

◆海洋科学◆

广西涠洲岛海域浮游植物群落结构季节变化特征及环境影响因素*

林佳¹, 林海英¹, 骆鑫², 郭梅修², 黎明民², 庞碧剑², 黄雄良², 王宙², 蓝文陆^{2**}

(1. 广西大学资源环境与材料学院, 广西南宁 530004; 2. 广西壮族自治区海洋环境监测中心站, 北部湾海洋生态环境广西野外科学观测研究站, 广西北海 536000)

摘要:为了解广西涠洲岛布氏鲸(*Balaenoptera edeni*)栖息海域浮游植物群落结构的季节变化特征及其环境影响因素,分析浮游植物群落结构季节变化与布氏鲸季节性迁徙的关系,于2022年1月(冬季)、4月(春季)、8月(夏季)和11月(秋季)对广西涠洲岛布氏鲸栖息海域的浮游植物进行系统调查。结果显示,全年共鉴定出浮游植物3门54属115种,物种组成以硅藻(93种)和甲藻(19种)为主。浮游植物种类组成季节差异不明显,但优势种更替显著,优势类群也发生较大变化,其中冬、春季以硅藻门(Bacillariophyta)为最具优势类群,优势种也均属硅藻门,而夏、秋季优势类群转变为硅藻、蓝藻和甲藻等多门类。浮游植物细胞密度也具有较大差异,春季最高,冬季次之,夏、秋季最低。浮游植物与环境因子的冗余分析(RDA)表明,营养盐、水温(WT)和盐度(S)是影响浮游植物细胞密度、优势种季节变化的主要环境因子。布氏鲸冬春季迁徙进入、夏秋季迁徙退出涠洲岛与浮游植物细胞密度季节变化吻合,作为初级生产者的浮游植物可能通过食物网的上行控制作用影响着顶级营养级海洋生物布氏鲸的迁徙。

关键词:涠洲岛;浮游植物;群落结构;季节变化;影响因素;布氏鲸

中图分类号:Q178.53 文献标识码:A 文章编号:1005-9164(2024)02-0224-13

DOI:10.13656/j.cnki.gxkx.20240419.001

浮游植物是一类种类繁多、数量庞大和分布广泛的生物,不仅对海洋生态系统至关重要,而且对整个生物圈也不可或缺。浮游植物是海洋主要的初级生产者之一,与海洋渔业资源有着密切的关系,不仅为

浮游动物等初级消费者提供饵料,而且通过食物链间接调控更高营养级别的海洋生物数量、结构乃至食物网的结构^[1,2]。浮游植物的群落结构和细胞密度在相应的环境变化时表现出明显的变化,因此浮游植物

收稿日期:2023-08-22

修回日期:2023-09-18

* 广西重点研发计划项目(AB20297018、AB22035065、AB22035035、AB20297037)和北部湾海洋生态环境广西野外科学观测研究站科研能力建设项目(桂科23-026-271)资助。

【第一作者简介】

林佳(1998—),女,在读硕士研究生,主要从事海洋生态学研究,E-mail:liya_jial@163.com。

【**通信作者简介】

蓝文陆(1980—),男,正高级工程师,主要从事海洋生态学研究,E-mail:dr.lan@139.com。

【引用本文】

林佳,林海英,骆鑫,等.广西涠洲岛海域浮游植物群落结构季节变化特征及环境影响因素[J].广西科学,2024,31(2):224-236.

LIN J, LIN H Y, LUO X, et al. Seasonal Variation Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Environmental Impact Factors in the Weizhou Island, Guangxi [J]. Guangxi Sciences, 2024, 31(2): 224-236.

群落结构可作为生态系统和水质特征的重要指标^[3,4]。浮游植物暴发性增殖或高度聚集和水体富营养化引发的有害赤潮会对生态系统产生不利影响^[5,6],对生态系统造成一系列危害,影响渔业资源,甚至会对人类健康构成威胁。因此,研究海洋浮游植物群落结构与分布及其影响因素对了解海洋生态系统的可持续发展有重要意义。

涠洲岛海域渔业资源丰富,吸引着布氏鲸(*Balaenoptera edeni*)等珍稀海洋动物前来捕食。近几年来,根据搁浅数据、渔民问卷调查和海上实地考察等资料^[7-9],研究学者将涠洲岛海域确定为我国已知近海唯一有大型须鲸常年稳定活动记录的海域,也是大型须鲸稳定的季节性栖息地。布氏鲸在秋末冬初时迁徙至涠洲岛海域,而在春末夏初时迁徙离开该海域,冬、春季是近年报道布氏鲸稳定栖息在涠洲岛的季节。冬、春季的涠洲岛也是北部湾赤潮发生的热点海域,仅在2001—2010年期间,北部湾70%的赤潮发生在涠洲岛附近海域^[10]。因此研究浮游植物的种类组成结构与数量、优势种更替等群落特征的季节变化及其主要影响因子,对认识该海域布氏鲸的栖息、迁徙活动具有重要意义。迄今为止,关于涠洲岛海域浮游植物的先前的研究仅初步分析了涠洲岛海域赤潮生物、浮游植物群落结构组成与变化特征^[10-12],对广西涠洲岛布氏鲸栖息海域浮游植物群落特征的季节变化及其环境影响因素的研究少有报道,对浮游植

物的季节变化与布氏鲸季节性迁徙关系的研究尚未有报道。因此,本研究于2022年4个季节对涠洲岛布氏鲸栖息海域的浮游植物进行系统地调查,探讨涠洲岛海域浮游植物群落特征季节变化及其与环境因子的关系,分析浮游植物群落结构季节变化与布氏鲸季节性迁徙的关系,以期为了解布氏鲸栖息地生态状况、迁徙调控关键因素等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域与采样

涠洲岛位于北部湾东北部,是广西最大的岛屿,地处亚热带和热带间的过渡带,属南亚热带季风性气候。结合历史资料及文献掌握的布氏鲸出没海域及季节,分别于2022年1月(冬季)、4月(春季)、8月(夏季)、11月(秋季)在广西涠洲岛布氏鲸经常出没的栖息海域(108.94°—109.37°E, 20.80°—21.09°N)布设15个调查站位(图1)进行生态环境调查。每个站点用浅水Ⅲ型浮游生物网进行垂直拖网,采集的浮游植物样品用体积分数为5%的福尔马林和1%的鲁哥氏碘液固定保存,带回实验室处理分析。现场测定水深、水温(WT)、盐度(S)、溶解氧(DO)和pH值,采集表层海水样品带回实验室,测定叶绿素 a (Chl- a)、硝酸盐、亚硝酸盐、铵盐、活性磷酸盐等含量。以上样品的采样、保存、运输与分析严格按照《海洋监测规范》(GB/T 17378—2007)进行。

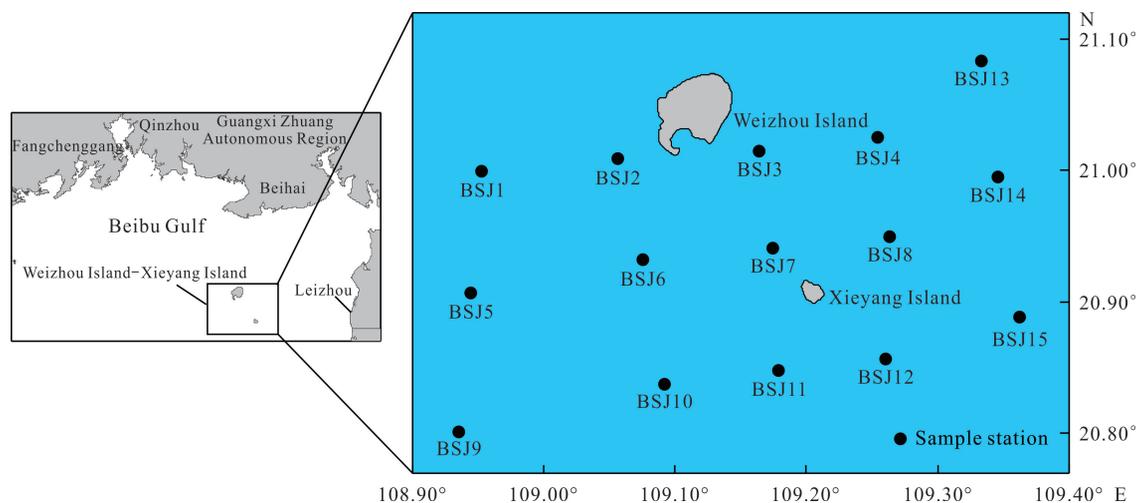


图1 调查站位的分布

Fig. 1 Distribution of survey stations

1.2 浮游植物样品处理、种类鉴定与细胞密度计算

在实验室将现场固定保存的浮游植物样品倾入沉淀器沉淀。静置48 h后利用虹吸法将上清液缓慢吸出进行浓缩,最终将浓缩样品定容至30 mL备用。

充分摇匀后取0.1 mL样品于计数框内,在光学显微镜下放大400倍观察,每个样本计数两次,每次计数100—200个视野,两次计数误差在15%以上时,重复计数样本。浮游植物的鉴定参考文献^[13,14],采用

