

北部湾北部浮游植物群落结构及其与营养盐的关系

王符菁^{1,2}, 林元烧^{1,2}, 曹文清^{1,2}, 张文静^{1,2}, 郑连明^{1,2}, 杨位迪^{1,2}, 王宇杰^{1,2}

1. 厦门大学海洋与地球学院, 厦门大学, 福建 厦门 361005;
2. 海洋生物多样性与全球变化实验室, 厦门大学, 福建 厦门 361005

摘要: 根据 2011 年 4 月和 8 月北部湾北部(北部湾 20°N 以北的海域)的调查数据, 北部湾北部春夏两季共鉴定出浮游植物 312 种, 隶属于 4 门 78 属, 硅藻是主要优势类群。春季优势种为细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)和尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*); 夏季优势种仅为海链藻(*Thalassiosira* sp.)。浮游植物群落在春季可划分为 2 个子群落(spr1 和 spr2), 在夏季可划分为 3 个子群落(sum1、sum2 和 sum3)。该海域 N/P 比值一直处于高的水平, 绝大部分的水域表现为磷限制, 这可能是硅藻大量生长所造成的。春季 spr2 群落优势种的柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)与除铵盐之外的营养盐具显著相关关系, 奇异棍形藻与环境因子无相关关系。夏季 sum3 群落优势种的奇异棍形藻与磷酸盐具显著相关关系。分析表明, 琼州海峡过道水为北部湾北部输送了磷酸盐, 而硅酸盐则主要由陆地径流输入。

关键词: 北部湾北部; 浮游植物; 营养盐; 群落结构

中图分类号: P735.531; P762.33 文献标识码: A 文章编号: 1009-5470(2015)06-0073-13

The relationship between nutrients and phytoplankton community structure in northern Beibu Gulf

WANG Fu-jing^{1,2}, LIN Yuan-shao^{1,2}, CAO Wen-qing^{1,2}, ZHANG Wen-jing^{1,2}, ZHENG Lian-ming^{1,2}, YANG Wei-di^{1,2}, WANG Yu-jie^{1,2}

1. College of Ocean and Earth Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China;
2. Laboratory of Marine Biodiversity and Global Change (MBiGC), Xiamen University, Xiamen 361005, China

Abstract: Phytoplankton community and nutrient concentration in the northern Beibu Gulf in April and August 2011 were investigated. In this research, 312 phytoplankton taxa were identified, which belonged to four phyla and 78 genera, with Bacillariophyta being the main group. The dominant species were *Thalassiosira subtilis*, *Leptocylindrus danicus*, *Bacillaria paradoxa*, and *Pseudonitzschia pungens* in spring, and *Thalassiosira* sp. in summer. Phytoplankton community in northern Beibu Gulf could be divided into two natural groups in spring (spr1 & spr2) and three in summer (sum1, sum2 & sum3). N/P ratio was in a relatively high level in the study area, and most of the waters were phosphorus limited which resulted from diatom blossom. *Chaetoceros debilis* was the dominant species of group spr1 and had significant correlation with nutrient in spring, except for ammonium. *Bacillaria paradoxa* was the dominant species of group sum3 and had significant correlation with phosphate in summer, but, it was uncorrelated with any environmental factors as the dominant species of group spr2 in spring. Phosphate was transported to northern Beibu Gulf through the Qiongzhou Strait corridor water, and silicate was input by land runoff.

Key words: northern Beibu Gulf; phytoplankton; nutrient; community structure

收稿日期: 2014-11-18; 修订日期: 2015-05-08。殷波编辑

基金项目: 海洋公益性行业科研专项项目(201005012)

作者简介: 王符菁(1990~), 女, 海南省临高县人, 硕士研究生, 主要从事海洋浮游生物生理生态学研究。E-mail: wangfj_xmu@stu.xmu.edu.cn

通信作者: 林元烧, 教授。E-mail: yslin@xmu.edu.cn

海洋浮游植物是海洋生态系统中的初级生产者,种类多、分布广,是构成海洋生态系统食物网的基础环节,其种群变动和群落结构直接影响海洋生态系统的结构和功能,在海洋生态系统的物质循环和能量转化过程中起重要作用。浮游植物的群落结构变化可以作为水质营养状况评价的指标(Reynolds, 1996),其时空变化特征与水文、营养盐等环境因子关系密切,生态系统中浮游植物群落结构对环境因子的改变有直接的响应,因此,浮游植物群落结构特征在一定程度上反映了海洋生态环境状况(Suikkanen et al, 2007)。

北部湾位于南海西北部,为半封闭浅水海湾,位于亚洲季风区域内,冬季多东北风,夏季多西南风,春、秋季风向多变(苏纪兰等, 2005)。北部湾由三大水系组成,分别为越南沿岸、广西沿岸江河入海的径流与海水混合而成的沿岸水、南海暖流余脉的外海水,以及分布在雷州半岛东、西部的北部湾次高盐水系的琼州海峡过道水(陈波, 1986; 林元烧等, 2008)。北部湾海域浮游植物的生态学研究大部分主要集中于浮游植物的种类组成和数量分布(高东阳等, 2001; 杨青等, 2008; 刘国强等, 2008; 孙军等, 2011),探讨北部湾浮游植物与营养盐的关系相对较少(姜发军等, 2012、2013)。北部湾北部海域浮游植物的数量远高于南部海域,数量密集中心一般在北部近岸水域;北部海域三面环陆,水交换较差,其近岸海域是我国重要的工农业及养殖区域,营养盐丰富,易引起北部海域营养盐富集;南部海域因远离大陆,水域开阔,周围较少营养盐补充(高东阳等, 2001)。本研究选取北部湾 20°N 以北的海域作为研究区域,根据 2011 年春季和夏季在北部湾北部采集的浮游植物,通过分析春季和夏季浮游植物的群落结构变化及其与营养盐的关系,结合北部湾的水文特征,从浮游植物的角度来探讨水团变化,达到推断研究海域营养盐的输入主要来源的目的。

1 材料与方法

1.1 调查站位及样品采集

本文资料来自海湾项目 2011 年春季(4月 20~26 日)、夏季(8月 5~15 日)于北部湾北部(20°N~21°30'N, 108°E~110°E)21 个站位进行的两个航次对浮游植物、温盐以及营养盐的调查结果。调查站位示意图如图 1。

浮游植物样品采集和处理方法均按照《海洋生物生态调查技术规程》(国家海洋局“908”专项办公室,

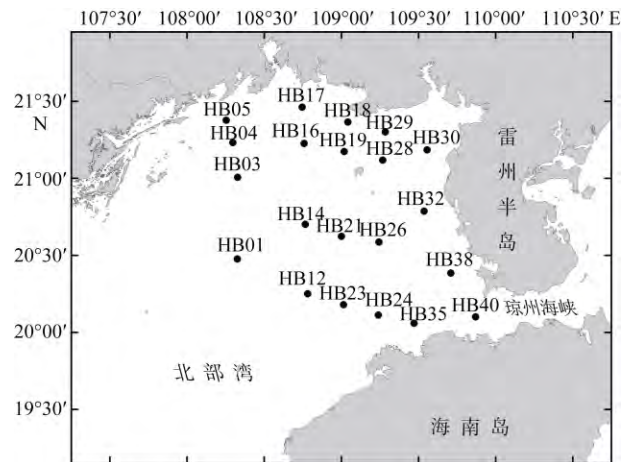


图 1 2011 年北部湾北部调查站位示意图

Fig. 1 Sampling stations in northern Beibu Gulf in 2011

2006)。根据调查站位的水深,采用小型浮游生物网(网口内径 37cm,网长 280cm,网目孔径 0.077mm;水深大于 30m 时)或浅水型网(网口内径 37cm,网长 140cm,网目孔径 0.077mm;水深小于 30m 时)由底层至表层垂直拖取,所获样品采用 5% 中性福尔马林溶液固定,并经过静置浓缩后镜检计数。同步获得表层温度、盐度和营养盐环境因子参数(由海湾项目办公室提供)。

1.2 数据分析方法

浮游植物优势种的优势度公式如下:

$$Y = \frac{n_i}{N} \times f_i \quad (1)$$

式中, n_i 为第 i 种浮游植物的丰度; f_i 为该种在各站位的出现频率; N 为该海域所有浮游植物丰度的总和。以 $Y \geq 0.02$ 为优势种划分标准(沈国英等, 2010)。

群落划分以聚类分析法为主,典型对应分析(canonical correspondence analysis, CCA)为辅。物种数据矩阵的筛选需要满足两个条件: 1) 该物种至少在 3 个站位出现; 2) 该物种的相对丰度在至少一个站位中大于 1%(Ng et al, 2003)。物种数据筛选完之后,进行 $\log(X+1)$ 转换,根据 Bray-Curtis 相似性指数构建相似矩阵,在此基础上通过组平均法(group average)对站位进行聚类分析(cluster)。应用单因子设计(One-Way ANOSIM)对聚类结果产生的组群进行差异性检验(Souissi et al, 2001)。应用 CCA 排序分析将物种和环境进行排序分析。

浮游植物群落结构与营养盐的关系是以分析群落特征种的方法进行分析,其中群落特征种的选取包括指示种分析法和优势种分析法。指示种分析法(indicator species analysis, ISA)(Dufrêne et al, 1997)可检测不同群落内的特征种是否具有指示群落和水

