

霞浦长表岛附近海域浮游植物群落特征 与环境因子分析

黄文^{1,2,3}, 夏永健^{1,2,3}, 郑碧琪^{1,2,3}, 温冬^{1,2,3}, 陈拥^{1,2,3}, 李允^{1,2,3}, 李益云^{1,2,3}

(1. 自然资源部宁德海洋中心 宁德 352000; 2. 自然资源部海洋生态监测与修复技术重点实验室 上海 201206;
3. 滨海电厂海洋生态联合研究中心 宁德 352000)

摘要: 为了进一步了解霞浦长表岛附近海域浮游植物群落特征, 文章利用 2019 年 5 月(春季)、9 月(夏季)、12 月(秋季)和 2020 年 2 月(冬季)4 个航次调查的浮游植物和水环境数据, 分析了浮游植物群落结构特征, 通过冗余性分析(RDA)研究了影响浮游植物群落结构的主要环境因子, 结果共鉴定出浮游植物 4 门 60 属 170 种, 其中硅藻 48 属 131 种, 甲藻 10 属 26 种, 蓝藻 1 属 2 种, 金藻 1 属 1 种。浮游植物以近岸广温广盐种和暖水种为主, 全年优势种有 13 种, 春季以东海原甲藻和夜光藻为主, 夏季、秋季和冬季以中肋骨条藻和琼氏圆筛藻为主。浮游植物丰度在空间分布上整体呈现近岸高、远岸低、南部低、北部高的趋势特点。RDA 和 Person 相关性分析表明, 浮游植物丰度的季节动态变化主要受水温影响; 春季和夏季适宜的温度与营养盐促进了浮游植物的大量增长, 秋季和冬季则主要受到温度的影响。浮游植物大量繁殖增长甚至暴发出现在春季和夏季, 霞浦长表岛海域滨海核电应在春季和夏季重点加强该海域赤潮灾害的监测预警。

关键词: 长表岛; 浮游植物; 群落结构; 环境因子

中图分类号: X55

文献标志码: A

文章编号: 1005-9857(2024)01-0126-10

Phytoplankton Community Structure Characteristics and Analysis of Environmental Factors in Sea Area near Xiapu Changbiao Island

HUANG Wen^{1,2,3}, XIA Yongjian^{1,2,3}, ZHENG Biqi^{1,2,3}, WEN Dong^{1,2,3},
CHEN Yong^{1,2,3}, LI Yun^{1,2,3}, LI Yiyun^{1,2,3}

(1. Natural Resources Ningde Ocean Center, MNR, Ningde 352000, China; 2. Key Laboratory of Marine Ecological Monitoring and Restoration Technologies, MNR, Shanghai 201206, China; 3. The Coastal Marine Ecological Joint Research Center of Power Plant, Ningde 352000, China)

Abstract: In order to further understand the characteristics of phytoplankton community in the sea area near Changbiao Island in Xiapu, the data of phytoplankton and water environment from four cruises in May (spring), September (summer), December (autumn) and February (winter) in 2019—2020 were analyzed, and the characteristics of phytoplankton community

收稿日期: 2023-04-09; 修订日期: 2023-12-11

基金项目: 自然资源部东海局青年科技基金(2023180502, 2023180304, 202114); 海洋赤潮灾害立体监测技术与应用国家海洋局重点实验室开放研究基金(MATHAB202110)。

作者简介: 黄文, 工程师, 硕士, 研究方向为海洋环境监测与评价

structure were analyzed. The main environmental factors affecting the structure of phytoplankton community were studied by redundancy analysis. The results showed that there were 170 species of phytoplankton in 60 genera, 48 genera and 131 species of diatoms, 26 species of dinoflagellates in 10 genera, 2 species of cyanobacteria in 1 genera and 1 species of diatoms in 1 genera. Phytoplankton are mainly coastal wide-temperature and wide-salt species and warm water species. There are 13 dominant species throughout the year. In spring, *Prorocentrum donghaiense* and *Noctiluca* are the main species, and *Skeletonema costatum* and *Siegesbeckia qionghaiensis* are the main species in summer, autumn and winter. The spatial distribution of phytoplankton abundance shows a trend of high nearshore, low farshore, low in the south, and high in the north. Seasonal variation of phytoplankton is mainly affected by water temperature. Appropriate temperature and nutrients in spring and summer promote a large increase in phytoplankton, while autumn and winter are mainly affected by temperature. Now in spring and summer, the coastal nuclear power station of Changbiao Island in Xiapu should focus on monitoring the occurrence of red tide in spring and summer.

Keywords: Changbiao Island, Phytoplankton, Community structure, Environmental factors

0 引言

我国近海浮游植物种类繁多、数量巨大而且分布范围广^[1-2],是海洋生态系统的重要能量基础^[3]。有研究表明,浮游植物暴发引起赤潮直接对渔业资源产生严重影响^[4],导致大量鱼虾蟹死亡,不仅造成生态环境恶化^[5-7],还会严重影响海洋渔业以及海洋生态功能等^[8]。另外,浮游植物是滨海核电冷源安全风险生物的重要种类之一^[9],其大量暴发会影响核电取水系统的安全运行,严重时甚至造成机组停堆,如红沿河核电站(2015年6—11月)、广西防城港核电站(2014年6—11月)冷源系统直接受到负面影响^[10-11],引发的社会与经济问题受到广泛关注。

霞浦滨海电厂项目位于霞浦长表岛,规划建设4台百万千瓦级核电机组和1台60万千瓦级高温气冷堆核电机组,是国家重大项目工程。目前对霞浦周边海域浮游植物研究多集中于三沙湾、福宁湾、晴川湾等^[12-14],对长表岛附近海域浮游植物群落特征的研究尚未见报道。本文通过2019—2020年长表岛附近海域浮游植物调查资料,分析了浮游植物群落结构、优势种、丰度、多样性指数,探讨了浮游植物丰度与水质环境因子等的关系,并评估其对核电冷源的潜在风险,以期为今后霞浦核电