细胞体积法计算浮游植物数量^[15]。

1.3 数据处理与分析

Y 为优势度, 用于描述物种在群落中的优势程度 ($Y \geq 0.02$ 则认定为优势种), 使用公式(1)计算。 C_j 是 Jaccard 相似性指数, 使用公式(2)计算。 R 是物种更替率, 使用公式(3)计算。

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

$$C_j = \frac{c}{a + b + c}, \quad (2)$$

$$R = \left(1 - \frac{c}{a + b - c}\right) \times 100\%, \quad (3)$$

其中, N 为样品的总细胞密度, n_i 为样品中第 i 种物种的细胞密度, f_i 为该种在各样品中的出现频率, a 、 b 分别为相邻月份的物种数; c 为相邻月份共同的物种数。

采用 Surfer 11.0 软件绘制站位、温度、盐度以及浮游植物细胞密度平面分布图。使用 CANOCO 5.0 软件进行冗余分析(RDA), 以确定环境条件对浮游植物群落组成结构的影响。为消除极值的影响, 在进

表 1 各季节理化环境参数

Table 1 Physical and chemical environmental parameters in different seasons

季节 Season	水温/℃ WT/℃	盐度 S	溶解氧/ (mg/L) DO/(mg/L)	叶绿素 a /(μ g/L) Chl- a /(μ g/L)	溶解无机氮/ (mg/L) DIN/(mg/L)	溶解无机磷/ (mg/L) DIP/(mg/L)	氮磷比 N/P
Winter	19.68±0.72	33.03±0.10	7.66±0.14	1.44±0.65	0.069±0.017	0.008±0.001	18.562±3.167
Spring	25.21±1.45	30.89±0.18	7.29±0.14	1.65±0.32	0.064±0.013	0.001±0.001	227.123±86.162
Summer	30.94±1.73	30.43±0.32	6.36±0.10	0.80±0.37	0.012±0.009	0.003±0.002	10.579±7.097
Autumn	25.52±0.30	30.34±0.27	7.04±0.09	1.11±0.40	0.020±0.014	0.005±0.001	8.693±3.375
Annual average	25.34±0.42	31.17±0.36	7.09±0.04	1.25±0.37	0.041±0.029	0.004±0.003	66.239±107.341

2.2 浮游植物种类组成及季节变化

研究海域全年 4 个季节鉴定出的浮游植物隶属于 3 门 54 属, 共 115 种。其中, 硅藻门(Bacillariophyta) 43 属 93 种, 占浮游植物总种类数的 80.9%; 甲藻门(Pyrrophyta) 9 属 19 种, 占比 16.5%; 蓝藻门(Cyanophyta) 2 属 3 种, 占比 2.6%。硅藻门以根管藻属(*Rhizosolenia*) 种类最多, 有 14 种, 其次是角毛藻属(*Chaetoceros*) 10 种, 圆筛藻属(*Coscinodiscus*) 6 种。甲藻门以角藻属(*Ceratium*) 种类最多, 有 5 种, 其次是多甲藻属(*Peridinium*) 4 种。蓝藻门以束毛藻属(*Trichodesmium*) 种类最多, 有 2 种。4 个季节均出现的种类有 34 种, 以硅藻门最多, 有 27 种; 其次是甲藻门, 有 7 种。

行统计分析之前对物种细胞密度以及水温、盐度和溶解无机氮(DIN)等数据进行 $\log(x+1)$ 转换和集中, 使其满足正态分布。使用 Origin 9.0 软件绘制柱状图。

2 结果与分析

2.1 环境条件

在调查期间水质理化指标测定结果如表 1 所示。广西涠洲岛附近海域的年均水温为 25.34℃, 冬季达到最低值, 夏季达到最高值; 而溶解氧在冬季达到最高值, 夏季达到最低值, 年均值为 7.09 mg/L。盐度在冬季达到最高值, 秋季降至最低值, 年均值为 31.17。叶绿素 a 在春季达到最高值, 夏季降至最低值, 年均值为 1.25 μ g/L。溶解无机氮在冬、春季较高, 在夏季降至最低, 年均值为 0.041 mg/L。溶解无机磷(DIP)在冬季达到最高值, 春季降至最低值, 年均值为 0.004 mg/L。各水质理化指标在冬季明显较高[除水温、叶绿素 a 和氮磷比(N/P)外], 季节间波动情况比较剧烈, 季节之间差异明显。

研究海域浮游植物各季节间种类组成存在一定的相似性, 变化不大(表 2)。冬季共鉴定出浮游植物 3 门 38 属 73 种, 春季 3 门 36 属 63 种, 夏季 3 门 42 属 82 种, 秋季 3 门 38 属 72 种。各季节间共有种数为 45—63, Jaccard 相似性指数为 0.48—0.69。其中, 以夏季和秋季的 Jaccard 相似性指数最高, 冬季和秋季的 Jaccard 相似性指数次之, 其他各季节之间相似性接近。

由图 2 可知, 4 个季节浮游植物种类均以硅藻门为主, 其次为甲藻门。夏季采集的物种总数最多, 春季采集的物种总数最少。

表 2 季节间浮游植物种类组成及 Jaccard 相似性指数

Table 2 Seasonal species composition and Jaccard similarity index of phytoplankton species

季节 Season	种类数 Species number	相同种类数 Number of the same species	Jaccard 相似性指数 Jaccard similarity index
Winter/Spring	73/63	45	0.50
Winter/Summer	73/82	51	0.49
Winter/Autumn	73/72	49	0.51
Spring/Summer	63/82	47	0.48
Spring/Autumn	63/72	45	0.50
Summer/Autumn	82/72	63	0.69

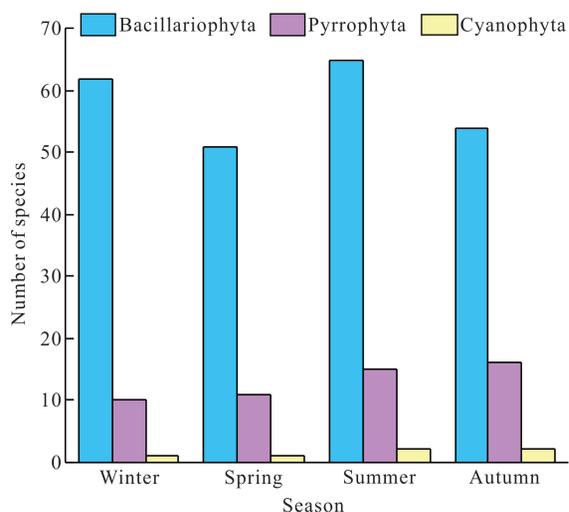


图 2 各季节浮游植物物种数量

Fig. 2 Number of phytoplankton species in different seasons

表 3 各季节浮游植物优势种细胞密度占总细胞密度的比例、出现频率及优势度

Table 3 The proportion of cell density to total cell density, occurrence frequency and dominance of dominant species of phytoplankton in different seasons