团分布的作用, 其公式如下:

$$IV_{ij} = A_{ij} \times B_{ij} \times 100 \quad (2)$$

$$A_{ij} = N_{ind_{ij}} / N_{ind_i} \quad (3)$$

$$B_{ij} = N_{site_{ij}} / N_{site_j} \quad (4)$$

其中, IV_{ij} 是指示种的指示值(单位: %); A_{ij} 是物种 i 在组群 j 的平均丰度与该物种在所有组群的平均丰度之和的比; B_{ij} 是物种 i 在组群 j 的相对出现频率; $N_{ind_{ij}}$ 为物种 i 在组群 j 的平均丰度; N_{ind_i} 为物种 i 在所有组群的平均丰度之和; $N_{site_{ij}}$ 为组群 j 中出现物种 i 的站位数; N_{site_j} 为 j 组群中所有的站位数。取 $IV_{ij} \geq 25\%$ 且该物种的 IV 值在 j 组群至少是其他组群中 IV 值 5 倍的种类作为组群 j 的最佳指示种(Keister et al, 2003)。指示种分析法将物种在每个组群可能出现或不出现的相对丰度纳入考虑, 并且能够很好的检测出在调查区中的稀少种类的显著差异, 此方法还可应用于非正态分布的数据(Mouillot et al, 2002)。

利用 spearman 等级相关分析法检验浮游植物丰度和种类数与环境因子的相关关系。浮游植物与环境因子之间关系的分析中采用表层环境因子。浮游植物丰度和营养盐浓度的分布图采用 Surfer 8 软件绘制, 聚类分析采用 PRIMER 5.0 软件, CCA 排序分析采用 CANOCO 5 软件。

2 结果与分析

2.1 浮游植物种类组成及时空分布

北部湾北部浮游植物春夏两个季节共采集到 312 种(含变种和变型), 隶属于 4 个门 78 属, 其中硅藻门(Bacillariophyta)54 属, 225 种, 占总种数的

71.88%; 甲藻门(Pyrrophyta)20 属, 83 种, 占总种数的 26.52%; 金藻门(Chrysophyta)和蓝藻门(Cyanophyta)分别为 2 属, 2 种。其中, 硅藻以角毛藻属(*Chaetoceros*)为最优势类群, 共 46 种, 占总种数的 14.70%, 占硅藻总数的 20.44%; 甲藻以角藻属(*Ceratium*)为优势类群, 共 28 种。调查期间, 春季浮游植物共 197 种, 硅藻 144 种, 占春季总种数 73.10%, 甲藻 48 种, 占春季总种数 24.37%; 夏季浮游植物共调查 273 种, 硅藻 197 种, 占夏季总种数 72.16%, 甲藻 71 种, 占夏季总种数 26.01%。

春季, 浮游植物细胞丰度的变化范围在 $(18.00 \sim 5643.42) \times 10^4$ 个 $\cdot m^{-3}$, 平均丰度为 $(981.86 \pm 1317.24) \times 10^4$ 个 $\cdot m^{-3}$, 调查区呈由东向西递减的变化趋势。高值区位于雷州半岛西侧海域, 最高值出现于 HB32 站位, 为 5643.42×10^4 个 $\cdot m^{-3}$, 其中, 丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)在此处大量聚集, 成为春季的优势种之一。低值区出现在调查区的西北角, 最低值出现在调查区西北角的 HB04 站位, 为 18.00×10^4 个 $\cdot m^{-3}$ 。夏季, 浮游植物细胞丰度的变化范围在 $(105.72 \sim 270842.65) \times 10^4$ 个 $\cdot m^{-3}$, 平均丰度为 $(23952.48 \pm 60424.01) \times 10^4$ 个 $\cdot m^{-3}$ 。夏季浮游植物细胞丰度的分布较不均衡, 高值区在调查区东北角, 最高值出现在 HB29 站位, 为 270842.65×10^4 个 $\cdot m^{-3}$, 海链藻(*Thalassiosira* sp.)在此处大量爆发, 丰度达到 262500.00×10^4 个 $\cdot m^{-3}$, 使得该种类在夏季成为唯一的优势种, 其他区域其细胞数量较少甚至没有出现。南部海域形成大范围的低值区, 最低值出现在 HB03 站位, 为 105.72×10^4 个 $\cdot m^{-3}$ (图 2)。

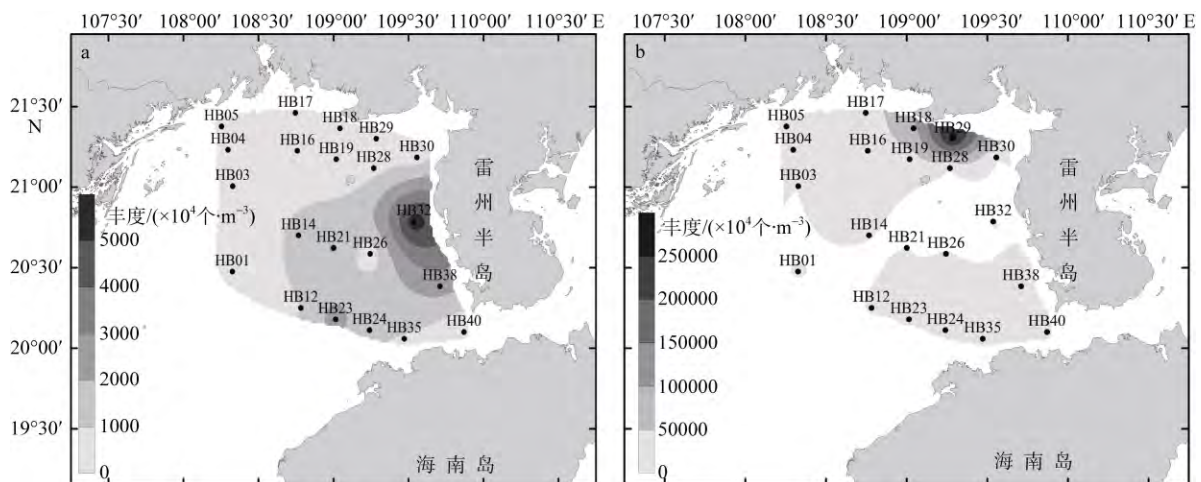


图 2 2011 年北部湾北部春季(a)和夏季(b)网采浮游植物细胞丰度分布图

Fig. 2 Horizontal distribution of net phytoplankton cell abundance in northern Beibu Gulf in spring (a) and summer (b) of 2011

用 spearman 等级相关分析对两季浮游植物的种类数和丰度与环境变量进行相关性检验, 结果表明, 春季的种类数和丰度均与环境因子不具有相关关系。夏季的总丰度和硅藻丰度均与温度和盐度具有

极显著的相关关系, 甲藻丰度分布仅受硝酸盐影响, 总种类数与甲藻种类数均与磷酸盐具有不同程度的相关关系, 甲藻种类数还与氮磷比具有相关关系, 硅藻种类数仅与硅酸盐相关(表 1)。

表 1 夏季北部湾北部网采浮游植物细胞丰度和种类数与表层环境因子的相关性分析

Tab. 1 Spearman rank correlation of net phytoplankton cell abundance, species number and surface environmental factors in northern Beibu Gulf

| | <i>T</i> | <i>S</i> | NO_3^- | PO_4^{3-} | SiO_3^{2-} | N/P |
|---|----------|----------|-----------------|--------------------|---------------------|--------|
| 总丰度/($\times 10^4$ 个· m^{-3}) | 0.592** | -0.695** | | | | |
| 总种类数 | | | | -0.484* | | |
| 硅藻丰度/($\times 10^4$ 个· m^{-3}) | 0.599** | -0.684** | | | | |
| 硅藻种类数 | | | | | -0.459* | |
| 甲藻丰度/($\times 10^4$ 个· m^{-3}) | | | -0.457* | | | |
| 甲藻种类数 | | | | -0.703** | | 0.471* |

注: *T* 表示温度; *S* 表示盐度; **表示关系极显著($p < 0.01$); *表示关系显著($p < 0.05$)。由于春季浮游植物的丰度和种类数均与表层环境因子不具相关关系, 因此未列出春季结果

春季和夏季的优势种均为硅藻。细弱海链藻(*Thalassiosira subtilis*)作为春季的第一优势种, 主要分布于调查区的中南部海域, 其细胞丰度介于(0~2246.67) $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 平均丰度为 401.95 $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 占春季浮游植物总丰度的 40.94%; 丹麦细柱藻主要分布在雷州半岛西侧海域, 其细胞丰度介于(0~5500.00) $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 平均丰度为 289.19 $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 占春季浮游植物总丰度的 29.45%; 奇异棍形藻(*Bacillaria paradoxa*)在琼州海峡入湾口和广西沿岸有高值区分布, 其细胞丰度介于(0~334.55) $\times 10^4$ 个· m^{-3} ,

平均丰度为 43.63 $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 占春季总丰度的 4.44%; 尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)高值区分布于调查区西北角, 细胞丰度介于(0.08~275.00) $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 平均丰度为 22.99 $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 占春季总丰度的 2.34%。夏季优势种仅为海链藻, 其细胞丰度为(0~262500.00) $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 平均丰度为 22525.37 $\times 10^4$ 个· m^{-3} , 占夏季总丰度的 94.04%。春季的优势种细弱海链藻、丹麦细柱藻、奇异棍形藻、尖刺拟菱形藻也均在夏季出现, 但并未成为夏季的优势种(表 2)。