附近海域的生态安全管控提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究资料来自国家海洋局宁德海洋环境监测中心站在2019年5月、9月、12月、2020年2月对长表岛附近海域的水质生态现状调查的4个航次调查资料。

严格参照GB 17378—2007《海洋监测规范》和GB/T 12763—2007《海洋调查规范》,采用浅水III型浮游生物网(筛绢孔径0.076 mm)采集浮游植物样品,到达站位后从离底2 m处垂直拖网,多次冲洗网衣残留的浮游植物,将样品转移至聚乙烯瓶中并加入5%甲醛溶液固定保存,带回实验室进行分析鉴定。海水水质样品采集自海水表层(0.5 m),利用水质多参数测定仪器(CTD)在现场测定水温(T)、盐度、pH、溶解氧、化学需氧量、活性磷酸盐、无机氮等要素在水样带回宁德实验室后分析。

1.2 数据分析

本研究采用多样性指数分析评价霞浦海域浮游植物群落结构特征^[15-16]:

物种均匀度指数(Pielou):

$$J = H / \log_2 S \quad (1)$$

式中: H 为多样性指数; S 为样方中物种数。

物种多样性指数(Margalef):

$$H = - \sum_i^S P_i \log_2 P_i \quad (2)$$

式中: P_i 为第*i*种的个体数与该样方总个数之比值。 S 为样方总数。

优势度:

$$Y = n_i / N \times F_i \quad (3)$$

式中; n_i 为群落中第*i*个种的个体数; N 为群落中所有种的个体数总和; F_i 为第*i*个种在各样方中出现频率。

物种丰富度指数(Shannon):

$$D = (S - 1) / \log_2 N \quad (4)$$

式中: S 为浮游植物的物种数; N 为所有物种的个体数。

利用 Canoco5.0 软件对长表岛附近海域浮游植物丰度和环境因子进行冗余分析排序(RDA)^[17],依据物种出现频率大于 12.5% 以及物种优势度高于 0.02 进行筛选物种。一共选取了 13 种浮游植物物

种进行 RDA 分析,分析数据前将浮游植物丰度和环境因子数据经过 $\lg(x+1)$ 转换。

利用 Spss16 进行 Person 相关性分析和显著性分析,采样点位分布图用 Surfer16 绘制,其他图用 Excel 完成。

2 结果与分析

2.1 水质环境因子

长表岛附近海域环境因子的分析结果表明,水温出现明显的季节变化趋势,夏季水温最高达 28.8℃,其次是春季、秋季,冬季温度最低 13.2℃;盐度夏季最高 32.163‰、春季最低 28.903‰;pH 春季最高 8.40,夏季最低 8.08;溶解氧含量,春季最高达 10.24 mg/L,其次依次为冬季、夏季、秋季;化学需氧量含量,春季为 2.11 mg/L,其次依次为夏季、冬季、秋季;营养盐(活性磷酸盐、硝酸盐、无机氮)主要为秋、冬季比春、夏季更高(表 1)。

表 1 长表岛附近海域环境因子的季节变化

Table 1 Seasonal change of environmental factors in sea waters near Changbiao Island

季节	水温 /℃	盐度 /‰	pH	溶解氧/ (mg·L ⁻¹)	化学需氧量/ (mg·L ⁻¹)	活性磷酸盐/ (mg·L ⁻¹)	亚硝酸盐/ (mg·L ⁻¹)	硝酸盐/ (mg·L ⁻¹)	铵盐/ (mg·L ⁻¹)	无机氮/ (mg·L ⁻¹)
春季	21.1	28.903	8.40	10.24	2.11	0.005 7	0.008	0.056	0.023	0.087
夏季	28.8	32.163	8.08	6.75	0.67	0.007 5	0.005	0.069	0.013	0.087
秋季	15.8	29.156	8.15	6.65	0.59	0.042 2	0.004	0.423	0.020	0.432
冬季	13.2	29.860	8.14	7.35	0.65	0.022 6	0.007	0.363	0.013	0.384

2.2 浮游植物群落结构

2.2.1 种类组成及季节变化

长表岛附近海域浮游植物共鉴定出 170 种,分别属于硅藻、甲藻、蓝藻和金藻共 4 门 40 科 64 属。其中硅藻种类最多,共 48 属 131 种,占有种类的 77.06%;甲藻 10 属 26 种,占有种类的 21.18%;蓝藻 1 属 2 种,占有种类的 1.18%;金藻 1 属 1 种,占有种类的 0.59%。

根据浮游植物种类季节变化(表 2),硅藻种类夏季最多(38 属 96 种),其次为秋季和冬季,春季硅藻种类最低(19 属 40 种);甲藻种类以夏季最多(9 属 30 种),春季其次,冬季最低(5 属 9 种);蓝藻 1 属 2 种出现在夏季,蓝藻 1 属 1 种分别出现在秋季

和冬季;金藻 1 属 1 种仅出现在春季。

表 2 长表岛附近海域浮游植物类群的季节变化

Table 2 Seasonal change of phytoplankton groups in sea waters near Changbiao Island

类别	春季	夏季	秋季	冬季
硅藻	19 属 40 种	38 属 96 种	27 属 54 种	23 属 49 种
甲藻	6 属 13 种	9 属 30 种	5 属 11 种	5 属 9 种
蓝藻	0	1 属 2 种	1 属 1 种	1 属 1 种
金藻	1 属 1 种	0	0	0
合计	26 属 54 种	48 属 128 种	33 属 66 种	29 属 59 种

浮游植物季节变化过程中,硅藻种类和数量上

占有绝对优势,其中硅藻细胞数量占浮游植物总数的全年平均百分比是 83.29%。对不同季节硅藻细胞数量对比发现,硅藻细胞数量由高到低依次排列为:夏季、春季、秋季、冬季。甲藻细胞数量占浮游植物总数的全年平均百分比为 10.87%,与硅藻季节性变化有所不同,春季细胞数量最大,甲藻细胞数量由高到低依次排列为:春季、夏季、秋季、冬季。金藻和蓝藻细胞数量全年极低,几乎不起作用,仅占全年平均百分比 5.84%。