季节 Season	优势种 Dominant species	占浮游植物总细胞密度的比例/% Proportion to total cell density of the phytoplankton/%	出现频率(f_i)/% Occurrence frequency (f_i)/%	优势度(Y) Dominance (Y)
Winter	<i>Stephanopyxis palmeriana</i>	22.13	93.33	0.207
	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	12.69	100.00	0.127
	<i>Bellerochea horologicalis</i>	7.33	93.33	0.068
	<i>Rhizosolenia styliiformis</i>	6.53	93.33	0.061
	<i>Coscinodiscus oculus-iridis</i>	6.02	86.67	0.052
	<i>C. asteromphalus</i>	2.96	100.00	0.030
	<i>R. robusta</i>	2.74	100.00	0.027
	<i>C. jonesianus</i>	2.47	93.33	0.023
	<i>Bacteriastrum varians</i>	2.29	100.00	0.023
	<i>Biddulphia regia</i>	2.13	100.00	0.021
	<i>Planktoniella blanda</i>	2.82	73.33	0.021
	<i>Nitzschia lorenziana</i>	3.78	53.33	0.020

2.3 浮游植物优势种及季节变化

根据 $Y \geq 0.02$ 的种类对调查期间海域优势种进行统计(表 3), 结果显示, 冬季优势种最多, 有 12 种, 其中掌状冠盖藻 (*Stephanopyxis palmeriana*) 优势度最高 ($Y=0.207$), 细胞密度占浮游植物总细胞密度的 22.13%, 其次为菱形海线藻 (*Thalassionema nitzschioides*, $Y=0.127$)。春季优势种最少, 仅为冬季的 1/3, 有 4 种, 其中短角弯角藻 (*Eucampia zoodiacus*) 为绝对优势种 ($Y=0.597$), 细胞密度占浮游植物总细胞密度的 59.68%, 其次为奇异棍形藻 (*Bacillaria paradoxa*, $Y=0.199$)。夏季优势种有 9 种, 其中汉氏束毛藻 (*Trichodesmium hildebrandtii*) 优势度最高 ($Y=0.104$), 细胞密度占浮游植物总细胞密度的 22.26%, 其次为菱形海线藻 ($Y=0.087$)。秋季有优势种 6 种, 其中新月菱形藻 (*Nitzschia closterium*) 优势度最高 ($Y=0.201$), 细胞密度占浮游植物总细胞密度的 25.13%, 其次为红海束毛藻 (*T. erythraeum*, $Y=0.118$)。

表 4 列出了研究海域不同季节间浮游植物优势种的物种更替率 (R), 4 个季节优势种差异较大且没有 1 个相同的优势种。优势种的物种更替率为 0.83—1.00, 春季到夏季期间物种更替率最高, 为 1.00, 其他季节之间多为 0.90 左右。

续表

Continued table

季节 Season	优势种 Dominant species	占浮游植物总细胞密度的比例/% Proportion to total cell density of the phytoplankton/%	出现频率(f_i)/% Occurrence frequency (f_i)/%	优势度(Y) Dominance (Y)
Spring	<i>Eucampia zoodiacus</i>	59.68	100.00	0.597
	<i>Bacillaria paradoxa</i>	19.95	100.00	0.199
	<i>Cyclotella striata</i>	12.40	93.33	0.116
	<i>N. lorenziana</i>	3.54	100.00	0.035
Summer	<i>Trichodesmium hildebrandtii</i>	22.26	46.67	0.104
	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	8.66	100.00	0.087
	<i>Dinophysis caudata</i>	7.08	86.67	0.061
	<i>N. closterium</i>	7.55	66.67	0.050
	<i>Pleurosigma formosum</i>	3.76	73.33	0.028
	<i>N. sigma</i>	5.01	53.33	0.027
	<i>Biddulphia regia</i>	2.63	93.33	0.025
	<i>Ceratium trichoceors</i>	2.51	93.33	0.023
	<i>Bacteriastrium varians</i>	2.33	100.00	0.023
Autumn	<i>N. closterium</i>	25.13	80.00	0.201
	<i>Trichodesmium erythraeum</i>	19.59	60.00	0.118
	<i>T. hildebrandtii</i>	14.76	60.00	0.089
	<i>Thalassionema nitzschioides</i>	6.97	100.00	0.070
	<i>Cyclotella striata</i>	11.12	60.00	0.067
	<i>Lauderia annulata</i>	5.21	73.33	0.038

表4 季节间浮游植物优势物种更替率(R)

Table 4 Seasonal turnover rate (R) of dominant species of phytoplankton

季节 Season	种类数 Species number	相同种类数 Number of the same species	物种更替率(R) Seasonal turnover rate (R)
Winter/Spring	12/4	1	0.93
Winter/Summer	12/9	3	0.83
Winter/Autumn	12/6	1	0.94
Spring/Summer	4/9	0	1.00
Spring/Autumn	4/6	1	0.89
Summer/Autumn	9/6	3	0.92

2.4 浮游植物细胞密度时空分布

研究海域浮游植物细胞密度的季节变化明显(图3)。浮游植物细胞密度为 25.09—28 925.29 cells/L, 全年平均值为 2 264.90 cells/L。春季细胞密度最高, 为 256.79—28 925.29 cells/L, 平均值为 5 929.05 cells/L; 冬季次之, 为 179.27—3 548.52

cells/L, 平均值为 1 110.18 cells/L; 夏、秋季浮游植物细胞密度最低, 分别为 25.09—5 011.11 和 115.97—3 482.14 cells/L, 夏、秋季细胞密度平均值分别为 1 009.69、1 010.70 cells/L, 约为春季细胞密度平均值的 1/6。

研究海域浮游植物细胞密度的空间分布在不同季节变化明显(图3)。冬、春季涠洲岛周围海域的站位(BSJ2—BSJ4)细胞密度较大, 斜阳岛南面海域细胞密度较小。夏、秋季斜阳岛西面海域的站位细胞密度较大, 涠洲岛与斜阳岛东面海域的站位细胞密度较小, 其中, 夏、秋季浮游植物细胞密度最高值站位分别是 BSJ10、BSJ11, 分别为 5 011.11 和 3 482.14 cells/L。细胞密度最高值出现在春季的 BSJ4 站位, 其次是春季的 BSJ14 站位, 分别为 28 925.29 和 10 011.87 cells/L; 最低值出现在夏季的 BSJ12 站位, 其次是秋季的 BSJ14 站位, 分别为 25.09 和 115.97 cells/L。

