落特征及其与环境因子的关系

骆 鑫, 蓝文陆\*, 李天深, 黎明民

广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 北海 536000

**摘要:** 为了探究人类活动对钦州湾浮游植物群落的影响, 分别于 2013 年 3 月和 7 月进行了两航次综合调查。采用聚类分析和典型对应分析法, 分别对浮游植物群落及其与环境因子的关系进行了研究。结果表明春夏两季浮游植物共有 3 门 45 属 115 种, 其中硅藻 100 种、甲藻 14 种、蓝藻 1 种。两季浮游植物生态类群分别以暖温带广布种和暖温带近岸种为主, 季节性差异明显。典型对应分析表明, 影响浮游植物分布的主要环境因子是悬浮物、pH、盐度和营养盐。受入海径流和外来水团等因子影响, 钦州湾浮游植物群落在夏季更易聚为相似性群落, 春季则呈斑块化分布。

**关键词:** 钦州湾; 浮游植物; 生态类群; 典型对应分析

## Distribution of phytoplankton and its relationship with environmental factors in the Qinzhou Bay in spring and summer

LUO Xin, LAN Wenlu\*, LI Tianshen, LI Mingmin

Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi, Beihai 536000, China

**Abstract:** Qinzhou Bay (108.46—108.75°E, 21.54—21.87°N), located at the middle coast of Guangxi Province, is a semi-enclosed lagoon bay. As one of the most important marine economic bases on the south coast of China, Qinzhou Bay plays a significant role in numerous marine industries, which involve port transportation, coastal tourism, and marine aquaculture and fisheries, among others. In recent years, along with rapid economic development and a denser human population, many environmental problems have arisen and seriously threaten both the marine ecosystem and economic sustainable development, such as eutrophication, red tides, and the decrease of coastal wetlands, among others. Phytoplankton, as is well known, is very sensitive to regional environmental change and plays a key role as a primary producer in the marine ecosystem. However, there is little research regarding the effects of variable environmental factors on phytoplankton communities in Qinzhou Bay. In 2013, to determine the relationship between marine exploitation and phytoplankton communities, we conducted a spring (March) and summer (July) survey in Qinzhou Bay. Cluster and canonical correspondence analysis (CCA) were applied. The results were as follows: 3 phyla, 45 genera, and 115 species were classified during the entire year in Qinzhou Bay, including 100 diatom species, 14 dinoflagellate species, and 1 cyanobacteria species. The warm water species dominated phytoplankton communities in both spring and summer, although we observed a substantial change in community structure between the seasons. The results of CCA showed that suspended substance, pH, salinity, and nutrients were the main environmental factors that affected the distribution of phytoplankton.

**基金项目:** 国家自然科学基金(41466001); 广西科技计划项目(桂科 A A17129001, 桂科 A D17129041); 广西自然科学基金项目(2015GXNSFBA139194, 2015GXNSFAA139244)联合资助

收稿日期: 2018-03-09; 网络出版日期: 2018-00-00

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dr.lan@139.com

Under the influence of different runoff and water mass, most of the phytoplankton communities in spring were easily clustered into similar communities; however, those in summer tended to be more varied.

**Key Words:** Qinzhou Bay; phytoplankton; ecological group; canonical correspondence analysis

钦州湾位于广西沿海中部,钦州市与防城港市之间,是一个南北向的“葫芦状”半封闭型海湾。独特地理条件和优良的水文气候,使钦州湾成为华南沿海地区港口运输、临海工业、滨海旅游业和海洋养殖、捕捞及水产品加工等多个产业发展的重要基地之一<sup>[1]</sup>。近年来,随着经济快速发展和人口愈加密集,出现了牡蛎高密度养殖、生活及工业污水过量排放和围填海与生态保护不协调等不良现象<sup>[2-4]</sup>,引发了水体生态环境承载压力过重、水体富营养化、赤潮和滨海湿地丧失等诸多生态环境问题<sup>[5-7]</sup>,严重威胁经济发展的可持续性<sup>[8]</sup>。浮游植物作为海洋生态系统中的初级生产者,在作为鱼虾等水产品的饵料和调节水体富营养化水平<sup>[9]</sup>等方面有重要作用,其数量多寡和种类组成直接制约着海洋生产力的水平,在海洋生态系统的物质循环和能量流动中扮演者关键角色。研究浮游植物在钦州湾的生存现状以及人类活动对其群落的影响,对于研究近海内湾型河口生态系统及钦州湾经济的可持续发展均具有重要意义。

而关于钦州湾浮游植物的早期研究,仅见利用光合色素研究浮游植物群落结构组成与分布特征<sup>[10-12]</sup>,和对浮游植物与较少的环境因子间的相关性分析研究<sup>[13]</sup>。本文利用 2013 年对钦州湾浮游植物与水质两个季节的监测数据,分析浮游植物群落参数的分布及季节变化特征的同时,研究浮游植物与环境因子之间的关系,为钦州湾海洋资源的可持续利用提供基础数据和支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域与采样

2013 年春季(3 月)和夏季(7 月),在钦州湾海域(108.46—108.75°E,21.54—21.87°N)对浮游植物等项目分别进行了两个航次的综合调查。调查设置 13 个大面站,其中茅尾海 4 个(S1—S4),湾颈 2 个(S5—S6),外湾 7 个(S7—S13)(图 1)。每个站点采集表层 5L 水样作为浮游植物定量样品,加入 40 mL 鲁哥氏碘液进行固定保存;同时采用浅水Ⅲ型网进行垂直拖网,采集浮游植物定性样品并用甲醛固定保存(终浓度 5%),带回实验室处理分析。当场测定水深、温度、盐度、溶解氧和 pH,采集表层海水样品带回实验室,测定叶绿素 a、悬浮物、化学需氧量、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、活性磷酸盐和硅酸盐含量。以上样品的采样、保存、运输与分析严格按照《海洋监测规范》<sup>[14-15]</sup>进行。

### 1.2 数据处理与分析

网采浮游植物数据主要用于物种组成和生态类群分析,其他定量分析主要用水采分析结果数据。采用 Primer 6.0 计算浮游植物群落的香农威纳多样性指数(Shannon-Weiner Diversity Index,  $H'$ );将丰度数据进行  $\log(x+1)$  转化后,进行不同站位群落间的相似性分析(Resemblance Analysis),再进行聚类分析(Cluster Analysis),取大于 40% 的相似度为基准将不同站位划为相似性群落。采用 Surfer 11.0 绘制站位图、水平分布图。浮游植物群落参数的分布图。采用 SPSS 16.0 进行两个季节各环境参数的独立样本  $t$  检验(Independent-Samples  $t$  Test)。采样 CANOCO 软件包进行物种-环境因子的典型对应分析(CCA, Canonical Correspondence Analysis),若蒙特卡罗检验(Monte Carlo Test)结果为显著( $P < 0.05$ ),排序结果可信,排序分析结果可以采用,否则不能采用<sup>[16]</sup>。

优势度  $Y$  的计算公式为:

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

式中,  $N$  为样品所有物种的总丰度,  $n_i$  为样品中第  $i$  个物种的总丰度,  $f_i$  为该物种在所有样品中出现的频率。若某物种  $Y \geq 0.02$ , 则认定为优势种<sup>[17]</sup>。根据浮游植物的适盐及分布特征将其分为不同的生态类群<sup>[18-23]</sup>。

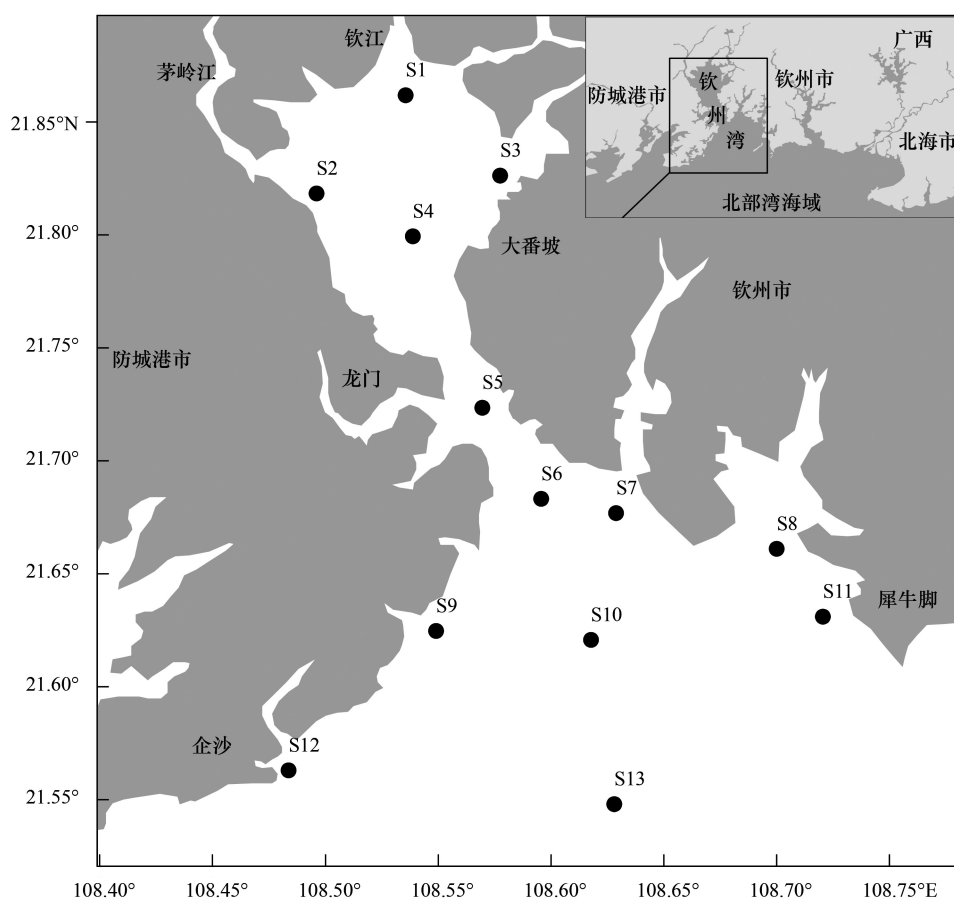


图 1 站位分布

Fig.1 Horizontal distribution of sample stations

## 2 结果

### 2.1 环境因子的分布特征及季节性差异

春季,钦州湾水温平均值为  $18.5^{\circ}\text{C}$ ,最高值出现在 S8 号站位 ( $20.4^{\circ}\text{C}$ ),最低值出现在 S6 号站位 ( $16.7^{\circ}\text{C}$ )。盐度平均值为 24.6,最高值出现在 S13 号站位 (30.1),最低值出现在 S2 号站位 (16.1)。

夏季,钦州湾水温平均值为  $29.4^{\circ}\text{C}$ ,最高值出现在 S10 号站位 ( $31.8^{\circ}\text{C}$ ),最低值出现在 S7 号站位 ( $27.0^{\circ}\text{C}$ )。盐度平均值为 8.0,最高值出现在 S12 号站位 (22.4),最低值出现在 S1 号站位 (0.2)。水温在春、夏两季空间差异较小总体上呈现出内湾水温较低外湾水温较高的分布特征,盐度则空间差异显著呈现由湾顶向湾口逐渐升高的分布趋势(图 2)。

春季,钦州湾溶解无机氮平均值为  $25.8 \times 10^{-2} \text{mg/L}$ ,最高值出现在 S1 号站位 ( $87.2 \times 10^{-2} \text{mg/L}$ ),最低值出现在 S12 号站位 ( $2.6 \times 10^{-2} \text{mg/L}$ )。溶解无机磷平均值为  $9.4 \times 10^{-3} \text{mg/L}$ ,最高值出现在 S4 号站位 ( $16.9 \times 10^{-3} \text{mg/L}$ ),最低值出现在 S11 号站位 ( $0.4 \times 10^{-3} \text{mg/L}$ )。

夏季,钦州湾溶解无机氮平均值为  $60.0 \times 10^{-2} \text{mg/L}$ ,最高值出现在 S1 号站位 ( $79.2 \times 10^{-2} \text{mg/L}$ ),最低值出现在 S13 号站位 ( $38.6 \times 10^{-2} \text{mg/L}$ )。溶解无机磷平均值为  $16.1 \times 10^{-3} \text{mg/L}$ ,最高值出现在 S6 号站位 ( $36.3 \times 10^{-3} \text{mg/L}$ ),最低值出现在 S12 号站位 ( $1.1 \times 10^{-3} \text{mg/L}$ )。溶解无机氮和溶解无机磷在两个季节都呈现由湾顶向湾口逐渐降低的分布趋势(图 3)。

将两个季节海水所测环境因子进行独立样本  $t$  检验,所得结果如表 1。除水深、pH、溶解氧、溶解无机磷和氮磷比以外,春、夏两季的其他环境因子均存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )。其中,水温、悬浮物、化学需氧量、溶