2.2.2 优势种及其季节变化

如图 1 所示,调查海域全年浮游植物种类主要由广温广盐种组成,硅藻占绝对优势,甲藻次之,具有明显的亚热带区系特征。

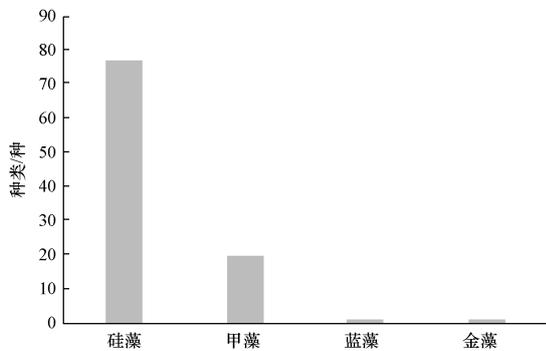


图 1 长表岛附近海域浮游植物种类

Fig.1 Category of phytoplankton in sea waters near Changbiao Island

根据调查数据分析筛选,全年浮游植物优势种共统计出 13 种,其中中肋骨条藻为夏季、秋季、冬季共有的优势种,琼氏圆筛藻为秋季和冬季共有优势种。

如表 3 所示,优势度指数 $y > 0.02$ 为标准,春季优势种以东海原甲藻 ($y = 0.58$)、夜光藻、三角角藻等甲藻为主;夏季优势种有 5 种,其中第一优势种中肋骨条藻优势度高达 0.45;秋季优势种以琼氏圆筛藻 ($y = 0.28$)、中肋骨条藻 ($y = 0.24$) 等硅藻为主;冬季优势种以琼氏圆筛藻 ($y = 0.37$)、中华盒形 ($y = 0.33$) 藻等硅藻为主。春季以甲藻为主,夏季、秋季和冬季以硅藻为主,这与曾宇兰等^[18]调查发现的福建海域浮游植物以甲藻为主的结论一致。

表 3 长表岛附近海域浮游植物优势种及优势度
Table 3 The dominant phytoplankton species and their dominance in sea waters near Changbiao Island

序号	优势种及优势度	春季	夏季	秋季	冬季
1	东海原甲藻	0.58	—	—	—
2	夜光藻	0.15	—	—	—
3	三角角藻	0.14	—	—	—
4	尖刺拟菱形藻	0.06	—	—	—
5	中肋骨条藻	—	0.45	0.24	0.07
6	扭链角毛藻	—	0.05	—	—
7	柔弱拟菱形藻	—	0.05	—	—
8	铁氏束毛藻	—	0.04	—	—
9	环纹娄氏藻	—	0.04	—	—
10	琼氏圆筛藻	—	—	0.28	0.37
11	中华盒形藻	—	—	—	0.33
12	卡氏角毛藻	—	—	—	0.04
13	布氏双尾藻	—	—	—	0.03

注:“—”表示优势度 $y < 0.02$ 。

不同季节变化过程中,长表岛附近海域浮游植物优势种从春季到其他季节,甲藻逐渐演替至硅藻。从春季初始东海原甲藻优势度达到最高,而到夏季甲藻逐渐消亡,中肋骨条藻占据优势,秋季和冬季又逐渐过渡到琼氏圆筛藻、中肋骨条藻、中华盒形藻等优势种,长表岛附近海域浮游植物优势种存在明显的季节演替。

2.2.3 浮游植物丰度水平分布

调查海域浮游植物丰度全年变化范围为 0.13 万~1 920 万个/ m^3 ,全年平均值 403 万个/ m^3 。从不同季节来看,浮游植物丰度分布有明显不同(图 2),其中,硅藻在全年中占绝对优势。

春季浮游植物丰度整体较高,总体上分布由北向南密度逐渐升高,各站位间细胞丰度差异大。其中近岸 13# 站位最高(1 920 万个/ m^3),最低为远岸 24# 站位(35.8 万个/ m^3),最高站位是最低站位细胞丰度的 53.6 倍,主要原因是近岸站位东海原甲藻丰度较高。