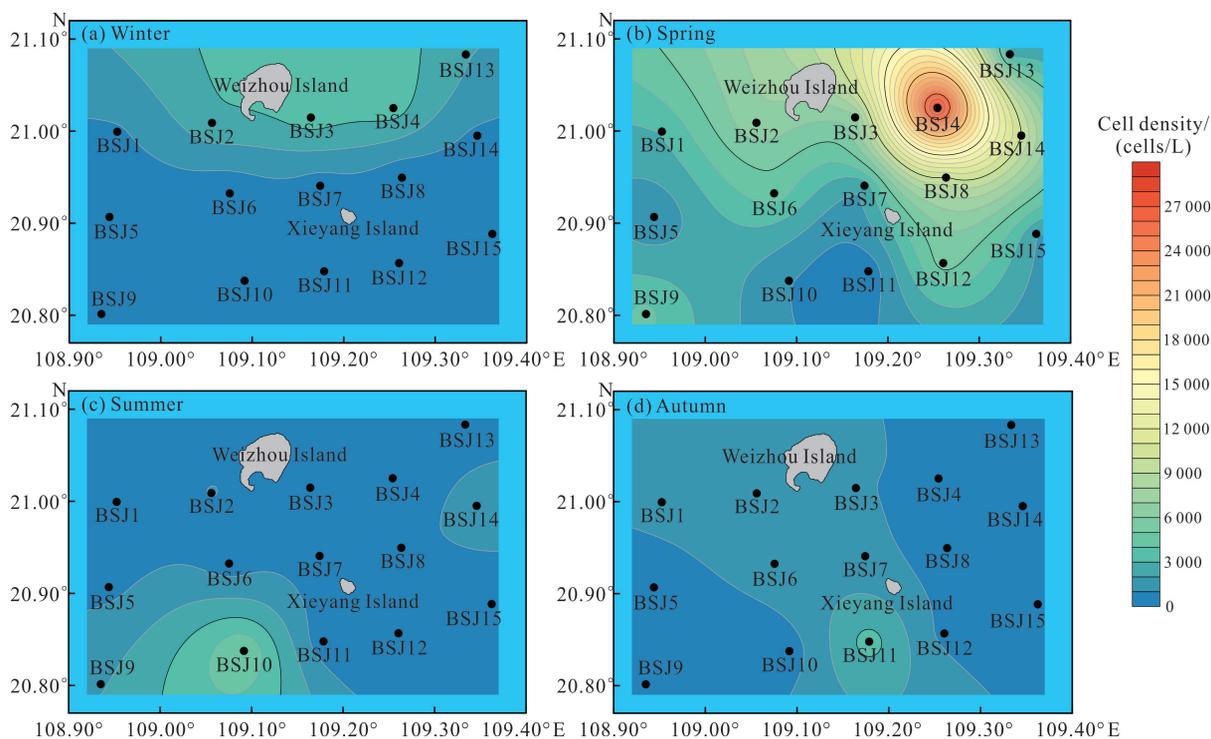


图3 浮游植物细胞密度的时空变化

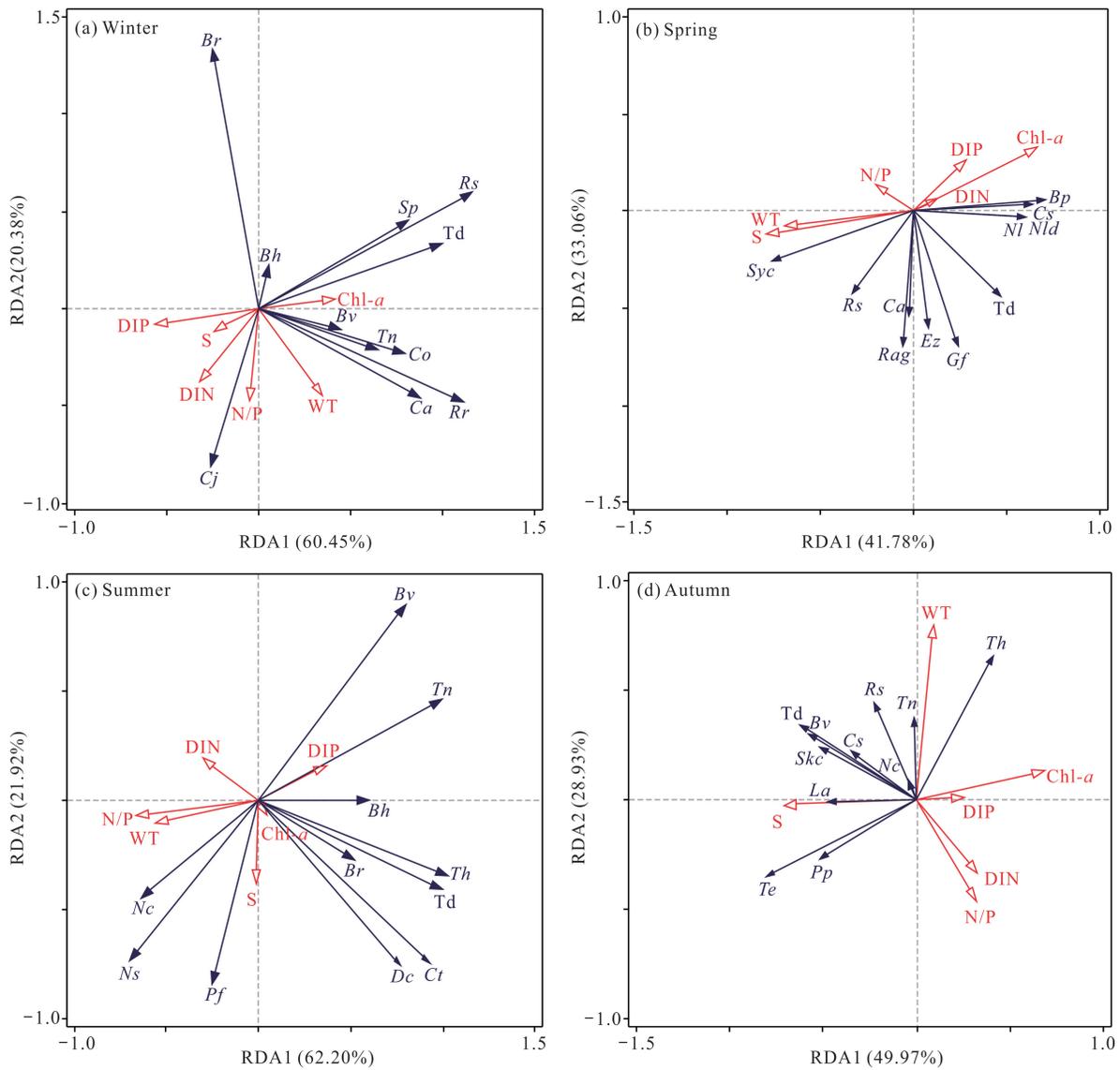
Fig. 3 Temporal and spatial changes of phytoplankton cell density

2.5 浮游植物群落结构与环境因子的关系

选取每个季节优势度排名前10的浮游植物种类的细胞密度和总细胞密度数据,进行各个季节浮游植物群落结构与环境因子之间的RDA,并通过向前引入法筛选出显著水平的环境因子,结果显示:冬季环境因子中显著水平的为DIP ($F=3.1, P=0.018$)、WT ($F=2.2, P=0.042$);春季环境因子中显著水平的为S ($F=2.6, P=0.018$)、WT ($F=2.1, P=0.048$);夏季环境因子中显著水平的为N/P ($F=4.8, P=0.002$)、WT ($F=3.2, P=0.024$);秋季重要环境因子为S ($F=2.0, P=0.048$)。

由图4(a)可以看出,冬季研究海域浮游植物优势种掌状冠盖藻、笔尖形根管藻(*Rhizosolenia styliformis*)均与WT、Chl-*a*呈正相关,与DIP、DIN、N/P、S呈负相关;浮游植物总细胞密度与其呈相同的相关关系;菱形海线藻、虹彩圆筛藻(*Coscinodiscus oculus-iridis*)、星脐圆筛藻(*C. asteromphalus*)、粗根管藻(*R. robusta*)、变异辐杆藻(*Bacteriastrum varians*)与WT、Chl-*a*、N/P呈正相关,与其他环境因子呈负相关。琼氏圆筛藻(*C. jonesianus*)与N/P、S、DIN、WT、DIP呈正相关,与Chl-*a*呈负相关。由图

4(b)可看出,春季研究海域浮游植物优势种短角弯角藻与S、WT、N/P等环境因子呈负相关;奇异棍形藻、条纹小环藻(*Cyclotella striata*)、洛氏菱形藻(*Nitzschia lorenziana*)、洛氏菱形藻密条变种(*N. lorenziana var. densestriata*)与Chl-*a*、DIP、DIN呈正相关,与S、WT、N/P呈负相关;浮游植物总细胞密度与其呈相同的相关关系。由图4(c)可以看出,夏季研究海域浮游植物优势种汉氏束毛藻、菱形海线藻、具尾鳍藻(*Dinophysis caudata*)与DIP、Chl-*a*呈正相关,与N/P、WT呈负相关;浮游植物总细胞密度、高盒形藻(*Biddulphia regia*)、三叉角藻(*Ceratium trichoceors*)、变异辐杆藻(*Bacteriastrum varians*)与其呈相同的相关关系;新月菱形藻、弯菱形藻(*Nitzschia sigma*)、美丽斜纹藻(*Pleurosigma formosum*)与N/P、WT呈正相关,与DIP呈负相关。由图4(d)可以看出,秋季研究海域浮游植物优势种新月菱形藻、汉氏束毛藻、菱形海线藻、条纹小环藻与WT呈强正相关关系,与N/P、DIP、DIN呈负相关;浮游植物总细胞密度与其呈相同的相关关系;红海束毛藻与S、N/P呈正相关,与其他环境因子呈负相关。环纹劳德藻(*Lauderia annulata*)与S呈正相关,与其他环境因子呈负相关。