表 2 北部湾北部 2011 年春季和夏季的优势种组成

Tab. 2 Dominant phytoplankton species composition in northern Beibu Gulf in spring and summer of 2011

| 优势种 | 春季 | | | | 夏季 | | | |
|--|----------|--|----------|-------|----------|--|----------|-------|
| | <i>Y</i> | \bar{N} ($\times 10^4$ 个· m^{-3}) | <i>f</i> | % | <i>Y</i> | \bar{N} ($\times 10^4$ 个· m^{-3}) | <i>f</i> | % |
| 细弱海链藻(<i>Thalassiosira subtilis</i>) | 0.351 | 401.95 | 0.86 | 40.94 | — | — | — | — |
| 丹麦细柱藻(<i>Leptocylindrus danicus</i>) | 0.224 | 289.19 | 0.76 | 29.45 | — | — | — | — |
| 奇异棍形藻(<i>Bacillaria paradoxa</i>) | 0.042 | 43.63 | 0.95 | 4.44 | — | — | — | — |
| 尖刺拟菱形藻(<i>Pseudonitzschia pungens</i>) | 0.023 | 22.99 | 1.00 | 2.34 | — | — | — | — |
| 海链藻 (<i>Thalassiosira</i> sp.) | — | — | — | — | 0.582 | 22525.37 | 0.62 | 94.04 |

注: *Y* 表示优势度; *N* 表示优势种的平均细胞丰度; *f* 表示优势种在调查海区的出现频率; % 表示优势种占本季节浮游植物总丰度的百分比; —表示该种在本季节未成为优势种

2.2 群落划分

将北部湾北部春夏两季的浮游植物物种筛选之后进行聚类分析, 以相似性系数 22 将春季浮游植物划分成 2 个组群, 以相似性系数 40 将夏季浮游植物划分成 3 个组群(图 3)。应用 One-Way ANOSIM 对组群进行差异性检验, 得到 $r > 0.5$ (春季 $r = 0.64$, 夏季 $r = 0.771$) 且显著性水平 $p < 0.01$, 表明浮游植物组群之间的差异极显著。

将浮游植物物种矩阵和环境矩阵进行 CCA 排序分析(图 4), 结果表明 spr1 组群与温度具正相关关系, 与氮盐和磷酸盐具负相关关系, spr2 组群排序分散; sum3 组群与磷酸盐和亚硝酸盐具正相关关系; sum1 组群与温度和硅酸盐具正相关关系, 与盐度具负相关关系; sum2 组群的站位分布在第二、三象限, 大部分站位与盐度具正相关关系。结合 CCA 排序分析及实际站位地理分布(图 1)的情况, 对聚类结果进

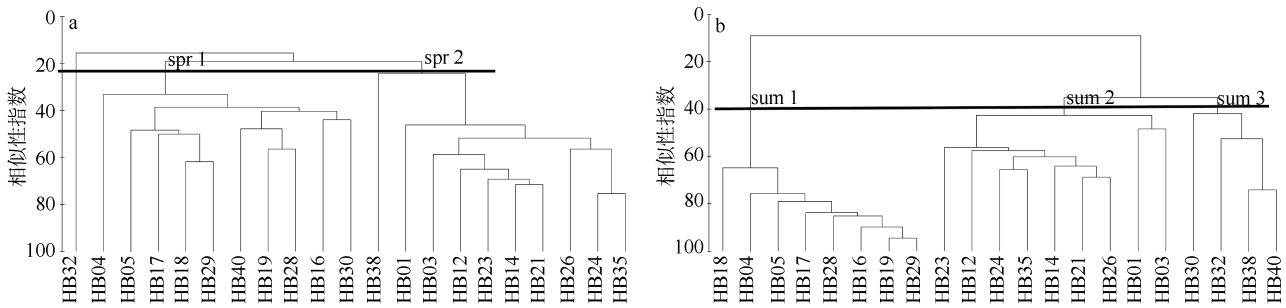


图3 北部湾北部春季(a)和夏季(b)站位聚类结果图

spr1 和 spr2 表示春季划分的 2 个组群; sum1、sum2 和 sum3 表示夏季划分的 3 个组群

Fig. 3 Diagram of cluster analysis based on sampling sites in northern Beibu Gulf in spring (a) and summer (b) of 2011

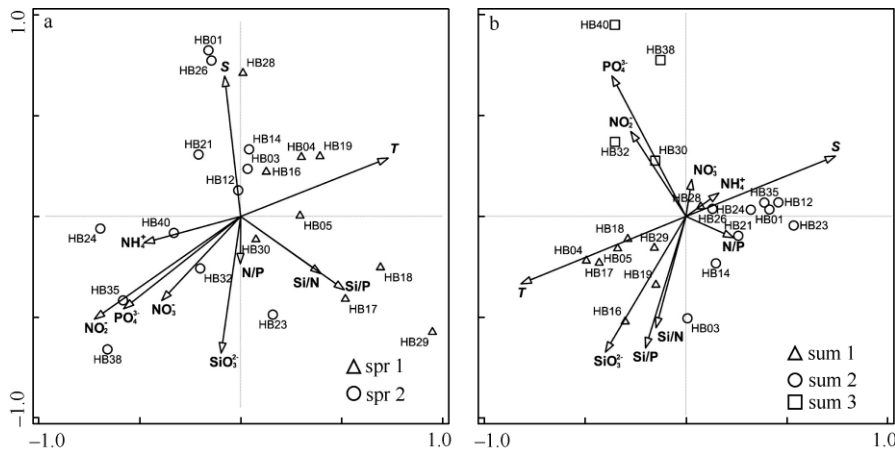


图4 2011 年北部湾北部春季(a)和夏季(b)站位-环境 CCA 排序图

Fig. 4 Ordination diagram of CCA based on sampling sites and environmental variables in northern Beibu Gulf in spring (a) and summer (b) of 2011

行矫正, 春季 CCA 排序结果表明, HB32、HB24、HB35、HB38、HB40 站位分布于第三象限, 与营养盐具正相关关系, 这些站位实际分布在雷州半岛和琼州海峡的西侧海域, 因此, 将聚类单独分组的 HB32 和划分到 spr1 组群的 HB40 划入 spr2 组群。

综合上述分析结果: 春季, 北部湾北部浮游植物群落划分 spr1 和 spr2 两个子群落: spr1 群落分布在广西沿岸海域, 受到广西沿岸江河入海的径流与海水混合而成的沿岸水影响, 主要由变异辐杆藻 (*Bacteriastrum varians*)、丹麦细柱藻、奇异棍形藻、夜光藻 (*Noctiluca scintillans*)、尖刺拟菱形藻等广温沿岸种组成; spr2 群落分布于调查区的南部海域, 东南角受琼州海峡过道水的影响, 其他区域受到南海海水影响, 主要由细弱海链藻、丹麦细柱藻、柔弱角毛藻 (*Chaetoceros debilis*)、奇异棍形藻等广温种组成。

夏季, 北部湾北部浮游植物群落划分为 sum1、sum2 和 sum3 三个子群落: sum1 群落分布于广西沿岸海域, 受沿岸水影响, 优势种仅为海链藻。sum2 群落分布于调查区的西南部海域, 受到南海海水

的影响, 生物组成包括束毛藻 (*Trichodesmium* sp.) 和中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*), 广温广盐种类如伏氏海毛藻 (*Thalassiothrix frauenfeldii*)、菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*)、柔弱拟菱形藻 (*Pseudonitzschia delicatissima*) 等, 以及尖刺拟菱形藻和多数角毛藻属的沿岸种类。sum3 群落分布于雷州半岛西侧海域, 受到琼州海峡过道水影响, 主要由广温广盐种类如中肋骨条藻和奇异棍形藻, 以及丹麦细柱藻、日本星杆藻 (*Asterionella japonica*)、尖刺拟菱形藻和多数角毛藻属的广温近岸种组成。

2.3 环境特征

北部湾北部表层温度春季比夏季低, 分布由西向东递减, 夏季表现为由北向南递减 (图 5)。表层盐度春季略高于夏季, 分布由西向东递减, 夏季分布由南向北递减 (图 6)。表层亚硝酸盐春季分布由东南向西北递减, 高值区在琼州海峡入湾口, 夏季分布由东向西递减。表层硝酸盐春季高值区分布于海南岛西北部近岸海域, 夏季高值区在调查区中心海域。表层铵盐浓度春季的差异相对较小, 高值区在