夏季浮游植物丰度水平分布从近岸向近海浮游植物细胞丰度逐渐降低,但细胞水平较春季有所

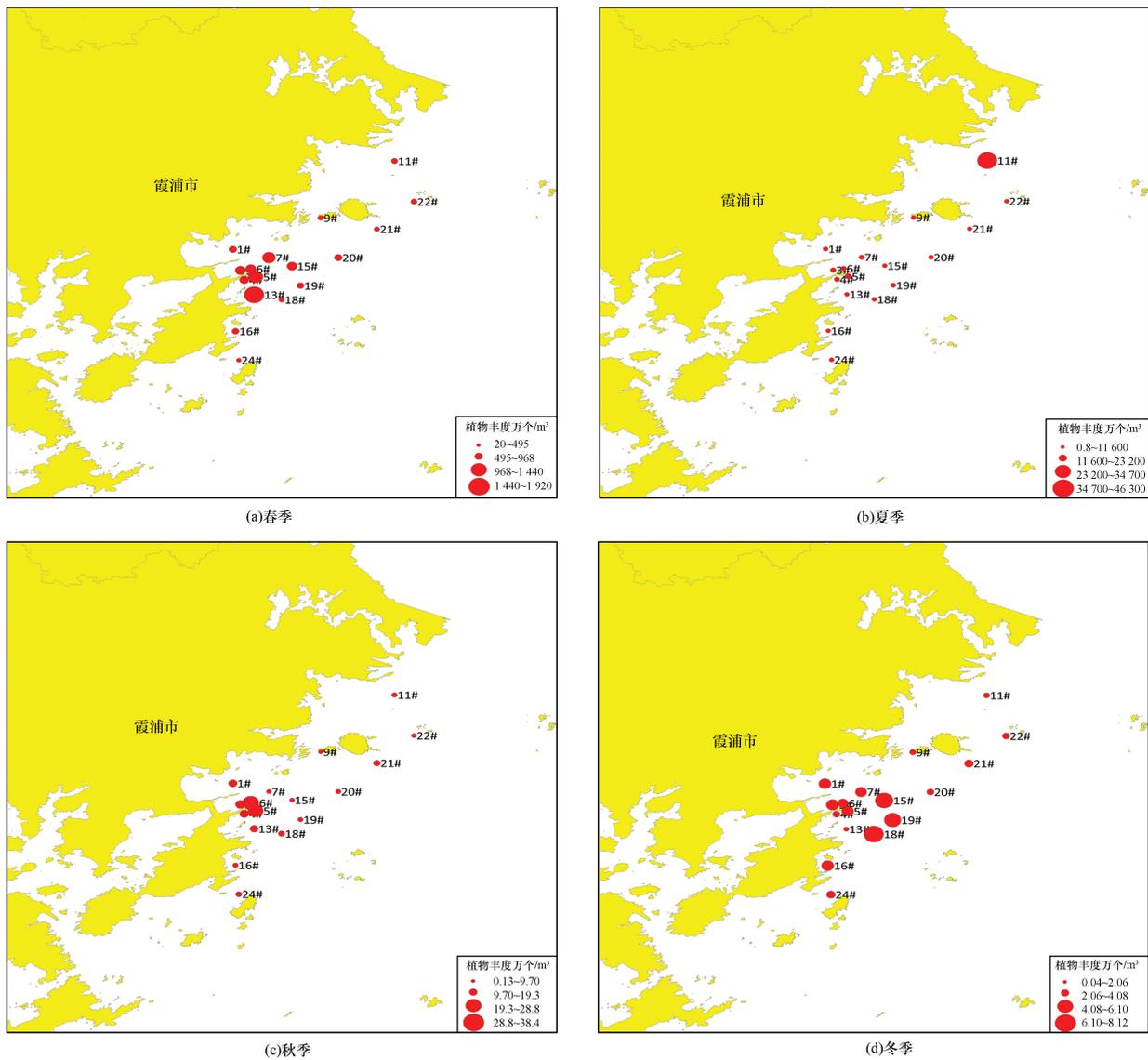


图 2 长表岛附近海域不同季节浮游植物丰度的水平分布

Fig.2 Horizontal distribution of abundance of phytoplankton in different seasons in sea area near Changbiao Island

增加。其中 11# 站位最高(46 300 万个/m³), 24# 站位最低(0.829 万个/m³), 最高站位是最低站位的 55 850.73 倍, 其中 11# 站位发现有大量的中肋骨条藻暴发, 接近赤潮暴发, 该站位丰度值较高, 有可能受到沿海径流带来的营养盐的影响。

秋季浮游植物细胞丰度水平分布趋势同春季、夏季一致, 由近岸向远海逐渐降低, 但是细胞丰度水平较春季和秋季有所下降。其中各站位中细胞丰度最高为 6# 站位(29.9 万个/m³), 最低为 9# 站位(13 万个/m³), 最高站位是最低站位的 2.3 倍, 该季节浮游植物主要由硅藻(琼氏圆筛藻和中肋骨条

藻)组成。

冬季浮游植细胞丰度水平分布同其他季节类似, 但细胞丰度水平较秋季进一步下降。各站位中细胞丰度最高 18# 站位(8.12 万个/m³), 其次为 19# 站位, 最低为 13# 站位(0.305 万个/m³), 最高站位是最低站位的 26.6 倍, 该季节浮游植物主要由硅藻(琼氏圆筛藻、中华盒形藻)组成。

整体来看, 长表岛附近海域浮游植物细胞丰度呈现由近岸向远岸逐渐降低趋势, 而不同季节的浮游植物细胞丰度水平由高到低依次排列为: 夏季、春季、秋季、冬季。

2.2.4 浮游植物丰度与环境因子的 RDA 分析

根据调查获得的水质环境、生物资料,利用蒙特卡洛检验验证浮游植物丰度和环境因子之间的关系,排除相关性小的环境因子后,选择温度、盐度、pH、溶解氧、化学需氧量、无机氮和活性磷酸盐

作为合适的环境因子,对长表岛附近海域浮游植物丰度进行去趋势分析(DCA),分析结果显示,4个轴最大长度分别为2.52、3.13、2.41、1.03,表明数据应采用基于线性模型的冗余分析(RDA)^[13]进一步分析(图3)。