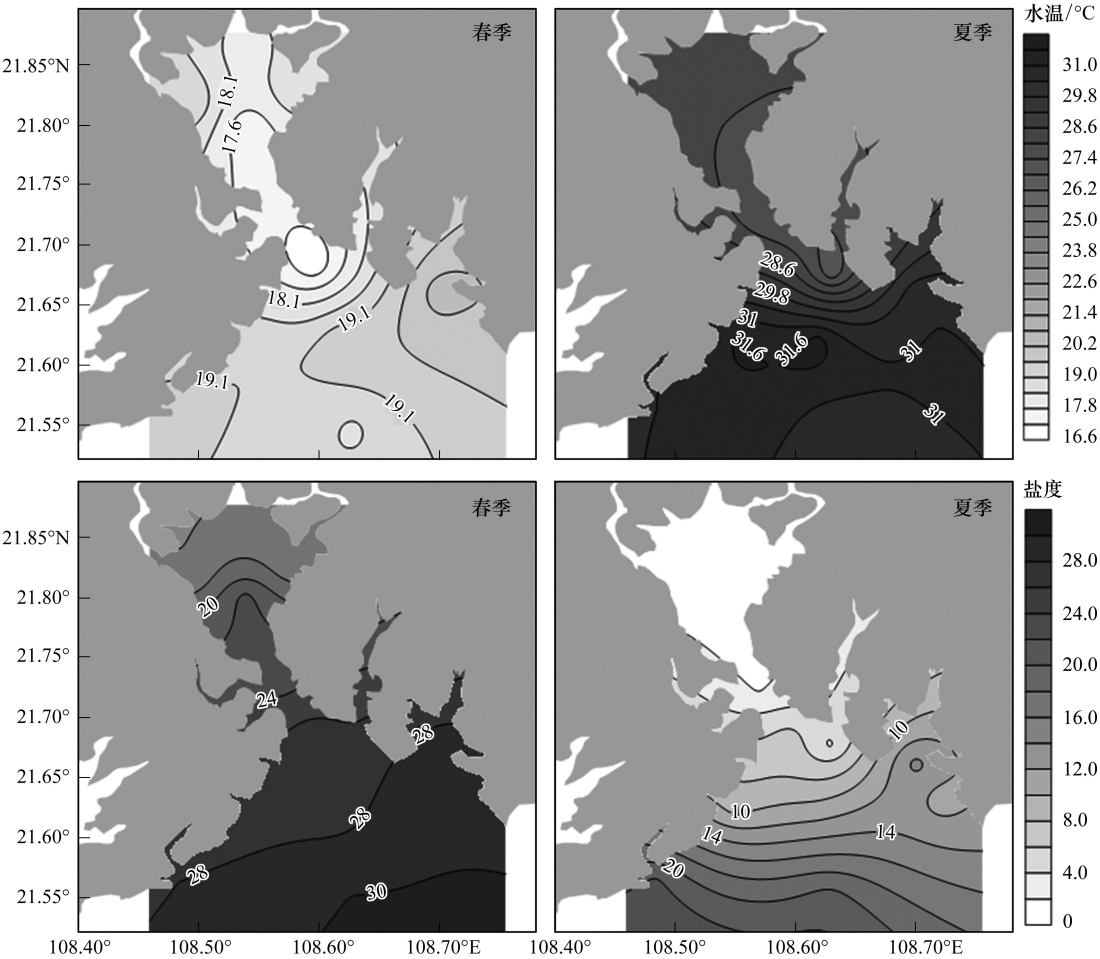


图 2 水温与盐度的水平分布  
Fig.2 Horizontal distribution of temperature and salinity

解硅和溶解无机氮是夏季显著高于春季,盐度则是春季显著高于夏季。

表 1 环境因子分季节比较  
Table 1 Environmental variables (Mean±SD) in different seasons

| 环境参数 Environmental variables      | 春季 Spring   | 夏季 Summer   | P     |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-------|
| 水深 Depth/m                        | 4.7±2.5     | 6.0±3.1     | 0.251 |
| 水温 Temp/°C                        | 18.5±1.1    | 29.4±1.7    | 0.000 |
| 盐度 Sal                            | 24.6±5.2    | 8.0±7.8     | 0.000 |
| pH                                | 7.9±0.3     | 7.6±0.5     | 0.191 |
| 悬浮物 SS/(mg/L)                     | 13.6±4.9    | 23.5±14.2   | 0.031 |
| 化学需氧量 COD/(mg/L)                  | 1.1±0.4     | 1.9±0.2     | 0.000 |
| 溶解氧 DO/(mg/L)                     | 7.0±0.7     | 7.0±0.8     | 0.913 |
| 溶解硅 DSi/(10 <sup>-1</sup> mg/L)   | 6.6±6.1     | 18.1±4.2    | 0.000 |
| 溶解无机磷 DIP/(10 <sup>-3</sup> mg/L) | 9.4±11.2    | 16.1±12.9   | 0.156 |
| 溶解无机氮 DIN/(10 <sup>-2</sup> mg/L) | 25.8±25.0   | 60.1±14.0   | 0.000 |
| 氮磷比 N/P                           | 154.8±173.1 | 241.7±339.9 | 0.420 |

Abu: abundance, 丰度; Temp: temperature, 水温; Sal: salinity, 盐度; SS: suspended substance, 悬浮物; COD: chemical oxygen demand, 化学需氧量; DO: dissolved oxygen, 溶解氧; DSi: dissolved silicon, 溶解硅; DIP: dissolved inorganic phosphorus, 溶解无机磷; DIN: dissolved inorganic nitrogen, 溶解无机氮