调查区东南角, 夏季主要在雷州半岛西北部近岸海域和海南岛西北部近岸海域表现为高浓度。表层磷酸盐春季在琼州海峡入湾口浓度较高, 夏季浓度自

东向西递减。表层硅酸盐春季主要在琼州海峡入湾口具高值区, 夏季的分布基本表现为西侧海域高于东侧海域, 呈西北向东南递减的分布特征(图7和表3)。

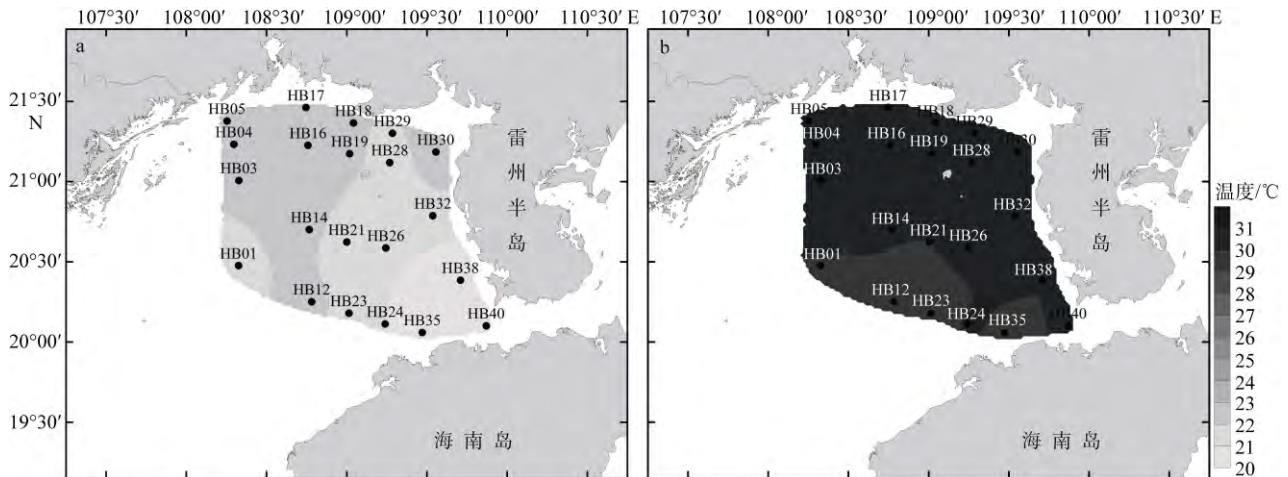


图5 2011年北部湾北部表层春季(a)和夏季(b)温度分布图

Fig. 5 Horizontal distribution of surface temperature in northern Beibu Gulf in spring (a) and summer (b) of 2011

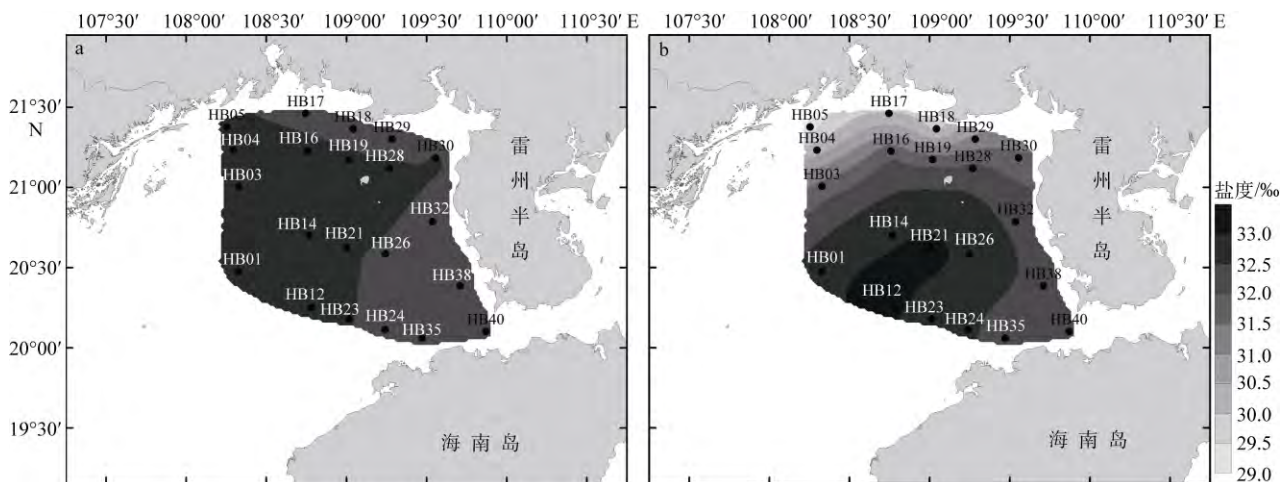


图6 2011年北部湾北部表层春季(a)和夏季(b)盐度分布图

Fig. 6 Horizontal distribution of surface salinity in northern Beibu Gulf in spring (a) and summer (b) of 2011

浮游植物对环境中的营养盐利用有一个特定的比例和浓度极限, 海水中的营养盐结构对浮游植物的生长至关重要(沈志良, 2002; 宋秀贤等, 2013)。绝对限制法从浮游植物生长的最低阈值来考虑营养盐和溶解氧(DIN)对浮游植物生长的影响, 海水中若有一种元素低于阈值($c_{Si}=2\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $c_{DIN}=1\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; $c_P=0.1\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$), 判定该元素为唯一的限制因子(Justić et al, 1995)。相对限制法从营养盐结构的角来判定浮游植物生长的限制因子, Justić等(1995)提出了营养盐化学计量限制标准: 若 $\text{Si}:\text{P}>22$, $\text{DIN}:\text{P}>22$, 则磷酸盐为限制因子; 若 $\text{DIN}:\text{P}<10$, $\text{Si}:\text{DIN}>1$, 则溶解无机氮为限制因子; 若 $\text{Si}:\text{P}<10$, $\text{Si}:\text{DIN}>1$, 则硅酸盐为限制

因子。营养盐限制的判断法则遵循绝对限制法则和相对限制法则, 本研究将同时满足绝对营养限制法则和相对营养限制法则作为判定标准, 结果表明(表4), 调查区春季与夏季绝大部分区域都表现为磷限制, 局部海域表现为硅限制, 绝大部分的优势类群为硅藻, 在调查区西南角和海南西北侧海域则以蓝藻为优势类群。

2.4 浮游植物群落特征种组成

特征种的识别在生态学和生物地理学上是十分重要的, 通常在描述一个调查区域的时候, 总会采用一个或几个物种来描述这个调查区域的特征(Dufrène et al, 1997)。有些浮游植物因其特殊的生态习性可作为海流和水团的指示种, 如异常角毛藻

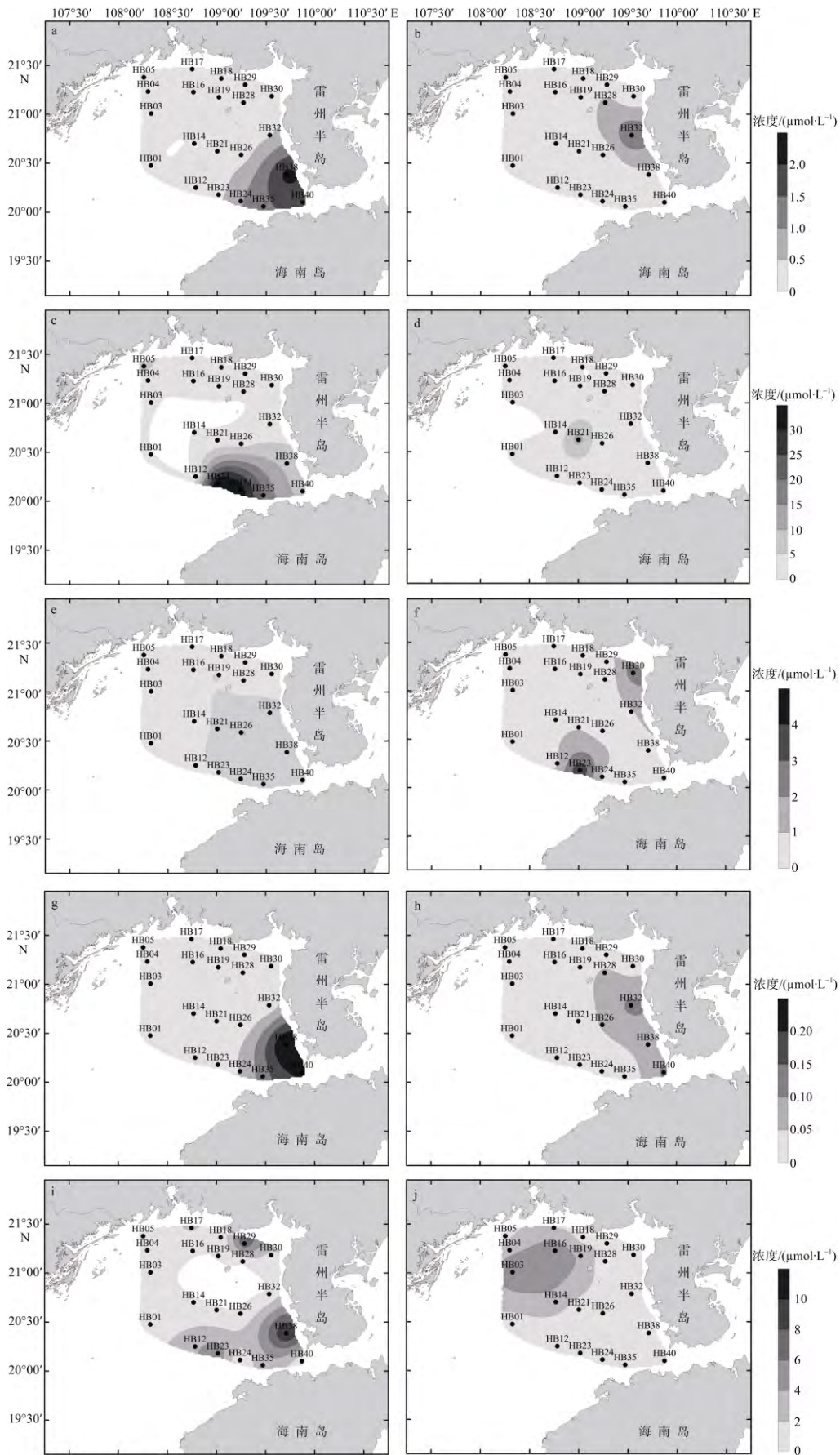


图 7 2011 年北部湾北部表层春季和夏季营养盐浓度分布图

a. 春季 NO_2^- ; b. 夏季 NO_2^- ; c. 春季 NO_3^- ; d. 夏季 NO_3^- ; e. 春季 NH_4^+ ; f. 夏季 NH_4^+ ; g. 春季 PO_4^{3-} ; h. 夏季 PO_4^{3-} ; i. 春季 SiO_3^{2-} ; j. 夏季 SiO_3^{2-}