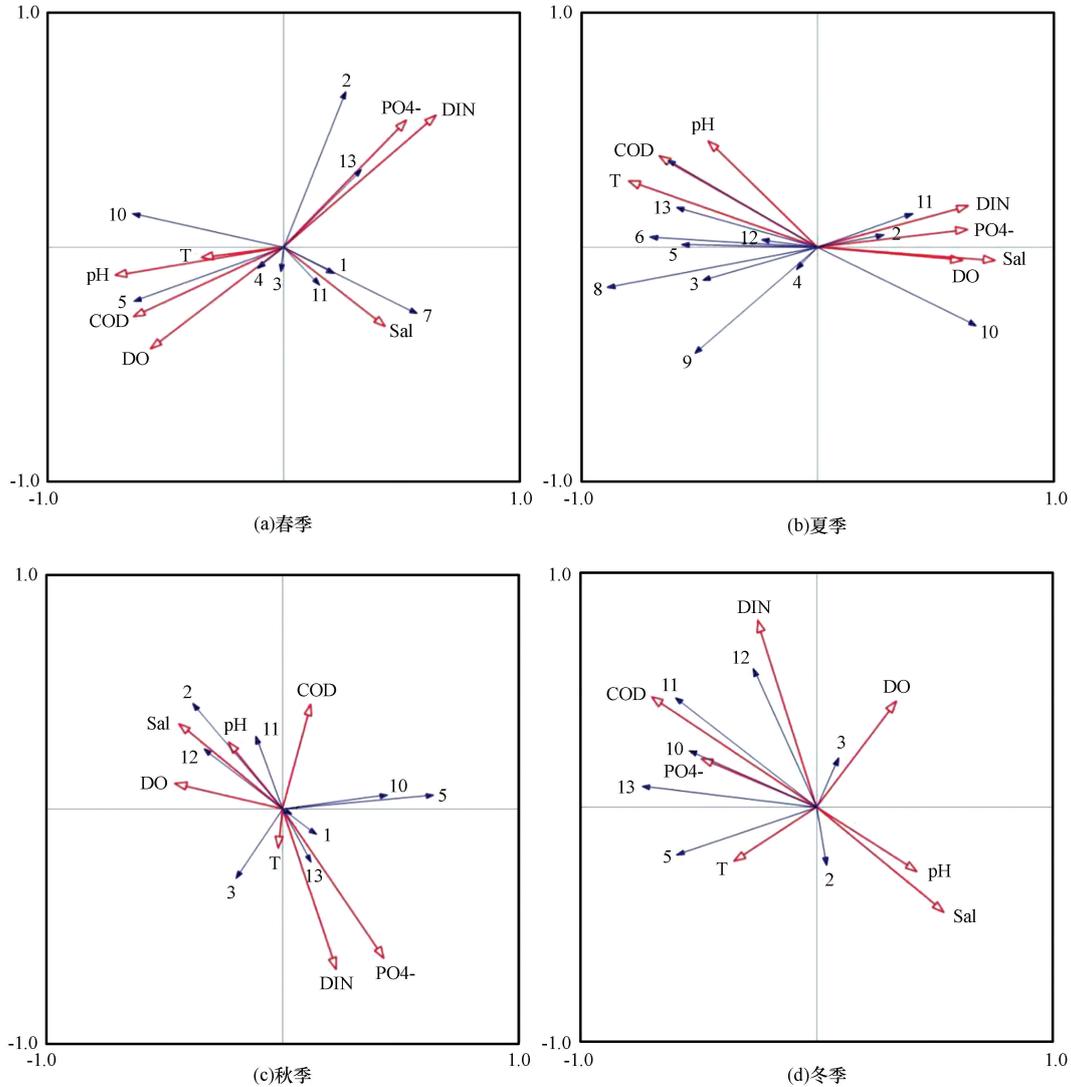


图 3 不同季节浮游植物丰度与环境因子的 RDA 分析

Fig.3 RDA analysis of phytoplankton abundance and environmental factors in different seasons

注:图中 T 为温度;Sal 为盐度;DO 为溶解氧;COD 为化学需氧量;PO4-为活性磷酸盐;DIN 为:无机氮。

浮游植物丰度与环境因子的关系分析结果如图 4 所示,春季 RDA 结果显示第一轴和第二轴累计解释了 62.7%,说明第一轴影响浮游植物分布的主要因子为温度、pH,第二轴影响浮游植物分布的因子主要为溶解氧、盐度、活性磷酸盐、无机氮。东海原甲藻表现出与盐度正相关,夜光藻与活性磷酸

盐、无机氮正相关,与 DO、COD、pH 呈现负相关。中肋骨条藻表现出与 DO、COD、pH 环境因子正相关性,琼氏圆筛藻与盐度呈负相关性,三角角藻、尖刺拟菱形藻和溶解氧、化学需氧量有显著的正相关性。

夏季 RDA 结果显示第一轴和第二轴累计解释了

88.3%，盐度、溶解氧、活性磷酸盐及无机氮主要在第一轴影响浮游植物的分布，温度、COD、pH 主要在第二轴影响浮游植物的分布，夜光藻、琼氏圆筛藻、中华盒形藻表现出与盐度、溶解氧、活性磷酸盐及无机氮显著的正相关，中肋骨条藻、扭链角毛藻、铁氏束毛藻、环纹娄氏藻与盐度、溶解氧、活性磷酸盐及无机氮表现出显著负相关性，柔弱拟菱形藻、布氏双尾藻与温度、COD、pH 表现出显著的正相关性。

秋季 RDA 结果显示第一轴和第二轴累计解释了 42.8%，盐度、溶解氧及 pH 主要在第一轴影响浮游植物的分布，COD、活性磷酸盐及无机氮主要在第二轴影响浮游植物的分布，夜光藻、中华盒形藻、卡氏角毛藻与盐度、pH 表现出显著相关性，布氏双尾藻与活性磷酸盐及无机氮表现出显著相关性，其他物种表现不明显，中肋骨条藻、琼氏圆筛藻与环境因子相关性不显著。

冬季 RDA 结果显示第一轴和第二轴累计解释了 66.2%，盐度、COD、pH 及活性磷酸盐主要在第

一轴影响浮游植物的分布，无机氮、溶解氧、温度主要在第二轴影响浮游植物的分布，琼氏圆筛藻、中华盒形藻表现出与 COD、活性磷酸盐显著相关性，卡氏角毛藻则与无机氮表现显著相关性，中肋骨条藻与温度表现出显著相关性，布氏双尾藻表现出与温度和盐度正相关。

2.2.5 浮游植物丰度与环境因子的 Person 相关性分析

根据长表岛附近海域浮游植物丰度与环境因子分析可知，春季浮游植物细胞丰度同温度、pH 呈显著正相关 ($P < 0.05$)，与其他环境因子相关性不显著；夏季因为 11# 站位中肋骨条藻的异常增多，所以与环境因子均呈现相关性不显著的现象；秋季浮游植物细胞丰度同温度呈显著正相关 ($P < 0.05$)、活性磷酸盐呈显著正相关 ($P < 0.01$)，与 pH 呈显著负相关 ($P < 0.05$)；冬季浮游植物丰度同化学需氧量呈极显著正相关 ($P < 0.01$)，同无机氮呈显著正相关 ($P < 0.05$) (表 4)。