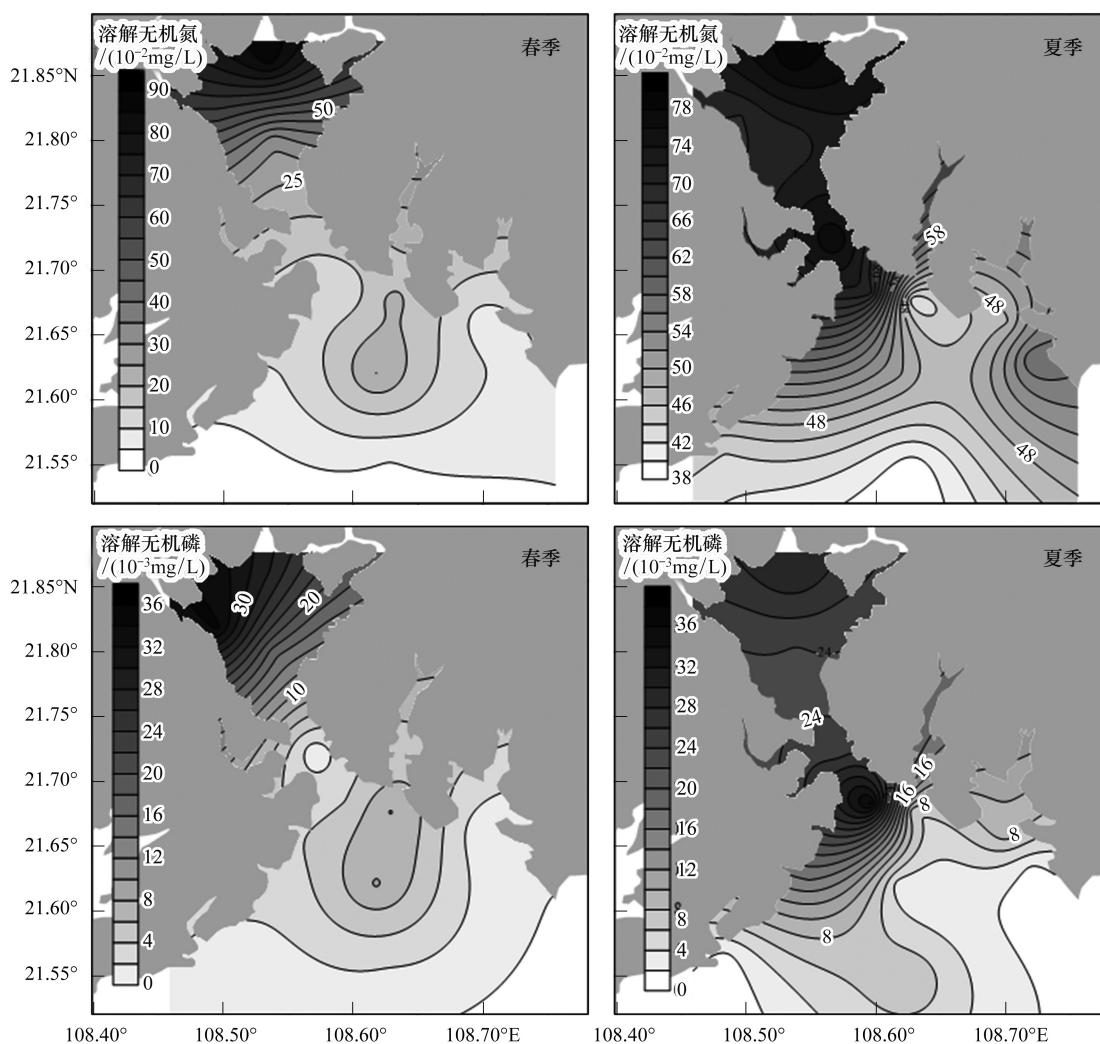


图3 溶解无机氮和溶解无机磷的水平分布

Fig.3 Horizontal distribution of dissolved inorganic nitrogen and phosphorus

## 2.2 种类组成、生态类群与优势种

2013年春夏两季,钦州湾鉴定的浮游植物分别隶属于3门45属,共115种。春季浮游植物2门35属79种,其中硅藻门28属68种,占总种类数的86.1%,甲藻门7属11种,占总种类数的13.9%;夏季3门38属74种,其中硅藻门31属63种,占总种类数的85.1%,甲藻6属10种,占总种类数的13.5%,剩余为蓝藻。

根据浮游植物的适盐及分布特点,可以将钦州湾的浮游植物大致分为四大类群:(1)淡水类群:适宜盐度极低,随着入海径流进入海湾的种类,主要分布于茅尾海内,包括的大部分的菱形藻(*Nitzschia* sp.)、以及舟形藻(*Navicula* sp.)和蓝藻(Cyanophyta)等;(2)暖温带近岸类群:又叫暖温带低盐类群,特点是适宜盐度不高,主要分布于近岸海域,如柔弱拟菱形藻(*Pseudonitzschia delicatissima*)、尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)、诺登海链藻(*Thalassiosira nordenskiöldii*)和原甲藻(*Prorocentrum* sp.)等;(3)暖温带广布种,适温适盐都较广,近岸和远岸海域分布都比较普遍,包括中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、中华盒形藻(*Biddulphia sinensis*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)和丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)等;(4)温热带大洋种:适温适盐偏高,随北部湾靠外水团进入钦州湾,并主要分布于外湾海域,包括辐射圆筛藻(*Coscinodiscus radiatus*)、覆瓦根管藻(*Rhizosolenia imbricata*)、粗根管藻(*Rhizosolenia robusta*)、活动盒形藻(*Biddulphia mobiliensis*)和密联角毛藻(*Chaetoceros densus*)等。

2013 年钦州湾春、夏两季浮游植物优势种共有 11 种。春季有优势种 6 种,辐射圆筛藻优势度最高( $Y=0.070$ ),丰度占浮游植物总丰度的 18.1%,其次为布氏双尾藻( $Y=0.069$ )。夏季有优势种 7 种,布氏双尾藻优势度最高( $Y=0.078$ ),丰度占浮游植物总丰度的 14.5%,其次为中肋骨条藻( $Y=0.064$ ),两个季节仅有布氏双尾藻、中华盒形藻和菱形藻 3 个共有优势种(表 2)。

表 2 钦州湾浮游植物优势种及优势度

| Table 2 The dominant species and dominance of phytoplankton in Qinzhou Bay |                                           |                                   |                      |
|----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|
| 季节<br>Season                                                               | 优势种<br>Dominant species                   | 丰度百分/%<br>Percentage of abundance | 优势度 (Y)<br>Dominance |
| 春季 Spring                                                                  | 辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i>       | 18.1                              | 0.070                |
|                                                                            | 布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>         | 11.3                              | 0.069                |
|                                                                            | 诺登海链藻 <i>Thalassiosira nordenskiöldii</i> | 16.4                              | 0.063                |
|                                                                            | 菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.                  | 6.8                               | 0.032                |
|                                                                            | 中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>          | 6.1                               | 0.024                |
|                                                                            | 角毛藻 <i>Chaetoceros</i> sp.                | 4.1                               | 0.013                |
| 夏季 Summer                                                                  | 布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwellii</i>         | 14.5                              | 0.078                |
|                                                                            | 中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i>         | 10.5                              | 0.064                |
|                                                                            | 中华盒形藻 <i>Biddulphia sinensis</i>          | 15.6                              | 0.048                |
|                                                                            | 海洋原甲藻 <i>Prorocentrum micans</i>          | 8.9                               | 0.041                |
|                                                                            | 菱形海线藻 <i>Thalassionema nitzschioides</i>  | 10.8                              | 0.039                |
|                                                                            | 叉状角藻 <i>Ceratium furca</i>                | 10.6                              | 0.033                |
|                                                                            | 菱形藻 <i>Nitzschia</i> sp.                  | 5.8                               | 0.031                |

2.3 丰度与多样性的时空分布

春季,钦州湾浮游植物平均丰度为  $4.0\times10^3$  个/L,最低值出现在茅尾海钦江口附近的 S1 号站位(400 个/L),最高值出现在钦州港犀牛角的 S11 号站位( $9.6\times10^3$  个/L)。茅尾海和湾颈浮游植物丰度低,钦州湾湾口丰度高,总体上呈现由湾顶向湾口逐渐升高的分布趋势。

夏季,钦州湾浮游植物平均丰度为  $12.1\times10^3$  个/L,最低值出现在茅尾海南部的 S4 号站位(800 个/L),最高值出现在防城港企沙附近的 S12 号站( $41.2\times10^3$  个/L)。茅尾海内浮游植物丰度低,钦州湾外湾丰度高,总体呈现由湾顶向湾口逐渐升高的分布趋势(图 4)。