Fig. 7 Horizontal distribution of surface nutrients in northern Beibu Gulf in spring and summer of 2011

表 3 北部湾北部春夏季表层环境因子的变化范围和平均值

Tab. 3 The range of variation and average value of surface environmental factors in northern Beibu Gulf in spring and summer of 2011

| 环境因子 | 春季 | | 夏季 | |
|--|---------------|---------------|---------------|---------------|
| | 变化范围 | 平均值 | 变化范围 | 平均值 |
| 温度/°C | 20.0~22.6 | 21.8±0.7 | 29.0~31.0 | 30.4±0.5 |
| 盐度/‰ | 32.1~32.9 | 32.5±0.2 | 29.3~33.1 | 31.9±1.1 |
| $c_{(\text{NO}_2^-)}$ /($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) | ND~2.19 | 0.38±0.62 | 0.03~1.53 | 0.21±0.34 |
| $c_{(\text{NO}_3^-)}$ /($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) | 0.10~37.88 | 5.94±10.82 | ND~12.52 | 1.26±2.80 |
| $c_{(\text{NH}_4^+)}$ /($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) | 0.42~2.09 | 1.01±0.37 | 0.27~4.00 | 0.91±0.85 |
| $c_{(\text{PO}_4^{3-})}$ /($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) | ND~0.27 | 0.04±0.07 | ND~0.11 | 0.03±0.03 |
| $c_{(\text{SiO}_4^{2-})}$ /($\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) | ND~10.68 | 1.84±2.89 | ND~5.70 | 1.70±1.69 |
| N : P | 36.43~1573.56 | 279.77±368.31 | 11.24~1358.33 | 153.26±291.72 |
| Si : N | 0.01~4.56 | 0.73±1.20 | 0.06~15.64 | 2.02±3.50 |
| Si : P | 1.07~780.69 | 100.72±182.43 | 3.12~570.31 | 121.94±165.32 |

注: ND 表示低于检出限

表 4 2011 年北部湾北部春季和夏季营养盐限制因子和优势类群

Tab. 4 The limiting factors of nutrients and dominant groups in northern Beibu Gulf in spring and summer of 2011

| 站位 | 春季 | | 夏季 | |
|------|------|-------------|------|-------------|
| | 限制因子 | 优势类群(丰度百分比) | 限制因子 | 优势类群(丰度百分比) |
| HB01 | 磷 | 硅藻(88.3%) | 磷 | 束毛藻(81.4%) |
| HB03 | 磷 | 硅藻(98.2%) | 磷 | 束毛藻(62.6%) |
| HB04 | 磷 | 甲藻(72.4%) | 磷 | 硅藻(99.8%) |
| HB05 | 磷 | 硅藻(50.1%) | 磷 | 硅藻(99.8%) |
| HB12 | 磷 | 硅藻(99.5%) | 磷 | 硅藻(88.1%) |
| HB14 | 磷 | 硅藻(99.2%) | 磷 | 硅藻(80.5%) |
| HB16 | 磷 | 硅藻(91.9%) | 磷 | 硅藻(99.9%) |
| HB17 | 磷 | 硅藻(86.1%) | 磷 | 硅藻(99.5%) |
| HB18 | 磷 | 硅藻(85.2%) | 磷 | 硅藻(99.9%) |
| HB19 | 硅 | 硅藻(50.2%) | 磷 | 硅藻(99.8%) |
| HB21 | 磷 | 硅藻(99.2%) | 磷 | 硅藻(76.1%) |
| HB23 | 磷 | 硅藻(99.4%) | 磷 | 束毛藻(61.0%) |
| HB24 | 磷、硅 | 硅藻(99.1%) | 磷 | 硅藻(85.1%) |
| HB26 | 磷 | 硅藻(94.6%) | — | 硅藻(86.2%) |
| HB28 | 磷 | 硅藻(68.7%) | — | 硅藻(98.8%) |
| HB29 | 磷 | 硅藻(63.1%) | 磷 | 硅藻(99.9%) |
| HB30 | 磷 | 硅藻(88.7%) | 硅 | 硅藻(96.3%) |
| HB32 | 磷 | 硅藻(99.1%) | — | 硅藻(97.4%) |
| HB35 | — | 硅藻(98.5%) | 磷 | 硅藻(74.8%) |
| HB38 | — | 硅藻(99.5%) | 硅 | 硅藻(99.9%) |
| HB40 | 硅 | 硅藻(58.6%) | 硅 | 硅藻(99.7%) |

注: —表示该站位没有限制因子。

(*Chaetoceros abnormis*)可以适应盐度的剧烈变化,能够用来做半咸水的指示种(郑重等, 1984); 菱软几内亚藻(*Guinardia flaccida*)属南温带近岸性种类,常在暖海中出现,可作为暖流的指标种(吴玉霖等, 2004),指示种分析法可检测不同群落内的特征种是否有指示群落和水团分布的作用(Dufrène et al, 1997)。优势种是群落中数量和生物量所占比例最多的一个或几个物种,也是反映群落特征的种类(沈国英等, 2010)。浮游植物群落的形成可能是某些海流和水团作用的结果,可能是某个数量非常庞大的种

类几乎占据整个群落。

以物种-环境 CCA 排序分析指示种和优势种与环境因子,以 spearman 等级相关法来检验其相关性,通过分析群落的指示种和优势种与营养盐的关系,尽量达到能够筛选出能够推测营养盐输入的种类。指示种取每个季节 IV 值最高的前十位种类,优势种取每个季节每个群落中 $Y > 0.02$ 的种类,和环境因子进行 CCA 排序分析,并以 spearman 等级相关法验证指示种和优势种与环境因子的相关性。

结果表明(图 8、表 5): 春季, spr1 群落的变异幅

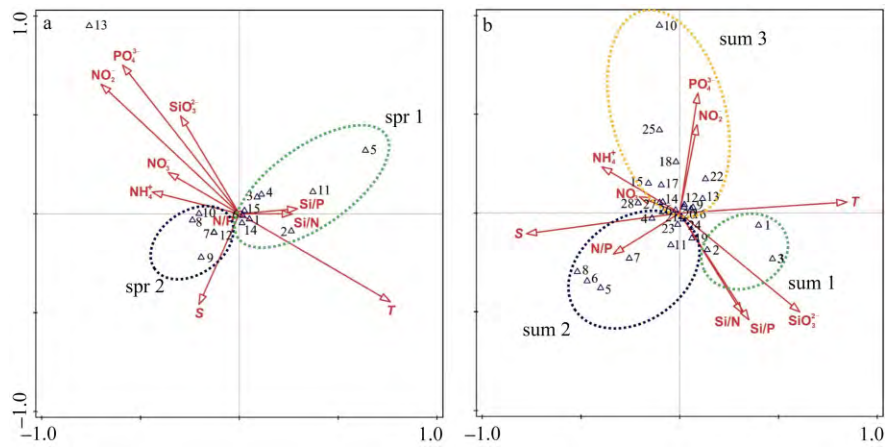


图 8 2011 年春季(a)、夏季(b)北部湾北部物种-环境 CCA 排序图

a. 1、夜光藻; 2、翼根管藻; 3、梭角藻; 4、叉状角藻; 5、螺端根管藻; 6、尖刺拟菱形藻; 7、细弱海链藻; 8、中华盒形藻; 9、洛氏菱形藻密条变种; 10、哈氏半盘藻; 11、变异辐杆藻; 12、丹麦细柱藻; 13、柔弱角毛藻

b. 1、海链藻; 2、透明根管藻; 3、群生舟形藻; 4、远距离角毛藻; 5、翼根管藻纤细变型; 6、二齿双管藻; 7、双凹梯形藻; 8、霍氏半管藻; 9、中心圆筛藻; 10、长菱形藻弯端变种; 11、束毛藻; 12、中肋骨条藻; 13、环纹劳德藻; 14、丹麦细柱藻; 15、小细柱藻; 16、窄隙角毛藻; 17、旋链角毛藻; 18、柔弱角毛藻; 19、洛氏角毛藻; 20、拟弯角毛藻; 21、角毛藻; 22、日本星杆藻; 23、伏氏海毛藻; 24、菱形海线藻; 25、奇异棍形藻; 26、厚刺根管藻; 27、尖刺拟菱形藻; 28、柔弱拟菱形藻