表 4 长表岛附近海域浮游植物丰度与环境因子的 Person 相关性分析

Table 4 Seasonal variation of diversity and evenness of phytoplankton in sea waters near Changbiao Island

季节	温度 (T) r	盐度 (SAL) r	pH r	DO r	COD r	PO4 r	DIN r
春季	0.397*	-0.127	0.424*	0.319	-0.044	0.34	-0.19
夏季	0.178	-0.337	0.171	-0.128	0.046	-0.171	-0.15
秋季	0.386*	-0.095	-0.467*	-0.112	-0.069	0.589**	0.344
冬季	0.295	-0.303	-0.252	0.029	0.555**	0.304	0.413*

注：* 为显著性水平 ($P < 0.05$)；** 为显著性水平 ($P < 0.01$)。

2.2.6 群落物种多样性及季节变化

由表 5 可知，浮游植物全年多样性指数 (H') 年均变化幅度为 0.37~3.50，年平均值为 1.92，最大值和最小值均发生在夏季；均匀度指数 (J) 年均变化幅度为 0.08~0.86，年平均值为 0.48，最大值和最小值均发生在夏季；丰富度指数 (d) 年均变化幅度为 0.28~1.71，年平均值为 0.95，最小值发生在春季，最大值发生在冬季。长表岛附近海域浮游植物多样性指数、均匀度指数，说明夏季浮游植物群落结构变化更剧烈。

表 5 长表岛附近海域浮游植物多样性的季节变化

Table 5 Seasonal variation of diversity and evenness of phytoplankton in sea waters near Changbiao island

季节	多样性指数 H'		均匀度指数 J		丰富度指数 d	
	均值	变化幅度	均值	变化幅度	均值	变化幅度
春季	1.65	0.73~2.23	0.43	0.18~0.67	0.68	0.28~1.26
夏季	2.04	0.37~3.50	0.46	0.08~0.86	1.06	0.77~1.71
秋季	1.94	0.70~3.16	0.49	0.20~0.72	0.99	0.74~1.39
冬季	2.05	1.26~2.66	0.52	0.33~0.63	1.08	0.62~1.66
年平均	1.92	0.37~3.50	0.48	0.08~0.86	0.95	0.28~1.71

3 讨论

3.1 长表岛附近海域浮游植物群落结构特征

长表岛附近海域浮游植物共监测记录了 4 门 40 科 64 属 170 种,其中春季以甲藻为主,夏季、秋季和冬季则以硅藻为主。浮游植物以近岸广温广盐种和暖水种为主,具有明显的亚热带区域特征。浮游植物全年有优势种 13 种,春季以甲藻(东海原甲藻和夜光藻)为主,夏季、秋季和冬季优势种则以硅藻(中肋骨条藻和琼氏圆筛藻)为主。浮游植物优势种和丰度存在明显季节演替。不同季节的浮游植物丰度在空间分布上整体呈现近岸高、远岸低、南部低、北部高的趋势特点,造成浮游植物这样分布的特点很有可能是近岸水域营养盐丰富。

本次浮游植物调查范围更广、种类更丰富,浮游植物生态类型与曾宇兰等^[18]研究发现基本一致。唐娅菲等^[12]、叶又茵等^[19]统计发现,浮游植物多样性指数水平越高,浮游植物群落结构越稳定,本次调查发现与长表岛附近海域浮游植物多样性指数四季均值幅度为 1.65~2.05,体现出该海域浮游植物群落结构更稳定。

通过对国内外取水堵塞事件调查可知,影响核电冷源系统的致灾浮游植物主要为球形棕囊藻(*Phaeocystis globosa*)以及其他暴发的赤潮等^[9],在南海多在冬春之交季节集中暴发^[20],且球形棕囊藻优势度最高达到 99%^[21]。而福建海域浮游植物丰度和优势度要在春季和夏季才能达到暴发,由此推测长表岛海域核电在春季和夏季仍有一定风险,应重点在春季和夏季对赤潮优势种(东海原甲藻、中肋骨条藻和琼氏圆筛藻)的监测。

3.2 环境因子对长表岛附近海域浮游植物的影响

调查海域水温明显受季节影响,夏季温度最高,春季、秋季和冬季呈递减趋势;盐度全年含量都较高(28.903‰~32.163‰);活性磷酸盐含量在秋季和冬季较高,春季和夏季较低(表 1)。随着水温的季节变化的过程中,浮游植物优势种出现明显的演替,春季以东海原甲藻为主,夏季以中肋骨条藻为主,秋季以琼氏圆筛藻和中肋骨条藻为主,冬季以琼氏圆筛藻和中华盒形藻为主。浮游植物丰度整体呈近岸高、近海低、南部低、北部高,浮游植物

细胞丰度水平不同季节对比可知,浮游植物细胞丰度由高到低依次排列为:夏季、春季、秋季、冬季。

Partensky 等^[22]Dupuis 等^[23]研究发现,温度、盐度、营养盐、光照强度不仅影响浮游植物的生长和分布,还会通过和其他理化因子相互作用,从而进一步影响海洋中浮游植物群落的分布。因为理化因子变化从而影响着浮游植物分布方式,造成浮游植物群落结构呈现明显的季节演替现象,春季以甲藻为主,夏季、秋季和冬季以硅藻为主。

春季水质环境整体呈现高溶解氧、高盐、低温、低营养盐特点,为浮游植物提供了良好的生存环境,尤其是温度,与浮游植物丰度呈显著正相关。此次调查浮游植物平均浓度为 549 万个/m³,和优势种与历史调查基本一致,优势种仍然以甲藻(东海原甲藻和夜光藻)为主。