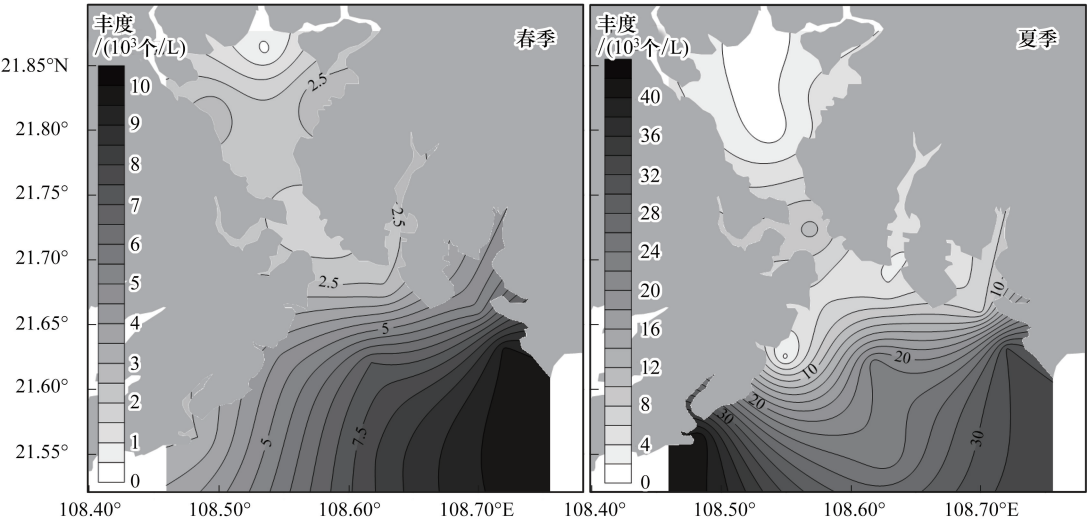


图 4 浮游植物丰度的水平分布  
Fig.4 Horizontal distribution of abundance

春季,钦州湾浮游植物平均多样性指数为 2.3,最低值出现在外湾中部的 S10 号站位(1.5),最高值出现在外湾南部的 S13 号站位(3.0)。

夏季,钦州湾浮游植物平均多样性指数为 2.4,最低值出现在外湾北部的 S7 号站位(1.7),最高值出现在茅尾海东部的 S3 号站位(3.1)。两个季节的多样性指数外湾总体上高于茅尾海和湾颈,但分布无明显规律(图 5)。

将两个季节浮游植物群落参数进行独立样本  $t$  检验,所得结果如表 3。夏季的浮游植物丰度和叶绿素 a 显著高于春季( $P<0.05$ ),多样性指数则无显著变化。

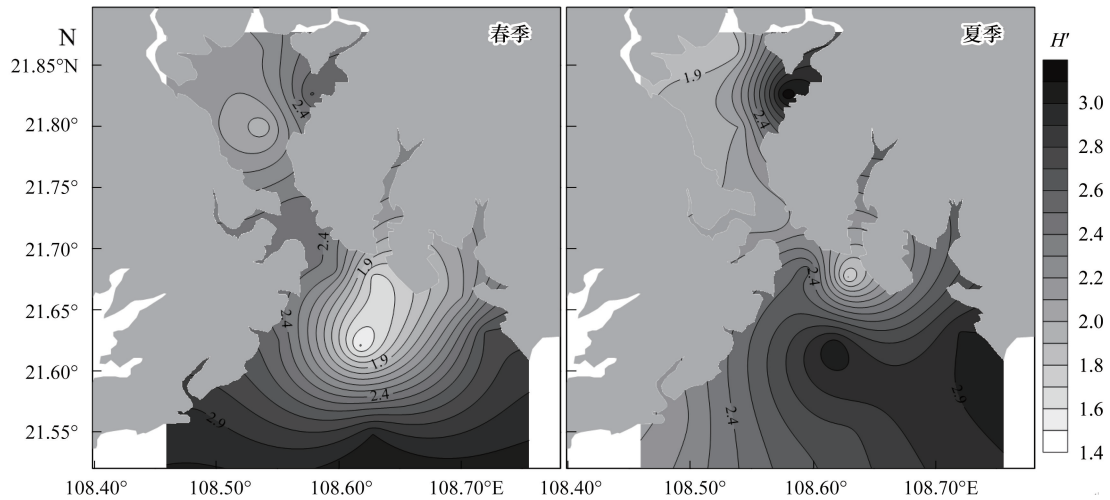


图 5 浮游植物多样性指数的水平分布  
Fig.5 Horizontal distribution of diversity

表 3 群落参数分季节比较

Table 3 Environmental variables (Mean±SD) in different seasons

| 环境参数 Environmental variables | 春季 Sping | 夏季 Summer | P     |
|------------------------------|----------|-----------|-------|
| 丰度 Abu/(10 <sup>3</sup> 个/L) | 4.5±2.7  | 8.7±3.5   | 0.000 |
| 多样性指数 H'                     | 2.3±0.4  | 2.4±0.4   | 0.946 |
| 叶绿素 a Chla/(μg/L)            | 1.9±1.0  | 8.3±9.6   | 0.033 |

2.4 浮游植物与环境因子的关系

选取春、夏两季主要浮游植物种类(优势度  $Y \geq 0.005$ )分别与相应环境因子进行典型对应分析(CCA, Canonical Correspondence Analysis)排序:春季选取 11 个物种,蒙特卡罗检验结果表明,第一轴( $P=0.045$ )和全部轴( $P=0.019$ )均呈显著性差异( $P<0.05$ ),表明排序结果是可信的;夏季选取了 14 个物种,第一轴和全部轴的蒙特卡罗检验均无显著性差异( $P>0.05$ ),排序结果不可信。

悬浮物(相关性系数 Correlated-Weight,  $CW=0.7423$ )、pH( $CW=-0.7220$ )、盐度( $CW=-0.7103$ )、溶解硅( $CW=0.6911$ )、溶解无机磷( $CW=0.6341$ )和溶解无机氮( $CW=0.5498$ )是影响春季主要浮游植物种类分布的主要环境因子。选取的 9 个环境因子可解释浮游植物群落总变量的 52.7%,第一轴和第二轴的物种-环境相关系数分别为 0.955 和 0.902,并分别解释了 27.4%和 15.3%的物种变量,表明 11 种主要浮游植物与 9 类环境因子相关性较好。

春季主要浮游植物种类(组 I,包括并基角毛藻<*Chaetoceros decipiens*>、布氏双尾藻、密联角毛藻、诺登海链藻和中华盒形藻)与化学需氧量、悬浮物和营养盐呈较好的负相关,而与叶绿素 a、盐度和水深等呈较好正相关,组 II 的种类(菱形藻和舟形藻)则与它们刚刚相反。辐射圆筛藻、具槽直链藻(*Melosira sulcata*)和洛氏菱形藻(*Nitzschia lorenziana*)则与所有环境因子无显著关联(图 6)。