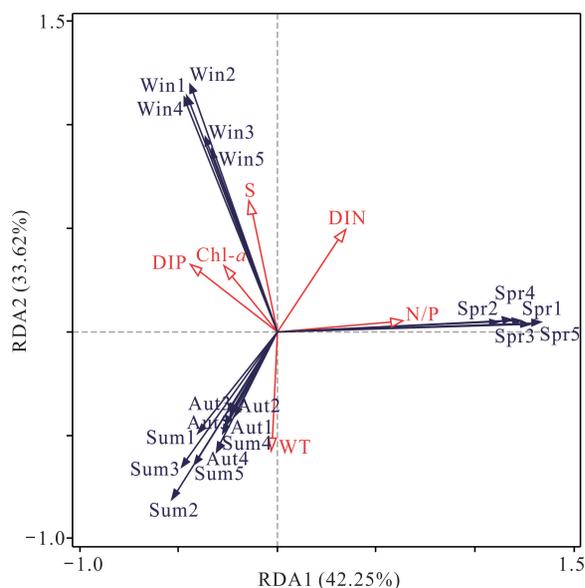
Sp: *Stephanopyxis palmeriana*; *Tn*: *Thalassionema nitzschioides*; *Bh*: *Bellerochea horologicalis*; *Rs*: *Rhizosolenia styliformis*; *Co*: *Coscinodiscus oculus-iridis*; *Ca*: *C. asteromphalus*; *Rr*: *R. robusta*; *Cj*: *C. jonesianus*; *Bv*: *Bacteriastrium varians*; *Br*: *Biddulphia regia*; *Ez*: *Eucampia zodiacus*; *Bp*: *Bacillaria paradoxa*; *Cs*: *Cyclotella striata*; *Nl*: *Nitzschia lorenziana*; *Syc*: *Synedra capitata*; *Rag*: *Rhizosolenia alata* f. *gracillima*; *Gf*: *Gyrodinium flaccida*; *Nld*: *N. lorenziana* var. *densestriata*; *Th*: *Trichodesmium hildebrandtii*; *Dc*: *Dinophysis caudata*; *Nc*: *N. closterium*; *Bh*: *Bellerochea horologicalis*; *Pf*: *Pleurosigma formosum*; *Ns*: *N. sigma*; *Ct*: *Ceratium trichoceors*; *Te*: *T. erythraeum*; *La*: *Lauderia annulata*; *Sc*: *Skeletonema costatum*; *Pp*: *Pseudonitzschia pungens*; *Td*: Total cells density.

图4 浮游植物群落结构与环境因子的冗余分析

Fig. 4 Redundancy analysis of phytoplankton community structure and environmental factors

选取4个季节优势度 $Y \geq 0.05$ 的浮游植物优势种种类的细胞密度数据进行影响各季节之间浮游植物主要优势种变化的环境因子的RDA,结果显示:环境因子达到极显著水平 ($P \leq 0.01$) 的是 N/P ($P = 0.002$)、WT ($P = 0.002$)、S ($P = 0.002$),达到显著水平 ($P \leq 0.05$) 的是 DIN ($P = 0.042$)、DIP ($P = 0.049$)。由图5可以看出,冬季浮游植物主要优势种

与 S、Chl-*a*、DIP、DIN 呈正相关,与 WT、N/P 呈负相关,其中与 S 呈强正相关,与 WT 呈强负相关。春季浮游植物主要优势种与 N/P、DIN 呈正相关,与 DIP、Chl-*a*、S、WT 呈负相关,其中与 N/P 呈强正相关,与 DIP 呈强负相关。夏、秋季浮游植物主要优势种与 WT、DIP 呈正相关,与 N/P、Chl-*a*、DIN、S 呈负相关,其中与 WT 强正相关、DIN 强负相关。



Win1: *Stephanopyxis palmeriana*; Win2: *Thalassionema nitzschioides*; Win3: *Bellerochea horologicalis*; Win4: *Rhizosolenia styliformis*; Win5: *Coscinodiscus oculus-iridis*; Spr1: *Eucampia zoodiacus*; Spr2: *Bacillaria paradoxa*; Spr3: *Cyclotella striata*; Sum1: *Trichodesmium hildebrandtii*; Sum2: *Thalassionema nitzschioides*; Sum3: *Dinophysis caudata*; Sum4: *Nitzschia closterium*; Aut1: *N. closterium*; Aut2: *Trichodesmium erythraeum*; Aut3: *T. hildebrandtii*; Aut4: *Thalassionema nitzschioides*; Aut5: *C. striata*.

图5 各季节浮游植物主要优势种 ($Y \geq 0.05$) 与环境因子的冗余分析

Fig. 5 Redundancy analysis of the main dominant species of phytoplankton ($Y \geq 0.05$) and environmental factors in different seasons

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构的季节变化特征及其影响因素分析

本次调查发现,涠洲岛附近海域浮游植物优势种类群呈现出复杂多样的特征,近岸-外海等多种不同类群交汇于此。在本次调查中,广西涠洲岛附近海域共鉴定出浮游植物 3 门 115 种,其中物种组成占比最高的是硅藻门,其次是甲藻门,与涠洲岛历年调查结果以硅藻门为主的种类组成^[10-12,16]一致,而门类数有所减少,这可能与调查范围不一致、海域环境发生变化有关。本次调查 4 个季节的优势种数量为 4—12。根据浮游植物的生态特征以及在研究海域的分布特点^[17-19],优势种类大致可分为 3 个类群:近岸港湾类群,主要是广温低盐种和底栖性种类,如新月菱形藻、条纹小环藻、洛氏菱形藻、钟形中鼓藻等;近海广

布类群,主要是广温广盐种、暖水性近海种,如掌状冠盖藻、菱形海线藻、短角弯角藻、奇异棍形藻、琼氏圆筛藻、高盒形藻等,是涠洲岛浮游植物的重要生态类群,在细胞丰度上占绝对优势;外海高盐类群,主要是热带性种类,如红海束毛藻、粗根管藻等。涠洲岛处于亚热带海区,位于北部湾东北部中间,同时受广西及雷州半岛沿岸低盐水团、南海外海高盐水团的影响,因此广温广盐种、暖水性近海种等近海广布种成为该海域最主要的生态类群,而广温低盐和外海高盐种类也能同时汇集在此。涠洲岛和斜阳岛是北部湾东北部中间的 2 个海岛,2 个海岛中间水深较浅,且海岛周边也分布有大量的珊瑚礁,因此部分底栖种类也出现在该海域。这表明涠洲岛附近海域浮游植物群落结构特征可能与其所处的地理位置及地形特征有关。

本次调查发现,涠洲岛附近海域浮游植物种类组成结构季节变化不明显,但优势种季节间物种更替率很高。调查期间,研究海域水温为 18.1—33.3 °C,盐度为 29.9—33.3,相对于河口近岸等海域,研究海域环境相对稳定,浮游植物种类组成结构的季节性变化较小与其密切相关。水温、盐度和营养盐被认为是浮游植物最主要的影响因子^[20-22],对比这 3 个因子,研究海域盐度变化幅度最小,水温次之,营养盐的变化幅度最大,变化幅度达到数倍(表 1),表明营养盐和水温可能是调控浮游植物优势种季节变化的主导因素。涠洲岛附近海域虽然因所处地理位置远离河口及海岸线,营养盐水平较低(表 1),但是其季节变化明显。冬、春季海域营养盐相比夏、秋季明显偏高,适应高营养盐的硅藻成为绝对的优势种类;夏、秋季营养盐浓度明显偏低,尤其是无机氮夏季含量约只有冬季的 1/6,而且 N/P 明显低于 16,一些具有固氮能力的蓝藻以及更高营养盐摄取能力的甲藻得以生长成为优势种,表明营养盐和水温的变化可能是涠洲岛附近海域浮游植物优势种季节性演替的主导因素。