夏季,温度大幅度上升,盐度有所增加,优势种全部为硅藻发生明显的演替,且优势种无一种甲藻,说明温度上升和盐度的增加导致广温广盐种硅藻得到大量繁殖生长,本次调查站位最大值,较 2012 年全汉峰等^[13]调查,最大站位植物丰度(1 298.73 万个/m³)高出两个数量级,浮游植物丰度分布比较类似也是在近岸高、近海低。另外,优势种也有不同,本次调查发现主要优势种为中肋骨条藻,优势度达($y=0.45$)而非条纹小环藻,这个很有可能当时调查时间为 8 月而本次调查时间为 9 月,水温进一步升高,中肋骨条藻得到进一步繁殖。

秋季,随着水温和盐度的降低,各个硅藻丰度开始下降,中肋骨条藻丰度开始下降,琼氏圆筛藻丰度不断繁殖增加,优势度超过中肋骨条藻,成为第一优势种,优势度达到 0.28。秋季浮游植物丰度与活性磷酸盐呈极显著相关性。

冬季,水温进一步降低、营养盐消耗殆尽,此时藻类优势种仍然以琼氏圆筛藻为主,中华盒形藻也不断繁殖,成为第二优势种,优势度达 0.33。浮游植物丰度同化学需氧量呈极显著正相关、同无机氮呈显著正相关。

同四季不同植物丰度和环境因子对比分析,潘玉龙^[24]调查黄骅港附近海域浮游植物群落结构时发现,浮游植物丰度与水温、磷酸盐、pH 等整体上

呈正相关;陈国斌等^[25]研究显示福宁湾海域浮游植物丰度与水温、磷酸盐呈显著正相关;唐娅菲等^[12]发现三沙湾浮游植物细胞丰度与水温呈显著正相关。本研究调查也发现浮游植物丰度与水温明显呈正相关。温度直接影响浮游植物代谢、繁殖进而影响浮游植物的生物量和分布^[24]。

季节环境因子与浮游植物丰度相关性分析发现除水温外,营养盐也影响着浮游植物丰度时空分布,随着温度的逐渐回暖,适宜的温度和营养盐促进春季和夏季浮游植物的生长繁殖^[26]。在对千岛湖海域的调查中也发现春季和秋季浮游植物群落结构与营养盐含量有关^[27]。因此该海域春季和夏季浮游植物丰度主要受水温和营养盐影响,而秋季和冬季主要受温度影响。

4 结论

本研究探究了福建霞浦长表岛湾附近海域的

浮游植物多样性组成、时空分布及其与环境因子的关系,完善和丰富了该海域浮游植物生态学研究的空间。得出以下结论。

(1)长表岛附近海域浮游植物种类组成数量、优势种、丰度存在明显季节变化,全年共记录了170种,浮游植物以近岸广温广盐种和暖水种为主,全年有优势种有13种,春季以东海原甲藻和夜光藻为主,夏季、秋季和冬季以中肋骨条藻和琼氏圆筛藻为主。浮游植物丰度在空间分布上整体呈现近岸高、远岸低、南部低、北部高的趋势特点。

(2)浮游植物季节动态变化主要受水温影响;春季和夏季适宜的温度与营养盐促进了浮游植物的大量增长,秋季和冬季则主要受到温度的影响。

(3)浮游植物大量繁殖增长甚至暴发出现在春季和夏季,霞浦长表岛海域滨海核电应在春季和夏季重点加强该海域赤潮的预警监测。

参考文献(References):

- [1] SOMMER U, ADRIAN R, DOMIS S D L, et al. Beyond the plankton ecology group (PEG) model: mechanisms driving plankton succession[J]. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 2012, 43(1): 429-448.
- [2] 陈应华. 大亚湾大辣甲南人工鱼礁区的生态效应分析[D]. 广州:暨南大学, 2009.
CHEN Yinghua. Analysis of ecological effects of southern Dalajia Island artificial reef area in Daya Bay [D]. Guangzhou: Jinan University, 2009.
- [3] 周名江, 颜天. 中国海洋生态毒理学的研究进展[J]. *环境科学研究*, 1997(3): 6-11.
ZHOU Mingjiang, YAN Tian. Progress in marine eco-toxicology study in China[J]. *Environmental Sciences*, 1997(3): 6-11.
- [4] 李士虎, 吴建新, 李庭古, 等. 赤潮的危害、成因及对策[J]. *水利渔业*, 2003(6): 38-39.
LI Shihu, WU Jianxin, LI Tinggu, et al. Harm, causes and countermeasures of red tide[J]. *Water Fishery*, 2003(6): 38-39.
- [5] 邹景忠, 董丽萍, 秦保平. 渤海湾富营养化和赤潮问题的初步探讨[J]. *海洋环境科学*, 1983(2): 41-54.
ZOU Jingzhong, DONG Liping, QIN Baoping. Preliminary study on eutrophication and red tide in Bohai Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 1983(2): 41-54.
- [6] 胡国成. 我国沿海赤潮发生的原因及其危害[J]. *中国水产*, 2006(2): 73-74.
HU Guocheng. Causes and hazards of red tide in coastal areas of China [J]. *China Fisheries*, 2006(2): 73-74.
- [7] 古中博. 赤潮灾害及其综合防治的生态、经济与管理研究[D]. 青岛:中国海洋大学, 2010.
GU Zhongbo. Study on ecology, economy and management of red tide disaster and its integrated control[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.
- [8] 陈洋. 有害赤潮对海洋浮游生态系统结构和功能影响的初步研究[D]. 青岛:中国科学院研究生院(海洋研究所), 2005.
CHEN Yang. Preliminary research of the effects of Harmful Algal Bloom on structure and function of pelagic ecosystem[D]. Qingdao: Graduate School of Chinese Academy of Sciences(Institute of Oceanography), 2005.
- [9] 唐娅菲. 滨海核电运行安全典型致灾生物研究[D]. 上海:上海海洋大学, 2018.
TANG Yafei. Study on typical disaster-causing biomass of coastal nuclear power operation safety[D]. Shanghai :Shanghai Ocean University, 2018.
- [10] 张朝文, 关春江, 徐鹏, 等. 辽东湾东部海域核电冷源取水区的风险生物分析[J]. *海洋环境科学*, 2019(1): 41-45.