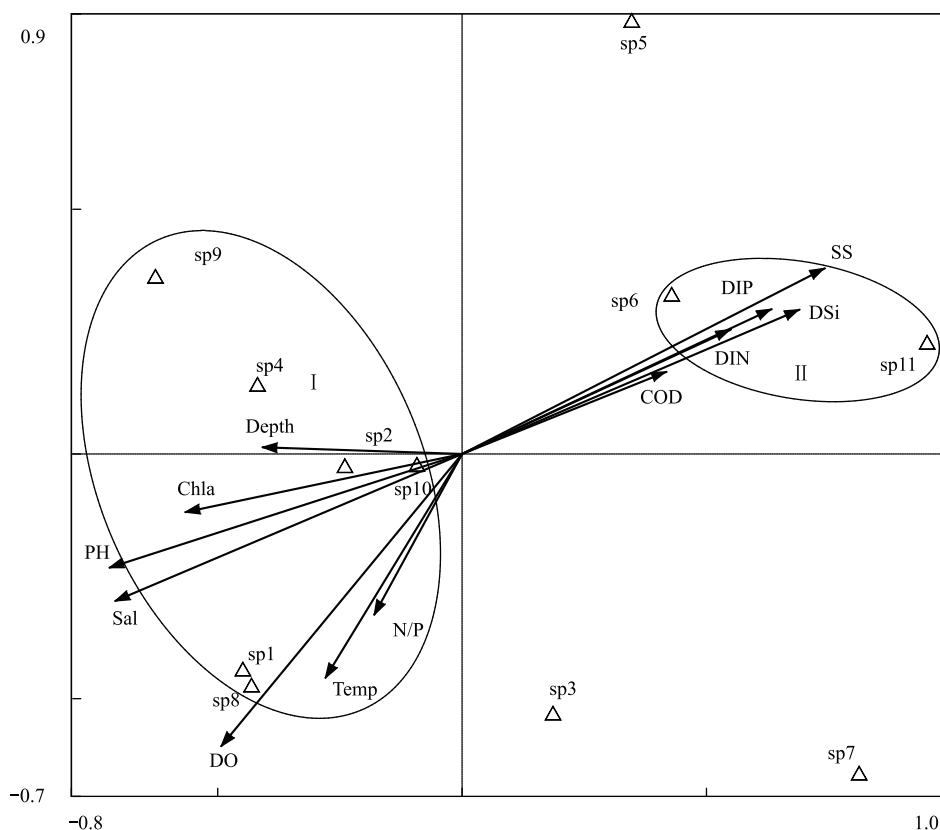


图 6 春季主要浮游植物种类与环境因子之间的 CCA 排序图

Fig.6 CCA ordination of main phytoplankton species with environmental variables in spring

sp1:并基角毛藻 *Chaetoceros decipiens*; sp2:布氏双尾藻 *Ditylum brightwellii*; sp3:辐射圆筛藻 *Coscinodiscus radiatus*; sp4:角毛藻 *Chaetoceros* sp.; sp5:具槽直链藻 *Melosira sulcata*; sp6:菱形藻 *Nitzschia* sp.; sp7:洛氏菱形藻 *Nitzschia lorenziana*; sp8:密联角毛藻 *Chaetoceros densus*; sp9:诺登海链藻 *Thalassiosira nordenskiöldii*; sp10:中华盒形藻 *Biddulphia sinensis*; sp11:舟形藻 *Navicula* sp.

## 2.5 不同海域群落结构差异

将春、夏两季不同站位浮游植物丰度数据进行聚类分析 (Cluster Analysis), 得到结果如图 7。在此基础上, 分别将春季和夏季的站位划分为不同类群的群落, 从而直观地看出聚类及分布情况 (图 8)。

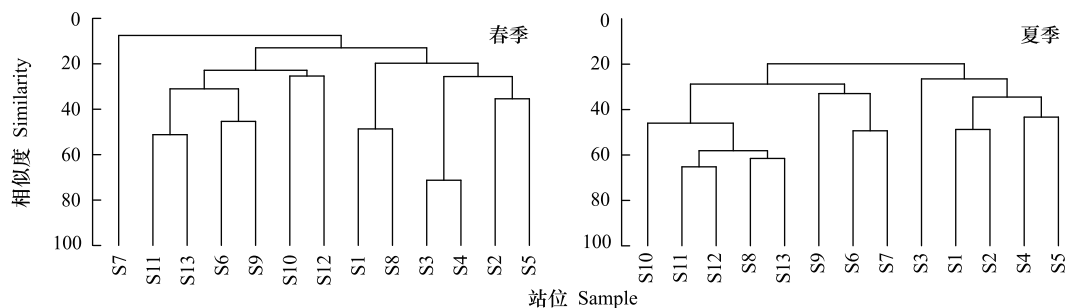


图 7 各站位浮游植物样品的聚类分析

Fig.7 Cluster analysis of different phytoplankton samples

春季除了类群 A、B 和 C 以外, 春季大部分浮游植物群落聚类不明显, 呈现明显斑块化分布。其中, 类群 A、B、和 C 分别能较好地两两聚为相似群类群 (相似度分别为 71.3%、51.2%、48.7% 和 45.4%), 剩余 7 个站群落分别与其他站群落差异性较大 (相似度小于 40.0%) (图 8, 春季)。

夏季大部分站位的浮游植物可较好地聚为相似类群。其中, 类群 D、E、F 和 G 分别能聚为相似类群 (相

似度分别为 46.0%、49.4%、48.8%和 43.3%),尤其是类群 G,在钦州港形成一个范围较大的相似性类群,剩余仅有 S3 和 S9 两个站分别与其他站群落差异较大(图 8,夏季)。

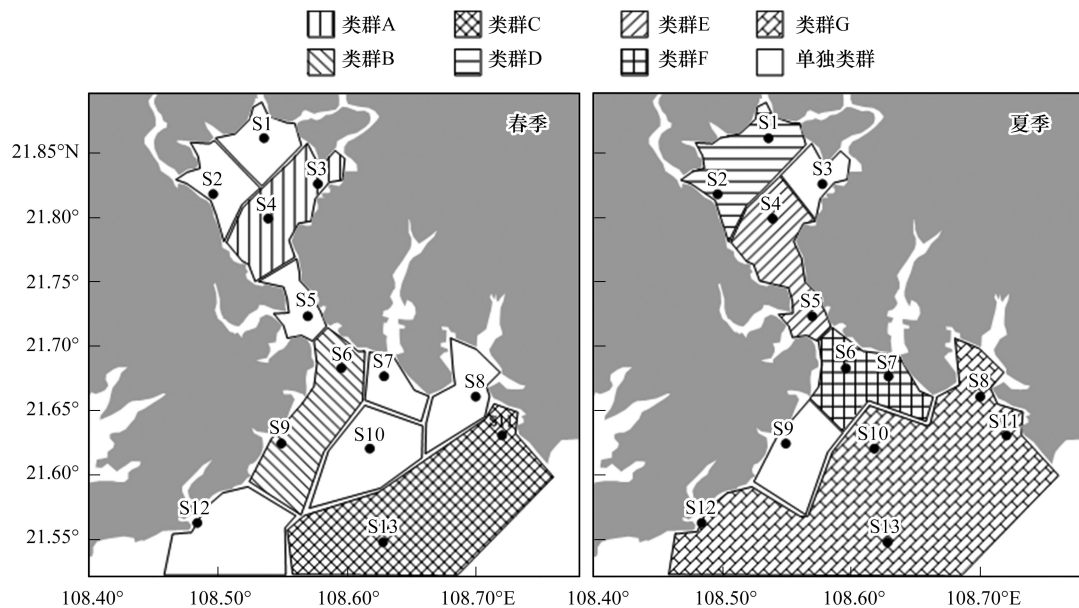


图 8 浮游植物群落类群及其分布

Fig.8 Horizontal distribution of different phytoplankton groups

S: station, 站位; 类群 A: S3, S4; 类群 B: S6, S9; 类群 C: S11, S13; 类群 D: S1, S2; 类群 E: S4, S5; 类群 F: S6, S7; 类群 G: S8, S11—S14