Fig. 8 Ordination diagram of CCA based on species and environmental variables in northern Beibu Gulf in 2011

表 5 浮游植物特征种丰度与表层水体环境因子的相关性分析

Tab. 5 Spearman rank correlation of phytoplankton characteristic species abundance and surface environmental factors

| 季节 | 种类 | T | S | NO ₂ ⁻ | NO ₃ ⁻ | NH ₄ ⁺ | PO ₄ ³⁻ | SiO ₃ ²⁻ | Si/N | Si/P |
|--------------------------------------|--|----------|----------|------------------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|----------|----------|
| 春季 | 变异辐杆藻 (<i>Bacteriastrium varians</i>) | 0.496* | | | | | | | | |
| | 梭角藻(<i>Ceratium fusus</i>) | | -0.515* | | | | | | | |
| | 柔弱角毛藻(<i>Chaetoceros debilis</i>) | -0.581** | | 0.654** | 0.591** | | 0.765** | 0.447* | | |
| | 尖刺拟菱形藻 (<i>Pseudonitzschia pungens</i>) | | -0.438* | | | | | | | |
| | 翼根管藻(<i>Rhizosolenia alata</i>) | 0.534* | | -0.476* | | -0.598** | -0.487* | | | 0.464* |
| | 螺端根管藻(<i>Rhizosolenia cochlea</i>) | 0.519* | | | | | | | | |
| 夏季 | 二齿双管藻(<i>Amphisolenia bidentata</i>) | -0.525* | 0.583** | | | | | | | |
| | 日本星杆藻(<i>Asterionella japonica</i>) | | -0.472* | | | | | | | |
| | 奇异棍形藻(<i>Bacillaria paradoxa</i>) | | | | | | 0.518* | | -0.503* | -0.644** |
| | 旋链角毛藻(<i>Chaetoceros curvisetus</i>) | | | | | | | -0.543* | -0.536* | -0.475* |
| | 柔弱角毛藻(<i>Chaetoceros debilis</i>) | | | | | 0.475* | | -0.506* | -0.514* | |
| | 远距离角毛藻(<i>Chaetoceros distans</i>) | -0.445* | | | | | | -0.474* | | |
| | 拟弯角毛藻(<i>Chaetoceros pseudocurvisetus</i>) | | | | | 0.521* | | | | |
| | 双凹梯形藻 <i>Climacodium biconcavum</i> | -0.478* | 0.542* | | | | | | | |
| | 中心圆筛藻(<i>Coscinodiscus centralis</i>) | 0.563** | -0.584** | | | | | | | |
| | 霍氏半管藻(<i>Hemiaulus hauckii</i>) | -0.590** | 0.767** | | | | | | | |
| | 环纹劳德藻(<i>Lauderia annulata</i>) | | -0.483* | | | | | | | |
| | 丹麦细柱藻(<i>Leptocylindrus danicus</i>) | | | | | | | -0.517* | | |
| | 群生舟形藻(<i>Navicula gregaria</i>) | 0.750** | -0.669** | | | | | 0.683** | 0.707** | |
| | 长菱形藻弯端变种 (<i>Nitzschia longissima</i> v. <i>reversa</i>) | | | 0.441* | | | | 0.616** | -0.566** | -0.661** |
| | 柔弱拟菱形藻 (<i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i>) | | | | | | | -0.553** | -0.459* | |
| | 尖刺拟菱形藻(<i>Pseudonitzschia pungens</i>) | | | | | | | -0.690** | -0.620** | -0.587** |
| | 翼根管藻纤细变型 (<i>Rhizosolenia alata</i> f. <i>gracillima</i>) | -0.521* | 0.539* | | -0.481* | | | | | |
| 透明根管藻(<i>Rhizosolenia hyalina</i>) | 0.464* | | | | | | | -0.522* | | |
| 中肋骨条藻(<i>Skeletonema costatum</i>) | | | | | | | 0.505* | -0.478* | -0.602** | |
| 海链藻(<i>Thalassiosira</i> sp.) | 0.710** | -0.708** | | | | | 0.554** | 0.496* | | |
| 束毛藻(<i>Trichodesmium</i> sp.) | | | | -0.440* | | | | | | |

注: **表示关系极显著(p<0.01), *表示关系显著(p<0.05), 表中仅列出具有相关关系的结果。

杆藻、翼根管藻(*Rhizosolenia alata*)和螺旋根管藻(*Rhizosolenia cochlea*)与温度具正相关关系; spr2 群落的种类基本位于第三象限, 唯独柔弱角毛藻(*Chaetoceros debilis*)单独在第二象限, 与营养盐具有不同程度的相关关系, 原因是柔弱角毛藻的大部分细胞丰度都分布于琼州海峡西侧海域, 与春季站位-环境的结果是相似的(图 4)。夏季, sum1 群落的海链藻和群生舟形藻(*Navicula gregaria*)位于第四象限, 均与温度和硅酸盐具极显著的正相关关系, 与盐度具负相关关系; sum2 群落的种类主要位于第三象限, 受盐度和温度影响, 霍氏半管藻(*Hemiaulus hauckii*)、二齿双管藻(*Amphisolenia bidentata*)和翼根管藻纤细变型(*Rhizosolenia alata* f. *gracillima*)均与盐度呈正相关, 与温度呈负相关; sum3 群落的种类主要受磷酸盐影响, 长菱形藻弯端变种(*Nitzschia longissima* v. *reversa*)和奇异棍形藻均与磷酸盐具正相关关系。物种-环境的结果还表明柔弱角毛藻也受到磷酸盐影响, 但通过 spearman 等级分析验证其与磷酸盐并无显著的相关性。铵盐和硝酸盐对春季和夏季的大部分种类影响较弱。

结合物种-环境排序分析和 spearman 等级相关的验证(图 8、表 5), 柔弱角毛藻是春季最受到营养盐影响的, 夏季也与铵盐、硅酸盐和硅氮比具不同程度的相关性, 在一定程度上也受到磷酸盐的影响。此外, 柔弱角毛藻在两个季节均成为调查区南部海域成为优势种。而奇异棍形藻在春夏两季的一些子群落中成为优势种, 且于夏季受到磷酸盐的影响。因此, 将柔弱角毛藻和奇异棍形藻作为主要的特征种进行分析, 并辅以部分在春季或夏季与单个营养盐因子最相关种类的分析。

柔弱角毛藻春季于琼州海峡入湾口呈小范围的梯度分布, 夏季高值区转移至海南岛西北侧海域(图 9), 春季与之具相关性的亚硝酸盐、磷酸盐和硅酸盐均在琼州海峡入湾口形成不同程度的高值区, 硝酸盐仅在海南岛西北部形成分布梯度, 温度则在琼州海峡入湾口形成低温区(图 5、图 7)。夏季柔弱角毛藻仅与硅酸盐具有负相关关系, 与硅氮比和硅磷比的相关性也进一步说明其分布形势与硅酸盐完全相反(图 8、图 9)。奇异棍形藻春季于广西近岸和琼州海峡入湾口均形成小范围的高值区, 夏季于雷州半