本次调查还发现涠洲岛附近海域浮游植物优势种中存在多种赤潮原因种,表明该海区仍存在一定的赤潮潜在风险。之前的调查发现常见的有害赤潮原因种球形棕囊藻 (*Phaeocystis globosa*)、夜光藻 (*Noctiluca scintillans*) 是涠洲岛附近海域主要优势物种^[23],本次调查中并未发现球形棕囊藻、夜光藻成为优势种,而是短角弯角藻、汉氏束毛藻、红海束毛藻和具尾鳍藻等作为优势种出现在研究海域,其中具尾鳍藻属于有毒甲藻,表明仍需防范该海域的赤潮风

险。历史上涠洲岛周边也出现过多次蓝藻的赤潮^[24], 本次调查中, 除了浮游植物细胞密度最高的春季之外, 研究海域 N/P 都很低, 海域处于明显的氮限制, 使汉氏束毛藻、红海束毛藻等一些固氮蓝藻再次成为优势种。与刘国强等^[11]、苏芯莹等^[25]和韩丽君等^[26]研究中的营养盐参数进行比较, 本次调查结果有明显差异, 表明近年来涠洲岛附近海域营养盐等环境很可能发生了一定的变化并引起浮游植物优势种的更替。

3.2 浮游植物细胞密度季节变化特征及其影响因素分析

涠洲岛周边海域浮游植物细胞密度季节性变化明显, 在春季最高, 冬季次之, 夏、秋季最低, 属单峰型变化。这与南海其他近岸海域浮游植物研究结果不一致^[27, 28], 如钦州湾、雷州湾浮游植物细胞密度在夏、秋季较高, 冬、春季较低, 变化多属双峰型, 可能是海域水文化学环境不同所致。钦州湾、雷州湾海域受到大陆径流和外海水的共同影响, 而涠洲岛海域附近没有明显径流注入, 基本不受陆地径流影响。

本次调查发现涠洲岛周边海域浮游植物细胞密度的变化与营养盐含量变化有相似性, 在 DIN、N/P 较高的冬、春季细胞密度高, 在 DIN、N/P 较低的夏、秋季细胞密度低(表 1, 图 3)。冬季 DIN 和 DIP 含量均最高, 这与受径流影响的河口近岸海域不一致^[29-31], 可能是受所处地理位置的影响。涠洲岛和斜阳岛突立于北部湾东北部中间, 北部湾海底地形也整体从涠洲岛的西南—东北方向爬升, 因此从南海进来的北部湾底部海流容易在此形成上升流^[32, 33]。北部湾东北部的环流也有显著的季节性变化^[34, 35], 冬、春季为顺时针环流, 夏、秋季为逆时针环流, 因此涠洲岛附近海域在冬、春季容易受底层流上升的影响, 而夏、秋季则容易受琼州海峡沿岸流的影响。在本次调查中, 冬季研究海域的中西部表层呈现较弱的低温高盐特征, DIN 和 DIP 的浓度也在冬季最高, 因此表明研究海域冬季很可能存在上升流现象, 上升流带来的较高营养盐促进浮游植物生长繁殖, 导致冬季浮游植物细胞密度也较高。春季研究海域 DIN 仍然相对较高, 仅次于冬季, 明显高于夏、秋季, 但 DIP 很低, 导致 N/P 最高, 且浮游植物细胞密度最高, 这很可能是因为春季浮游植物大量地生长繁殖消耗了海域大部分营养盐。春季是调查期间浮游植物细胞密度最高的季节, 且本次调查观察到春季研究海域表层低温高盐水团已不复存在, 这表明上升流可能刚消退, 进而

导致夏、秋季缺乏上升流的补给, 营养盐含量很低, 浮游植物细胞密度也很低, 说明涠洲岛附近海域浮游植物细胞密度的季节变化主要受研究海域上升流等物理过程及其引起的营养盐含量、水温变化的明显调控。

本次调查的 RDA 结果显示, 影响涠洲岛附近海域浮游植物细胞密度的主要环境驱动因子是营养盐、水温和盐度。对冬季涠洲岛附近海域浮游植物有显著影响的环境因子是水温、DIP 和 DIN, 第二优势种菱形海线藻等多个较高细胞密度的种类与水温呈明显正相关而与 DIP 呈明显负相关[图 4(a)], 浮游植物总细胞密度也呈相似相关关系。在本次调查中, 常见硅藻广布种菱形海线藻在研究海域浮游植物群落中占有重要地位, 除春季外, 其余季节菱形海线藻都位于优势种的前 4 位(冬季和夏季为第二优势种, 秋季为第四优势种), 有研究表明菱形海线藻等硅藻的生长与水温呈显著正相关^[36], 且在 30 °C 以下随着水温增高大部分浮游植物种类都可以快速生长^[37], 因此较低的水温很可能是制约冬季浮游植物生长的关键因子, 季节间 RDA 结果也显示冬季浮游植物与水温呈极显著负相关(图 5), 导致冬季虽然营养盐含量最高, 但浮游植物总细胞密度并不能达到最高, 而随着水温明显增高, 浮游植物细胞密度在春季达到最高。春季浮游植物总细胞密度与 DIN、DIP 呈正相关, 与 N/P 呈显著负相关[图 4(b)], 表明由于浮游植物大量生长繁殖耗尽 DIP, 形成高 N/P、低 DIP 的磷限制状态, 制约了浮游植物繁衍, 浮游植物细胞密度开始减少。夏季浮游植物总细胞密度与 DIP 呈正相关, 但与 DIN、WT 呈显著负相关[图 4(c)], 秋季浮游植物总细胞密度也与 DIN 显著负相关[图 4(d)]。季节间 RDA 结果也显示夏、秋季浮游植物主要受水温、营养盐的调控(图 5), 这主要是由于海域水温升高与营养盐随着春季的大量消耗而匮乏, 进而促进了汉氏束毛藻、红海束毛藻等容易在水温偏高、DIN 偏低的海域生长且具有固氮能力的种类成为优势种。

3.3 浮游植物季节变化与布氏鲸迁徙的关系

浮游植物作为浮游动物的重要摄食来源, 是海洋初级生产力的重要组成部分, 浮游植物的季节变化反映海域初级生产力的高低^[38]。海域的浮游植物数量和结构不仅直接影响浮游动物的生物量和分布, 而且能通过食物链、食物网影响渔业资源的数量和分布^[39], 进而影响更高营养级海洋生物的数量和分布。

浮游植物细胞密度季节变化可能是研究海域布氏鲸迁徙的重要因素。本次调查发现,研究海域浮游植物细胞密度为 25.09—28 925.29 cells/L,平均为 2 264.90 cells/L,显著高于渤海海域^[40],也高于北部湾其他海域^[41],这为支撑该海域更高营养级海洋生物的生存提供了基础。涠洲岛在历史上和现在都被开发为重要渔场^[42,43],自 2018 年以来,布氏鲸在涠洲岛附近(即本次调查的海域)频繁出现觅食行为^[44],表明该海域丰富的渔业资源吸引着布氏鲸迁徙到此捕食和活动,作为食物链基础环节的浮游植物与其有着密不可分的关系。通过对广西布氏鲸种群动态的研究发现^[8,9],布氏鲸通常在秋末冬初迁徙到研究海域,春季是在研究海域观测到布氏鲸出现和捕食最多、最活跃的季节,而在春末夏初迁徙离开研究海域,夏季和秋初几乎没有出现布氏鲸的报道,本调查浮游植物细胞密度季节变化与其迁徙变化相吻合,表明涠洲岛附近海域布氏鲸的迁徙规律与浮游植物细胞密度季节变化密切相关。冬季上升流的存在补充了海域的营养盐,以此支撑冬、春两季很高的初级生产力和生物量,进而能够支撑更高营养级的生物,吸引大量布氏鲸迁徙而来。郑白雯^[45]对北部湾北部浮游生物研究结果也显示,浮游动物与浮游植物在丰度的季节变化上具有一致性,说明海洋初级生产力通过上行作用影响着更高营养级海洋生物的季节变化。而春末之后随着上升流消失,营养盐匮乏,浮游植物急剧减少,导致渔业资源减少,无法再支撑布氏鲸巨量的捕食需求,从而导致其离开寻求更适合的捕食场,进一步说明作为海洋生物赖以生存的物质基础的浮游植物,其细胞密度和分布影响着布氏鲸的迁徙。