- ZHANG Chaowen, GUAN Chunjiang, XU Peng, et al. Analysis on risk organisms for the cold source water of nuclear power plant in the eastern waters of Liaodong Bay[J]. *Marine Environmental Science*, 2019(1): 41–45.
- [11] 贺立燕, 宋秀贤, 於凡, 等. 潜在影响防城港核电冷源系统的藻类暴发特点及其监测防控技术[J]. *海洋与湖沼*, 2019(3): 700–706.
HE Liyan, SONG Xiuxian, YU Fan, et al. Potential risk and prevention of phytoplankton outbreak to water-cooling system in nuclear power plant in Fangchenggang, Guangxi[J]. *Oceans and Lakes*, 2019(3): 700–706.
- [12] 唐娅菲, 王金辉, 程宏, 等. 三沙湾春季浮游植物群落结构及其与环境因子的关系[J]. *上海海洋大学学报*, 2018(4): 522–530.
TANG Yafei, WANG Jinhui, CHENG Hong, et al. Community structure of phytoplankton and its relationship with environmental factors of Sansha Bay in spring[J]. *Journal of Shanghai Ocean University*, 2018(4): 522–530.
- [13] 全汉锋, 单秀娟, 戴芳群. 福宁湾浮游植物的群落结构特征[J]. *渔业科学进展*, 2015(3): 1–7.
QUAN Hanfeng, SHAN Xiujuan, DAI Fangqun. The community structure of the phytoplankton in the Funing Bay[J]. *Progress in Fishery Science*, 2015(3): 1–7.
- [14] 张文斌, 孙伟, 许歆, 等. 某核电厂附近海域生态环境特征及潜在致灾生物研究[J]. *海洋科学*, 2022(7): 32–43.
ZHANG Wenbin, SUN Wei, XU Xin, et al. Ecological environment and the potential hazard-causing organisms in the sea area near the nuclear power plant[J]. *Marine Science*, 2022(7): 32–43.
- [15] SHANNON C E. The mathematical theory of communication[J]. *MD Comput*, 1997, 14(4): 306–17.
- [16] 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(1): 62–75.
SUN Jun, LIU Dongyan. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies [J]. *Haiyang Xuebao*, 2004(1): 62–75.
- [17] LEPS J, SMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2003.
- [18] 曾宇兰, 陆斗定, 王鹏斌, 等. 2018年春季福建近海浮游植物群落结构变化[J]. *广东海洋大学学报*, 2020(2): 53–63.
ZENG Yulan, LU Douding, WANG Pengbin, et al. Variation of phytoplankton community structure in the coastal water of Fujian in Spring 2018[J]. *Journal of Guangdong Ocean University*, 2020(2): 53–63.
- [19] 叶又茵, 项鹏, 王雨, 等. 福建 6 个港湾浮游植物多样性及其与水系的关系[J]. *生物多样性*, 2017(3): 285–293.
YE Youyin, XIANG Peng, WANG Yu, et al. Phytoplankton diversity and its relationship with currents in the six bays of Fujian[J]. *Biological Diversity*, 2017(3): 285–293.
- [20] 於凡, 许波涛, 吴昕, 等. 基于核电冷源安全的海洋生物调查及筛选评价方法研究[J]. *海洋环境科学*, 2021(1): 139–143.
YU Fan, XU Botao, WU Xin, et al. Study on the method of marine organisms investigation, screening and evaluation based on nuclear power plant cold source safety[J]. *Marine Environmental Science*, 2021(1): 139–143.
- [21] 徐姗姗, 林华剑, 戴明, 等. 广西近岸海域浮游植物群落的生态特征[J]. *生态学杂志*, 2014(10): 2733–2739.
XU Shannan, LIN Huajian, DAI Ming, et al. Ecological characteristics of phytoplankton community in Guangxi coastal area [J]. *Journal of Ecology*, 2014(10): 2733–2739.
- [22] PARTENSKY F, BLANCHOT J, VAULOT D. Differential distribution and ecology of prochlorococcus and synechococcus in oceanic waters: a review[J]. *Marine Cyanobacteria Numero Special*, 1999(19): 457–475.
- [23] DUPUIS A P, HANN B J. Warm spring and summer water temperatures in small eutrophic lakes of the Canadian prairies: potential implications for phytoplankton and zooplankton[J]. *Journal of Plankton Research*, 2009(5): 489–502.
- [24] 潘玉龙, 孙萍, 张珺, 等. 黄骅港附近海域浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J]. *海洋环境科学*, 2022(1): 142–148.
PAN Yulong, SUN Ping, ZHANG Jun, et al. Community structures of phytoplankton and its relationship with environmental factors in adjacent waters of Huanghua port [J]. *Marine Environmental Science*, 2022(1): 142–148.
- [25] 陈国斌, 戴红, 李伏庆. 福建省三都湾赤潮监控区福宁湾浮游植物的生态[J]. *台湾海峡*, 2004(4): 469–480.
CHEN Guobin, DAI Hong, LI Fuqing. Phytoplankton ecology in Funing Bay, Sandu Bay red tide monitoring area, Fujian Province[J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2004(4): 469–480.
- [26] 黄旭光, 郭东晖, 肖武鹏, 等. 九龙江口春季微型浮游生物数量变动及其与小型水母消长的关系[J]. *海洋与湖沼*, 2012, 43(3): 579–583.
HUANG Xuguang, GUO Donghui, XIAO Wupeng, et al. The relationship between quantitative changes of microplankton and population dynamics of small medusa in the Jiulong river estuary in spring of 2011[J]. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2012, 43(3): 579–583.
- [27] 王吉毅. 千岛湖浮游植物群落结构时空分布格局与营养盐的相关性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2022.
WANG Jiyi. Correlation between spatial and temporal distribution pattern of phytoplankton community structure and nutrients in Qiandao Lake[D]. Harbin: Harbin Normal University, 2022.