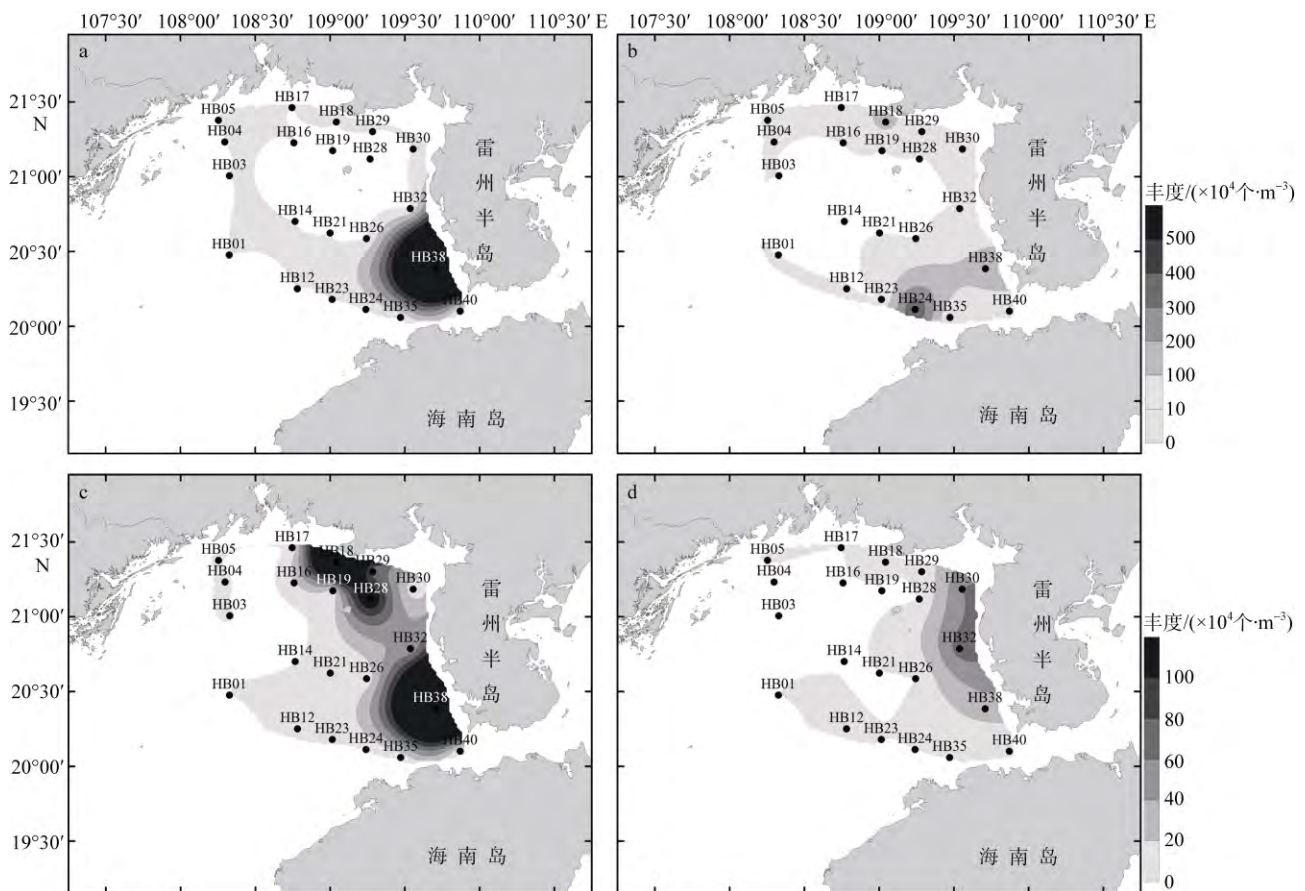


图 9 北部湾北部柔弱角毛藻(a、b)和奇异棍形藻(c、d)分布图

a、c: 春季; b、d: 夏季

Fig. 9 Horizontal distribution of *Chaetoceros debilis* and *Bacillaria paradoxa* in northern Beibu Gulf in spring (a, c) and summer (b, d) of 2011

岛西侧形成由近岸向外递减的梯度分布, 与夏季磷酸盐的分布情况是基本一致的(图 7、图 9)。

3 讨论

3.1 浮游植物组成

春季浮游植物的分布由东向西递减, 夏季浮游植物分布集中于调查区东北角(图 2)。与中国近海海洋综合调查与评价项目(“908”专项)历史同期同海域的调查相比, 春季与郑白雯(2014)报道的北部湾北部 2007 年春季浮游植物聚集于调查区东北角的结果却不尽一致, 可能是不同调查年份存在的年变化现象, 在其他调查海区也曾出现这种现象, 如凌娟等(2012)报道南海北部 2008 年夏季网采浮游植物的高值区分布于海南岛东北部海域和远离珠江口的南部海域, 马威(2012)报道 2009 年同海区同季节的高值区分布于珠江口近岸水域和海南岛南部海域。夏季与周茜茜等(2008)报道的 2006 年夏季密度较高的区域出现于调查区东北角的结果基本一致, 该区域属于我国广西北海, 是重要的养殖区域, 位于海湾的内部, 水交换条件较差, 营养盐容易富集。

春季的优势种均为广温性种类, 与“908”历史同期调查(林元烧等, 2009)的优势种以广温性种类为主的细弱海链藻、菱形海线藻、佛氏海毛藻等的调查结果是一致的。夏季, 海链藻成为调查区唯一的优势种, 集中分布于调查区的东北角。夏季束毛藻在海南岛西北部近岸海域和调查区西南角均有较高的丰度分布, 并成为该区域的优势种(表 4), 这与杨青等(2008)在调查北部湾 2006 年夏季束毛藻在海南岛西北部近岸水域呈斑状分布的现象部分一致。

3.2 影响浮游植物群落结构的环境因子

春季浮游植物丰度和种类数不受任意单一环境因子影响, 夏季浮游植物总丰度和硅藻丰度均受到温度和盐度的显著影响, 其中海链藻的爆发是产生这一影响的可能原因。营养盐浓度的改变会导致浮游植物群落结构的演替, 营养盐丰富的海域, 硅藻占据绝对优势, 但在 P 或 Si 不足的海域, 甲藻受到的影响较少易成为优势(Egge, 1998; Shen, 2001), 夏季甲藻丰度与硝酸盐负相关关系和甲藻种类数与磷酸盐极显著的负相关关系反面说明了这一点(表 1)。氮磷比随硅藻的生长而升高, 随着甲藻的生长而迅速下降(李京, 2008), 调查区域 N:P 值一直处于比较高的水平(N:P>16/1), 这是硅藻大量生长, 成为绝对优势类群的结果。春季琼州海峡输入的粤西沿岸流被抑制在琼州海峡入湾口附近(孙振宇等,

2009), 夏季由于西南季风的作用, 加剧了海南岛西侧近岸南海高盐水的自南向北的侵入(陈照章等, 2009), 夏季浮游植物群落结构受到低温次高盐高磷酸盐的影响(图 4), 并被北部湾夏季的逆时针环流(庄敏芝等, 1981)带到雷州半岛西侧沿岸海域, 与高温低盐的广西沿海江河径流交汇形成 sum3 群落。

3.3 浮游植物群落分布格局的可能原因

春季, 北部湾受季风影响时间较短, 沿岸的河川径流量全年最小, 水体运输偏向西北方向(苏纪兰等, 2005; 张国荣等, 2009), 使沿岸的陆地径流输入调查区的营养盐较少。由于琼州海峡终年的西向流, 南海北部沿岸流随着琼州海峡进入北部湾北部, 被抑制在入湾口, 并未进一步向湾内伸入, 春季入湾口的低温低盐区说明了这一点(图 5、图 6)。春季在入湾口形成优势种的柔弱角毛藻和与其具相关关系的磷酸盐的分布情况与温盐十分相似(图 5、图 7、图 9), 入湾口另一优势种奇异棍形藻也在该处形成小范围的高值区(图 9), 另外春季仅入湾口未形成磷限制。琼州海峡的输入是北部湾磷酸盐的来源之一(陈丁等, 2013), 因此, 北部湾北部春季的磷酸盐可认为主要是由携带南海沿岸流的琼州海峡过道水补充的。另外, 结果发现磷酸盐影响柔弱角毛藻时还伴随着亚硝酸盐对该种类的影响, 亚硝酸盐也在入湾口形成高值区(图 7), 可能是琼州海峡过道水还携带了小部分的亚硝酸盐输入北部湾北部。

夏季珠江冲淡水携带大量的营养盐, 一部分沿着粤西沿岸向西扩展, 不断与陆架高盐水混合, 海流将琼州海峡东面接纳珠江冲淡水含较高浓度活性磷酸盐的南海表层水带入北部湾。另外, 7 月份作用最强烈的琼东上升流低温高盐高营养盐的表层水通过琼州海峡, 两股水交汇成琼州海峡过道水进入北部湾(杨士瑛等, 2003、2006; 杨阳等, 2010; 谢玲玲等, 2012; 陈丁等, 2013), 夏季温盐的分布趋势也说明了这一点(图 5、图 6)。与此同时, 由于夏季盛行西南风, 北部湾沿岸江河入海的径流量剧增(苏纪兰等, 2005), 并且流入湾内形成沿岸水与琼州海峡过道水交汇于雷州半岛西侧海域, 使得营养盐大量输入调查区。作为夏季 sum3 群落的优势种之一, 奇异棍形藻在雷州半岛西侧形成一个十分明显的分布梯度(图 9), 值得注意的是, 磷酸盐的高值分布正是位于形成 sum3 群落的雷州半岛西侧海域(图 7)。sum3 群落的另一优势种柔弱角毛藻密集中心由春季的入湾口转移至海南岛西北侧海域, 夏季温度的变化和 sum3 群落第一优势种肋骨条藻的兴起导致了转移现象(图 9), 原因是角毛藻生长的最适

温度为30℃,当营养盐充足时,角毛藻竞争优势劣于中肋骨条藻(徐宁等,2001;韦桂峰,2003)。此外,最受夏季磷酸盐影响的长菱形藻弯端变种密集中心也分布于雷州半岛西侧。因此,北部湾北部磷酸盐输入可认为是琼州海峡过道水和陆源径流的作用。

陆地径流输入是海洋中硅酸盐的主要来源,对其浓度及分布有重要调控作用(郑敏芳等,2013)。春季和夏季硅酸盐的分布梯度基本与盐度相反(图6和图7),说明陆源径流是北部湾北部硅酸盐的主要输入来源。春季远离广西近岸的南部海域局部和夏季琼州海峡入湾口分别发生小范围的硅限制,而夏季末毛藻分别在调查区西北角和海南岛西北侧海域取代硅藻成为优势类群(表4),另外受夏季硅酸盐影响的海链藻和群生舟形藻均在广西近岸形成密集中心,这从侧面说明南海外海水和夏季的琼州海峡过道水的硅酸盐输入作用较弱。由于季风作用,广西沿海河径流量在夏季(6~8月)达到最大,占全年的50%(李树华等,2001),陆地径流夏季的输入湾内的径流量高于春季,夏季浮游植物繁殖旺盛消耗大

量硅酸盐,因此夏季水体中的硅酸盐含量要比春季低(图7)。此外,春季在广西近岸的外延部分(HB19和HB04)分别发生小范围硅限制和甲藻成为优势类群的现象(表4),一定程度说明春季的入海径流作用较夏季弱,而硅酸盐和受其影响的柔弱角毛藻在入湾口形成高值区。因此,北部湾北部的硅酸盐主要源自于广西沿岸的陆地径流,琼州海峡过道水在春季可能也具有一定补充作用。