浮游植物群落优势种结构季节变化也可能是影响研究海域布氏鲸迁徙的一个重要因素。优势种作为对群落结构和功能有重要影响的物种,对整个群落具有控制性影响,优势种的变化也会通过食物链的传递影响着下一营养级群落结构的变化。在本次调查中,冬、春季和夏、秋季浮游植物的优势种类发生很大变化。冬季浮游植物的优势种丰富,且主要是常见的较大硅藻种类,它们被认为是经典食物链的饵料种类,容易形成草食性食物链,传递效率更高,能够支撑个体较小但成群的鱼类^[46,47]。文献^[48,49]与笔者在研究海域渔业资源调查的结果也显示冬季布氏鲸主要摄食鱼类——小沙丁鱼属(*Sardinella*)和杜氏棱鲷(*Thryssa dussumieri*)等鲷科(Engraulidae),渔获量非常丰富。小沙丁鱼属和杜氏棱鲷等鲷科鱼类

食性杂,除摄食浮游甲壳类外也会摄食硅藻^[50,51],本调查中冬季较为丰富的优势硅藻种类给布氏鲸主要摄食鱼类提供丰富的饵料,从而能够提供给布氏鲸充足的食物资源。春季浮游植物的优势种种数较冬季少,但也都属硅藻门,且优势种细胞密度占总密度的 95.56%,这也为布氏鲸主要摄食鱼类提供丰富的饵料,将更多的鱼类聚集于此,支撑着布氏鲸能够继续在此捕食和活动。冬、春季丰富的硅藻资源构成海洋生物食物链的基础,以此支撑海洋生物食物链顶端的生物——布氏鲸,这与布氏鲸在研究海域冬、春季捕食最为活跃的现象一致。与之相反,夏、秋季优势种主要是蓝藻、甲藻等非硅藻为主,不利于布氏鲸主要摄食鱼类的生长繁殖,布氏鲸食物链低营养级之间达不到有效的传递,无法为布氏鲸提供食物,从而导致布氏鲸迁徙离开。渔业资源调查的结果也显示近些年涠洲岛周边渔业资源的数量和种类等群落结构发生较大变化^[52],进一步表明浮游植物作为初级生产者,其数量和群落结构通过食物链的传递密切影响着布氏鲸等顶级营养级生物的迁徙与变化。

4 结论

①研究海域共鉴定出浮游植物 115 种,以硅藻门为主。4 个季节的优势种数量为 4—12,种类大致可分为 3 个类群:近岸港湾类群、近海广布类群、外海高盐类群,近海广布种是该海域最主要的生态类群。浮游植物群落结构季节间更替明显,营养盐和水温的季节变化是浮游植物群落结构季节性演替的主导因素。

②研究海域浮游植物细胞密度为 25.09—28 925.29 cells/L,季节变化明显,在春季最高,冬季次之,夏、秋季最低,营养盐、水温和盐度是浮游植物细胞密度季节变化的影响因素,其中营养盐是最主要因素。

③研究海域布氏鲸发生季节性迁徙与浮游植物细胞密度季节变化一致,说明浮游植物可能通过食物网的上行控制作用决定较高营养级生物种群动态变化。冬、春季较高的初级生产力给下一营养级生物提供了充足的饵料,进而支撑着更高营养级生物的食物需求,从而吸引布氏鲸迁入涠洲岛海域觅食。

④研究海域应进行长期监测,并加强水质、赤潮暴发、布氏鲸等方面的调查,从而全面地分析浮游植物群落结构和布氏鲸的变化,为了解涠洲岛布氏鲸栖息地生态环境状况提供数据支持,进一步为布氏鲸栖息营造良好的生存环境提供科学依据。

参考文献

- [1] SCHMIDT K, BIRCHILL A J, ATKINSON A, et al. Increasing picocyanobacteria success in shelf waters contributes to long-term food web degradation [J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(10): 5574-5587.
- [2] HILLIGSØE K M, RICHARDSON K, BENDTSEN J, et al. Linking phytoplankton community size composition with temperature, plankton food web structure and sea-air CO₂ flux [J]. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 2011, 58(8): 826-838.
- [3] QIN M Q, FAN P P, LI Y Y, et al. Assessing the ecosystem health of large drinking-water reservoirs based on the phytoplankton index of biotic integrity (P-IBI): a case study of Danjiangkou Reservoir [J]. *Sustainability*, 2023, 15(6): 5282.
- [4] LI Y L, LI L X. Development and validation of the planktonic index of biotic integrity (P-IBI) for Qin River, a main tributary of the Yellow River in China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(2): 2622-2636.
- [5] 于仁成, 吕颂辉, 齐雨藻, 等. 中国近海有害藻华研究现状与展望[J]. *海洋与湖沼*, 2020, 51(4): 768-788.
- [6] 林森杰, 姬南京, 罗昊. 海洋有害藻华研究进展[J]. *海洋与湖沼*, 2019, 50(3): 495-510.
- [7] ZHANG Y Y, CHEN M, CHEN M, et al. Community-based population monitoring for large baleen whales: the case study of Bryde's whale in Beibu Gulf of China [J]. *Integrative Zoology*, 2021, 16(4): 626-635.
- [8] 吴采雯. 广西布氏鲸的种群动态及捕食策略研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2021.
- [9] CHEN M, HUANG S L, WU H P, et al. Occurrence of Bryde's whales, *Balaenoptera edeni*, in the northern Beibu Gulf, China [J]. *Marine Mammal Science*, 2019, 35(4): 1643-1652.
- [10] 张腾. 涠洲岛海域潜在有毒有害浮游植物调查研究[D]. 南宁: 南宁师范大学, 2021.
- [11] 刘国强, 史海燕, 魏春雷, 等. 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*, 2008, 27(3): 43-48.
- [12] 韦蔓新, 黎广钊, 何本茂, 等. 涠洲岛珊瑚礁生态系中浮游动植物与环境因子关系的初步探讨[J]. *海洋湖沼通报*, 2005(2): 34-39.
- [13] 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.
- [14] 束蕴芳, 韩茂森. 中国海洋浮游生物图谱[M]. 北京: 海洋出版社, 1993.
- [15] HILLEBRAND H, DÜRSELEN C D, KIRSCHTEL D, et al. Biovolume calculation for pelagic and benthic microalgae [J]. *Journal of Phycology*, 1999, 35(2): 403-424.
- [16] 陈成英, 廖思明. 涠洲岛和斜阳岛附近海域浮游植物初步调查[J]. *广西科学院学报*, 1998, 14(4): 9-12.
- [17] 赵龙, 黎鹏飞, 郑璇, 等. 阳江港近岸海域浮游植物群落结构初步研究[J]. *科学咨询(教育科研)*, 2022(8): 13-15.
- [18] 刘璐, 李艳, 孙萍, 等. 钦州湾外湾海域浮游植物群落结构季节变化及其影响因素分析[J]. *海洋环境科学*, 2020, 39(5): 776-784, 790.
- [19] 张才学, 孙省利, 谢伟良, 等. 徐闻珊瑚礁区浮游植物的季节变化[J]. *海洋与湖沼*, 2009, 40(2): 159-165.
- [20] 邹双燕. 平潭近岸海域春、夏季浮游植物特征及其与环境因子相关性分析[J]. *渔业研究*, 2022, 44(3): 266-274.
- [21] 刘璐, 姜美洁, 李艳, 等. 钦州湾海域网采浮游植物群落结构季节变化[J]. *海洋科学进展*, 2017, 35(1): 83-95.
- [22] 王迪, 陈丕茂, 逯晶晶, 等. 钦州湾浮游植物周年生态特征[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(6): 1686-1692.
- [23] 粟启仲, 雷学铁, 刘国强, 等. 广西北部湾近岸海域近20年赤潮灾害特征分析[J]. *广西科学*, 2022, 29(3): 552-557.
- [24] 窦勇, 高金伟, 时晓婷, 等. 2000—2013年中国南部近海赤潮发生规律及影响因素研究[J]. *水生态学杂志*, 2015, 36(3): 31-37.
- [25] 苏芯莹, 陈波, 牙韩争, 等. 涠洲岛海域球形棕囊藻藻华过程中营养盐及浮游植物群落组成分析[J]. *热带亚热带植物学报*, 2022, 30(6): 863-873.
- [26] 韩丽君, 郑新庆, 蓝文陆, 等. 近10年涠洲岛周边海域表层海水营养盐含量变化特征[J]. *应用海洋学学报*, 2015, 34(1): 65-72.
- [27] 陈春亮, 张才学. 雷州湾浮游植物群落结构特征及其环境影响分析[J]. *应用海洋学学报*, 2016, 35(2): 174-182.
- [28] 姜发军, 陈波, 何碧娟, 等. 广西钦州湾浮游植物群落结构特征[J]. *广西科学*, 2012, 19(3): 268-275.
- [29] 彭小燕, 喻泽斌, 蓝文陆, 等. 近10a廉州湾富营养化因子变化特征及其与赤潮演变的关系[J]. *海洋环境科学*, 2018, 37(5): 670-677.
- [30] 覃仙玲, 陈波, 赖俊翔, 等. 钦州湾磷营养状态与浮游植物的碱性磷酸酶活性分析[J]. *海洋通报*, 2018, 37(2): 169-176.
- [31] 庄军莲, 姜发军, 许铭本, 等. 钦州湾茅尾海周年环境因子及浮游植物群落特征[J]. *广西科学*, 2012, 19(3): 263-267.