### 3 讨论

#### 3.1 浮游植物的群落结构特征及季节变化

春、夏季浮游植物种类组成都以硅藻为主,其次为甲藻,其他门类仅占极少数,这与历年的研究结果相一致<sup>[10-11,13,23-24]</sup>。钦州湾浮游植物群落受茅岭江、茅岭江和北部湾水团等多个水体的影响,具有明显季节性差异。河口地区受入海径流影响强烈,环境因子与径流大小都具有明显的季节性变化<sup>[25]</sup>。春季,入海径流较小,钦州湾海域受湾北部湾水团影响明显,浮游植物群落中暖温带广布类群占主要地位,几乎分布于整个钦州湾海域;其次是适盐较低的暖温带近岸类群,温热带大洋类群此时则呈现“丰度高,种类多”的特点,且都主要分布于钦州湾湾口(图 4),淡水类群丰度则较少。到了夏季,随着入海径流的增大,降雨的增多,整个钦州湾海域盐度显著下降,此时暖温带近岸类群上升到了主导地位,其次才是广布类群,淡水类群则在种类和丰度上皆有显著提升。

春、夏两季的优势种更替明显,11 个优势种中仅有 3 个共有优势种。其中布氏双尾藻和中华盒形藻都是暖温带广布种,由于适温适盐都比较宽,具有较宽的生态位<sup>[19]</sup>,使其在温盐都有显著差异(表 1)的两个季节都占有优势地位。菱形藻主要由淡水种和底栖种构成<sup>[26]</sup>,入海径流带来大量上游沉积物的同时带来了大量菱形藻,使其在两个季节占主要优势(主要是茅尾海内)。此外,夏季钦州湾浮游植物丰度显著高于春季(表 3),这可能与夏季水温回升,河流带来大量营养盐,引起浮游植物大量繁殖有关<sup>[27]</sup>。S10 号站位的辐射圆筛藻丰度占到浮游植物总丰度的 72.1%,导致了该站位多样性指数最低,两个季节的多样性指数总体呈现湾口高于茅尾海的趋势,这与湾口暖水种和大洋种更为丰富有关(图 5)<sup>[28]</sup>。

#### 3.2 浮游植物与环境因子的关系

盐度、透明度、溶解氧、pH 和叶绿素 a 等环境因子在钦州湾基本呈现由湾顶往湾口逐渐升高的分布趋势,与悬浮物、营养盐和化学需氧量相反,这符合大多数河口和海湾的研究结果<sup>[29-30]</sup>。浮游植物生长需要光合作用,水体真光层光照强度与悬浮物浓度呈显著负相关<sup>[31]</sup>,因此茅尾海等悬浮物较高海域浮游植物丰度反而低

(图4),图6中悬浮物和叶绿素a呈现明显的负相关的结果与此也相一致。CCA分析表明,影响春季主要优势种分布的主要环境因子是悬浮物、pH、盐度和营养盐。其中,组I类群是暖温带广布种和大洋种<sup>[19-20,32]</sup>,主要分布于钦州湾湾口,因此在图中与pH和盐度呈较好的正相关(图6);组II的菱形藻和舟形藻主要是淡水种和底栖种,趋于分布离河口更近的茅尾海,加上茅尾海本身与外湾连通的湾颈比较窄,水交换能力不强<sup>[33]</sup>,因此在排序图中与悬浮物、营养盐和化学需氧量呈较好正相关(图6)。

夏季主要优势种的蒙特卡罗检验不显著,这可能淡水种在湾顶大量存在使主要优势种丰度变化特征与环境因子梯度不一致有关。春季主要优势种分布于湾口,优势种丰度的分布特征与盐度、溶解氧和pH等环境因子呈较好正相关,与营养盐、悬浮物和化学需氧量等环境因子呈较好负相关,因此蒙特卡罗检验显著。夏季河流将大量菱形藻、针杆藻和舟形藻等淡水种带入湾顶,优势种丰度数据呈现湾顶湾口两头高,中间低的分布特征,与呈现明显梯度的环境因子无法契合,所以排序结果不可信。

### 3.3 浮游植物群落的空间异质性

空间异质性是学者们在生态学领域最感兴趣的研究热点之一,不仅在陆地生态系统,在河口生态系统当中也是普遍存在的现象<sup>[34-35]</sup>。钦州湾属于典型的河口型海湾,浮游植物群落受入海径流影响强烈。河口水域影响浮游生物分布的最主要环境因子是盐度<sup>[36]</sup>,尤其是夏季,整个茅尾海和湾颈都受到淡水的冲击,水文环境更为单一,更易聚为相似性浮游植物类群(图8,夏季)。钦州湾外湾受外海水团作用明显,夏季受西南风影响,北部湾水团流经广西近岸海域<sup>[37]</sup>,带来南海的大洋类群,此时出现了范围最大的相似性类群(类群G),两种水团的共同作用客观上造成了浮游植物群落内、外湾之间较大的差异,这种差异与历年的研究结果相一致<sup>[10-12]</sup>。春季,茅尾受外来水团以及外湾受入海径流的影响都十分有限,从而为浮游植物的生长提供了不同的生境,浮游植物群落相对于夏季更难聚为相似性类群,呈离散型分布(图8,春季)。

近年来随着人类更加剧烈的活动干扰,茅尾海(湾顶)近30年无机氮浓度持续升高<sup>[38]</sup>,氮磷比例严重失衡(远远高于16:1,表1),使得该海域不适合大多数浮游植物生存,浮游植物丰度偏低,群落结构也更加单一。高密度的牡蛎养殖和不合理的网箱养殖,对水质和沉积物造成了持续污染<sup>[2-3]</sup>,加上茅尾海是通过狭窄的湾颈与外湾相连,水体交换缓慢,自净能力有限,茅尾海水质和浮游植物群落特征与外湾形成明显差异。