海南岛西北侧海域存在着硝酸盐高值区($>20\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)(图7),可能受到琼州海峡过道水和北部湾冷水团的影响,其空间分布可能还受到浮游植物的影响,浮游植物生长主要吸收溶解无机氮,但对不同形态的氮具有优先选择性吸收,当 NO_3^- 和 NH_4^+ 同时存在时,浮游植物优先利用 NH_4^+-N ,只有 NH_4^+-N 浓度小于 $0.5\sim 1\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时才利用 NO_3^- (Conway,1977),而海南岛西北侧海域恰恰是春季铵盐的高值区($>1\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)。但本次调查结果中,硝酸盐和铵盐未能显著地影响群落的优势种和指示种(图8)。

参考文献

- 陈波. 1986. 北部湾水系形成及其性质的初步探讨[J]. 广西科学院学报, 2(2): 92-95.
- 陈丁, 郑爱榕. 2013. 北部湾活性磷酸盐含量的分布特征与季节变化[G]//郑爱榕, 陈敏. 北部湾海洋科学研究论文集: 第4辑. 北京: 海洋出版社: 103-114.
- 陈照章, 胡建宇, 孙振宇, 等. 2009. 北部湾东东部海区夏季和冬季温盐平面分布特征比较[G]//李炎, 胡建宇. 北部湾海洋科学研究论文集: 第2辑. 北京: 海洋出版社: 85-91.
- 高东阳, 李纯厚, 刘广锋, 等. 2001. 北部湾海域浮游植物的种类组成与数量分布[J]. 湛江海洋大学学报, 21(3): 13-18.
- 国家海洋局 908 专项办公室. 2006. 海洋生物生态调查技术规程[M]. 北京: 海洋出版社: 27-30.
- 姜发军, 陈波, 何碧娟, 等. 2012. 2010年夏季广西北部湾沿岸浮游植物分布特征及其与环境因子的相关性[J]. 广西科学, 19(4): 377-383.
- 姜发军, 赖俊翔, 庄军莲, 等. 2013. 2010年秋季北部湾广西沿岸表层浮游植物分布特征[J]. 海洋环境科学, 32(3): 414-418.
- 李京. 2008. 东海赤潮高发区营养盐结构及对浮游植物优势种演替的作用研究[D]. 青岛: 中国海洋大学: 37-38.
- 李树华, 夏华永, 陈明健. 2001. 广西近海水文及水动力环境研究[M]. 北京: 海洋出版社: 3-4.
- 林元烧, 曹文清, 杨圣云, 等. 2008. 北部湾环境与生物研究概述及相关科学问题探讨[G]//胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集: 第1辑. 北京: 海洋出版社: 162-170.
- 林元烧. 2009. ST09 区块水体环境调查研究报告(生物与生态分册)[R]. 厦门: 厦门大学: 132.
- 凌娟, 董俊德, 张燕英, 等. 2012. 2008年夏季南海北部浮游植物群落结构特征分析[J]. 生态学杂志, 29(2): 42-46.
- 刘国强, 史海燕, 魏春雷, 等. 2008. 广西涠洲岛海域浮游植物和赤潮生物种类组成的初步研究[J]. 海洋通报, 27(3): 43-48.
- 马威. 2012. 南海北部浮游植物的生态学研究[D]. 青岛: 中国海洋大学: 33-34.
- 沈国英, 黄凌风, 郭丰, 等. 2010. 海洋生态学[M]. 3版. 北京: 科学出版社: 89-90.
- 沈志良. 2002. 胶州湾营养盐结构的长期变化及其对生态环境的影响[J]. 海洋与湖沼, 33(3): 232-331.
- 宋秀贤, 俞志明, 殷可动, 等. 2013. 香港近岸海域营养盐结构特征及其对浮游植物生长的影响[J]. 海洋与湖沼, 44(4): 846-852.
- 苏纪兰, 袁立业. 2005. 中国近海水文[M]. 北京: 海洋出版社: 285-296.
- 孙军, 李欣, 田伟. 2011. 夏季北部湾的浮游植物群落[J]. 海洋湖沼通报, 3: 1-7.
- 孙振宇, 胡建宇, 李炎, 等. 2009. 北部湾北部海区冲淡水及沿岸混合水分布的季节变化[G]//李炎, 胡建宇. 北部湾海洋科学研究论文集: 第2辑. 北京: 海洋出版社: 85-91.
- 韦桂峰, 王肇鼎, 练健生. 2003. 大亚湾大鹏澳水域春季浮游植物优势种的演替[J]. 生态学报, 23(11): 2285-2292.

- 吴玉霖, 傅月娜, 张永山, 等. 2004. 长江口海域浮游植物分布及其与径流的关系[J]. 海洋与湖沼, 35(3): 246-251.
- 谢玲玲, 张书文, 赵辉. 2012. 琼东上升流研究概述[J]. 热带海洋学报, 31(4): 35-41.
- 徐宁, 陈菊芳, 王朝晖, 等. 2001. 广东大亚湾藻类水华的动力学分析 藻类水华的生消及其与环境因子的关系[J]. 海洋环境科学, 21(4): 400-404.
- 杨青, 林元烧, 周茜茜, 等. 2008. 北部湾 2006 年夏季蓝藻的丰度与分布[G]//胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集: 第 1 辑. 北京: 海洋出版社: 186-192.
- 杨士瑛, 鲍献文, 陈长胜, 等. 2003. 夏季粤西沿岸流特征及其产生机制[J]. 海洋学报, 25(6): 1-8.
- 杨士瑛, 陈波, 李培良. 2006. 用温盐资料研究夏季南海水通过琼州海峡进入北部湾的特征[J]. 海洋湖沼通报, 1: 1-7.
- 杨阳, 孟强, 夏华永, 等. 2010. 2006 年夏季珠江冲淡水扩展及生态响应[J]. 热带海洋学报, 29(6): 15-21.
- 张国荣, 潘伟然, 兰健, 等. 2009. 北部湾北部东部和北部近海冬、春季水体输运特征[G]//李炎, 胡建宇. 北部湾海洋科学研究论文集: 第 2 辑. 北京: 海洋出版社: 127-138.
- 郑白雯. 2014. 北部湾北部浮游生物生态学[D]. 厦门: 厦门大学: 38-43.
- 郑敏芳, 吕娥, 杨伟峰, 等. 2013. 北部湾活性硅酸盐分布特征与季节变化[G]//郑爱榕, 陈敏. 北部湾海洋科学研究论文集: 第 4 辑. 北京: 海洋出版社: 115-124.
- 郑重, 李少菁, 许振祖. 1984. 海洋浮游生物学[M]. 北京: 海洋出版社: 68.
- 庄敏芝, 季林绮, 林吉胜. 1981. 南海北部的风、浪、流[Z]. 广州: 地质南海地质调查指挥部综合研究大队: 66-80.
- 周茜茜, 陈长平, 梁君荣, 等. 2008. 北部湾北部 2006 年夏季网采浮游植物种类组成与数量分布[G]//胡建宇, 杨圣云. 北部湾海洋科学研究论文集: 第 1 辑. 北京: 海洋出版社: 171-185.
- CONWAY H L. 1977. Interactions of inorganic nitrogen in the uptake and assimilation by marine phytoplankton[J]. Marine Biology, 39(3): 221-232.
- DUFRENE M, LEGENDRE P. 1997. Species assemblages and indicator species: The need for a flexible asymmetrical approach[J]. Ecological Monographs, 67(3): 345-366.
- EGGE J K. 1998. Are diatoms poor competitors at low phosphate concentrations?[J]. Journal of Marine Systems, 16: 191-198.
- JUSTIĆ D, RABALAIS N N, Turner R E, et al. 1995. Changes in nutrient structure of river-dominated coastal waters: Stoichiometric nutrient balance and its consequences[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 40: 339-356.
- KEISTER J E, PETERSON W T. 2003. Zonal and seasonal variations in zooplankton community structure off the central Oregon coast, 1998-2000[J]. Progress in Oceanography, 57(3): 341-361.
- MOUILLOT D, CULIOLI J-M, CHI T D. 2002. Indicator species analysis as a test of non-random distribution of species in the context of marine protected areas[J]. Environmental Conservation, 29: 385-390.
- NG S L, SIN F S. 2003. A diatom model for inferring sea level change in the coastal waters of Hong Kong[J]. Journal of Paleolimnology, 30: 427-440.
- REYNOLDS C S. 1996. The plant life of the pelagic[J]. Verhandlungen-Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie, 26: 97-113.
- SHEN Z L. 2001. Historical changes in nutrient structure and its influence on phytoplankton composition in Jiaozhou Bay[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 52: 211-224.
- SOUISSI S, IBANEZ F, HAMADOU R B, et al. 2001. A new multivariate mapping method for studying species assemblages and their habitats: Example using bottom trawl surveys in the Bay of Biscay (France)[J]. Sarsia, 86: 527-542.
- SUIKKANEN S, LAAMANEN M, HUTTUNEN M. 2007. Long-term changes in summer phytoplankton communities of the open northern Baltic Sea[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 71: 580-592.