- [32] 高劲松. 南海北部中尺度涡及北部湾环流结构与生成机制研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2013.
- [33] 俞慕耕,刘金芳. 南海海流系统与环流形势[J]. 海洋预报,1993,10(2):13-17.
- [34] 李明明,谭可易,黄家辉,等. 北部湾东北部水团和流场季节变化:2018—2019年观测数据分析[J]. 海洋学研究,2022,40(3):73-85.
- [35] WU C R, SHAW P T, CHAO S Y. Seasonal and inter-annual variations in the velocity field of the South China Sea [J]. Journal of Oceanography, 1998, 54(4): 361-372.
- [36] 刘腾飞. 环境因子对菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)种群生长与种间竞争的影响研究[D]. 青岛:中国海洋大学,2015.
- [37] 方丽娟,刘德富,杨正健,等. 水温对浮游植物群落结构的影响实验研究[J]. 环境科学与技术,2014,37(S2):45-50.
- [38] YU J, HU Q W, TANG D L, et al. Response of *Stenoteuthis oualaniensis* to marine environmental changes in the north-central South China Sea based on satellite and *in situ* observations [J]. PLoS One, 2019, 14(1): e0211474.
- [39] YU J, HU Q W, TANG D L, et al. Environmental effects on the spatiotemporal variability of purpleback flying squid in Xisha-Zhongsha waters, South China Sea [J]. Marine Ecology Progress Series, 2019, 623(30): 25-37.
- [40] 杨阳,孙军,关翔宇,等. 渤海网采浮游植物群集的季节变化[J]. 海洋通报,2016,35(2):121-131.
- [41] 傅明珠,孙萍,李艳,等. 南海三沙永乐龙洞及邻近海域浮游植物群落结构[J]. 海洋科学进展,2020,38(2):304-316.
- [42] WANG Y F, YAO L J, CHEN P M, et al. Environmental influence on the spatiotemporal variability of fishing grounds in the Beibu Gulf, South China Sea [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2020, 8(12): 957.
- [43] GAO J S, WU G D, YA H Z. Review of the circulation in the Beibu Gulf, South China Sea [J]. Continental Shelf Research, 2017, 138: 106-119.
- [44] LIU M M, LIN W Z, LIN M L, et al. The first attempt of satellite tracking on occurrence and migration of Bryde's Whale (*Balaenoptera edeni*) in the Beibu Gulf [J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2021, 9(8): 796.
- [45] 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.
- [46] 何丛颖. 西沪港生态系统结构研究及盐沼生境修复效益评价[D]. 宁波:宁波大学,2021.
- [47] 刘明,支崇远. 硅藻对渔业的支撑作用与负面效应探讨[J]. 安徽农业科学,2008,36(32):14137-14139,14160.
- [48] 张公俊. 北部湾中北部鱼类群落与环境因子关系研究[D]. 天津:天津农学院,2021.
- [49] 邹建伟,林丕文,王强哲. 南海北部湾2012年捕捞产量估算[J]. 南方水产科学,2013,9(4):75-81.
- [50] 王军,苏永全,丘书院. 罗源湾三种鳀科鱼类的食性[J]. 福建水产,1993,15(4):54-58.
- [51] 王军,丘书院. 闽南粤东近海金色小沙丁鱼的食性[J]. 台湾海峡,1986,5(1):86-93.
- [52] HONG X F, ZHANG K, LI J J, et al. Effects of climate events on abundance and distribution of major commercial fishes in the Beibu Gulf, South China Sea [J]. Diversity, 2023, 15(5): 649.

Seasonal Variation Characteristics of Phytoplankton Community Structure and Environmental Impact Factors in the Weizhou Island, Guangxi

LIN Jia¹, LIN Haiying¹, LUO Xin², GUO Meixiu², LI Mingmin², PANG Bijian², HUANG Xiongliang², WANG Zhou², LAN Wenlu^{2* * *}

(1. School of Resources, Environment and Materials, Guangxi University, Nanning, Guangxi, 530004, China; 2. Beibu Gulf Marine Ecological Environment Observation and Research Station of Guangxi, Marine Environmental Monitoring Center of Guangxi,

Beihai, Guangxi, 536000, China)

Abstract: In order to understand the seasonal variation characteristics of phytoplankton community structure and its environmental impact factors in the habitat of *Balaenoptera edeni* in Weizhou Island, Guangxi, and to analyze the relationship between the seasonal variation of phytoplankton community structure characteristics and the seasonal migration of *B. edeni*, the phytoplankton in the habitat of *B. edeni* in Weizhou Island, Guangxi were systematically investigated in January (winter), April (spring), August (summer) and November (autumn) in 2022. A total of 115 species of phytoplankton belonging to 54 genera and 3 phyla were identified throughout the year. The species composition was dominated by Bacillariophyta (93 species) and Pyrrophyta (19 species). The seasonal difference of phytoplankton species composition was not obvious, but the dominant species changed significantly, and the dominant groups also changed greatly. Among them, Bacillariophyta was the most dominant group in winter and spring, and the dominant species also belonged to Bacillariophyta. However, in summer and autumn, the dominant groups changed to be composed of Bacillariophyta, Pyrrophyta and Cyanophyta. The density of phytoplankton cells also changed greatly, with the highest in spring, the second in winter, and the lowest in summer and autumn. Redundancy Analysis (RDA) of phytoplankton and environmental factors showed that nutrients, Water Temperature (WT) and Salinity (S) were the main environmental factors affecting the seasonal variation of phytoplankton cell density and dominant species structure. The migration of *B. edeni* into Weizhou Island in winter and spring, and out of Weizhou Island in summer and autumn were consistent with the seasonal variation of phytoplankton cell density. Phytoplankton, as a primary producer, may affect the migration of the top trophic marine organism *B. edeni* through the upward control of the food web.

Key words: Weizhou Island; phytoplankton; community structure; seasonal change; impact factors; *Balaenoptera edeni*

责任编辑: 梁 晓



微信公众号投稿更便捷

联系电话: 0771-2503923

邮箱: gxkx@gxas.cn

投稿系统网址: <http://gxkx.ijournal.cn/gxkx/ch>