### 参考文献(References):

- [1] 劳燕玲. 滨海湿地生态安全评价研究——以钦州湾为例[D]. 武汉: 中国地质大学, 2013.
- [2] 赵鹏, 张荣灿, 覃仙玲, 蓝文陆, 陈波, 胡宝清, 徐轶肖. 北部湾钦州港近江牡蛎重金属污染分析. 水产学报, 2017, 41(5): 806-815.
- [3] 蓝文陆. 近20年广西钦州湾有机污染状况变化特征及生态影响. 生态学报, 2011, 31(20): 5970-5976.
- [4] Li H Z, Zhai M G, Zhang L C, Zhou T Z, Yang Z J, He J G, Liang J, Zhou L Y. The distribution and composition characteristics of siliceous rocks from Qinzhou Bay-Hangzhou Bay joint belt, South China: constraint on the tectonic evolution of plates in South China. The Scientific World Journal, 2014, 2014: 949603.
- [5] 吴祥庆, 黎小正, 杨姝丽, 吴明媛. 广西钦州湾近江牡蛎体有机氯农药和多氯联苯的残留水平与分布. 海洋科学, 2010, 34(4): 49-52.
- [6] 陈作志, 蔡文贵, 徐姗楠, 黄梓荣, 邱永松. 广西北部湾近岸生态系统风险评价. 应用生态学报, 2011, 22(11): 2977-2986.
- [7] 徐姗楠, 陈作志, 于杰, 李纯厚. 水产种质资源保护区的生态系统服务价值评估——以北部湾为例. 生态学杂志, 2012, 31(11): 2900-2906.
- [8] Xu E G B, Leung K M Y, Morton B, Lee J H W. An integrated environmental risk assessment and management framework for enhancing the sustainability of marine protected areas: the cape d'Aguilar Marine Reserve case study in Hong Kong. Science of the Total Environment, 2015, 505: 269-281.
- [9] Racault M F, Platt T, Sathyendranath S, Ağırbaş E, Vicente V M, Brewin R. Plankton indicators and ocean observing systems: support to the marine ecosystem state assessment. Journal of Plankton Research, 2014, 36(3): 621-629.
- [10] 蓝文陆, 李天深, 郑新庆, 施晓峰, 黎明民, 陆建军, 李波. 枯水期钦州湾浮游植物群落结构组成与分布特征. 海洋学报, 2014, 36(8): 122-129.
- [11] 蓝文陆, 王晓辉, 黎明民. 应用光合色素研究广西钦州湾丰水期浮游植物群落结构. 生态学报, 2011, 31(13): 3601-3608.
- [12] 蓝文陆, 黎明民, 李天深. 基于光合色素的钦州湾平水期浮游植物群落结构研究. 生态学报, 2013, 33(20): 6595-6603.

- [13] 王迪, 陈丕茂, 逯晶晶, 马媛. 钦州湾浮游植物周年生态特征. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1686-1692.
- [14] 国家海洋局. GB/T 17378.4—2007 海洋监测规范 第4部分: 海水分析. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [15] 国家海洋局. GB/T 17378.7—2007 海洋监测规范 第7部分: 近海污染生态调查和生物监测. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO™. London: Cambridge University Press, 2003: 1-280.
- [17] 江志兵, 朱旭宇, 高瑜, 廖一波, 寿鹿, 曾江宁, 黄伟. 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素. 生态学报, 2013, 33(11): 3340-3350.
- [18] 尹健强, 黄晖, 黄良民, 林永水, 李开枝, 炼健生. 雷州半岛灯楼角珊瑚礁海区的浮游植物. 海洋通报, 2006, 25(2): 8-14.
- [19] 龚玉艳, 张才学, 孙省利. 湛江湾角毛藻群落的时空分布及其影响因素. 生态学杂志, 2011, 30(9): 2026-2033.
- [20] 杜虹, 王亮根, 曹会彬, 陈伟洲. 汕头港浮游植物组成特征及其与环境的关系. 生态学杂志, 2011, 30(8): 1757-1765.
- [21] 冯洁娉. 广州海域浮游植物群落结构的变化规律及其影响因素[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
- [22] 姜发军, 陈波, 何碧娟, 许铭本, 庄军莲, 张荣灿, 雷富. 广西钦州湾浮游植物群落结构特征. 广西科学, 2012, 19(3): 268-275.
- [23] 徐姗楠, 林华剑, 戴明, 肖雅元, 陈作志. 广西近岸海域浮游植物群落的生态特征. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2733-2739.
- [24] Gu Y H, Lin Q, Yu Z L, Wang X N, Ke C L, Ning J J. Speciation and risk of heavy metals in sediments and human health implications of heavy metals in edible nekton in Beibu Gulf, China: A case study of Qinzhou Bay. Marine Pollution Bulletin, 2015, 101(2): 852-859.
- [25] Zhu Z, Qu P P, Fu F X, Tennenbaum N, Tatters A O, Hutchins D A. Understanding the blob bloom: Warming increases toxicity and abundance of the harmful bloom diatom *Pseudo-nitzschia* in California coastal waters. Harmful Algae, 2017, 67: 36-43.
- [26] Paul A J, Bach L T, Schulz K G, Boxhammer T, Czerny J, Achterberg E P, Hellemann D, Trense Y, Nausch M, Sswat M, Riebesell U. Effect of elevated CO<sub>2</sub> on organic matter pools and fluxes in a summer Baltic Sea plankton community. Biogeosciences, 2015, 12(20): 6181-6203.
- [27] Wang Y B, Zhang W J, Lin Y S, Cao W Q, Zheng L M, Yang J. Phosphorus, Nitrogen and chlorophyll-a are significant factors controlling ciliate communities in summer in the northern Beibu Gulf, South China Sea. PLoS One, 2014, 9(7): e101121.
- [28] Shi Z, Xu J, Huang X P, Zhang X, Jiang Z J, Ye F, Liang X M. Relationship between nutrients and plankton biomass in the turbidity maximum zone of the Pearl River Estuary. Journal of Environmental Sciences, 2017, 57: 72-84.
- [29] 刘雅丽, 高磊, 朱礼鑫, 王腾, 宋淑贞, 李道季. 长江口及邻近海域营养盐的季节变化特征. 海洋环境科学, 2017, 36(2): 243-248.
- [30] 张伟, 孙健, 聂红涛, 姜国强, 陶建华. 珠江口及毗邻海域营养盐对浮游植物生长的影响. 生态学报, 2015, 35(12): 4034-4044.
- [31] Borkman D G, Smayda T J. Coincident patterns of waste water suspended solids reduction, water transparency increase and chlorophyll decline in Narragansett Bay. Marine Pollution Bulletin, 2016, 107(1): 161-169.
- [32] 郑白雯. 北部湾北部浮游生物生态学研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2014.
- [33] 张坤, 娄安刚, 孟云, 孙岳. 钦州湾海域纳潮量和水交换能力的数值模拟研究. 海洋环境科学, 2014, 33(4): 585-591.
- [34] Pinel-Alloul B, Ghadouani A. Spatial heterogeneity of planktonic microorganisms in aquatic systems//Franklin R B, Mills A L, eds. The Spatial Distribution of Microbes in the Environment. Dordrecht: Springer, 2007: 203-310.
- [35] 陈悦, 刘晶晶, 高月鑫, 寿鹿, 廖一波, 黄伟, 江志兵. 三门湾网采浮游植物季节变化及影响因素. 海洋与湖沼, 2017, 48(1): 101-112.
- [36] Carstensen J, Klais R, Cloern J E. phytoplankton blooms in estuarine and coastal waters: Seasonal patterns and key species. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, 162: 98-109.
- [37] Wang L N, Pan W R, Zhuang W, Yan X H, Klemas V V. Analysis of seasonal characteristics of water exchange in Beibu Gulf based on a particle tracking model. Regional Studies in Marine Science, 2018, 18: 35-43.
- [38] 徐敏, 韩保新, 龙颖贤. 钦州湾海域氮磷营养盐近30年变化规律及其来源分析. 环境工程技术学报, 2012, 2(3): 253-258.