

Doi:10.20062/j.cnki.CN 37-1453/N.2025.01.005

烟威风电场建设海域夏季浮游植物群落结构 与环境因子的相关性研究

杨晓彤^{1a,2},赵丽华³,王岩²,李敏^{1b},吕振波^{1b},崔雯慧^{1b},蒋文良^{1b},高梦娟^{1b}

(1.鲁东大学 a.水产学院;b.滨海生态高等研究院,山东烟台 264039;2.烟台市牟平区渔业技术推广站,山东烟台 264199;
3.日照市东港区渔业技术推广站,山东日照 276800;)

摘要:为更好地了解风电场建设对临近海域浮游植物群落的影响,本文基于三峡山东牟平 BDB6#一期海上风电项目浮游植物以及环境因子的调查,分析了风电场建设期间浮游植物群落结构及其环境因子的相关性。结果显示,在工程建设期,共采集浮游植物 15 种,以广温广盐型、近岸型为主,也有少数高温外海型浮游植物,其中粗刺角藻(*Ceratium horridum*)、三角角藻(*Ceratium tripos*)占绝对优势。物种多样性指数(H')、物种均匀度指数(J')、物种丰富度指数(D)平均值分别为 1.57、0.68、0.80,与历史资料相比,差异不显著。等级聚类和非度量多维标序表明,对组间差异性贡献较大的分歧种有旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、格氏圆筛藻(*Coscinodiscus granii*)、佛氏海毛藻(*Thalassiothrix frauenfeldii*)等硅藻。冗余分析(RDA)表明,物种均分布在排序轴右侧,受硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)、盐度(Sal)、油类(Oil)、铬(Cr)以及悬浮物(SS)等环境因子的综合影响,风电场施工对其影响有限。

关键词:烟威海域;海上风电;浮游植物;群落结构;环境相关性

中图分类号:S932.7 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-8020(2025)01-0031-08

山东省是海洋强省,海洋资源得天独厚,海上风电作为海洋经济的重要组成部分,在提供清洁能源、促进能源结构调整、改善国民膳食结构、推动供给侧结构性改革和新旧动能转换等方面具有重要意义。烟威地区海岸线长约 1300 km^[1],沿海岛屿、港湾星罗棋布,濒临黄海,拥有丰富的海洋资源。烟威渔场由于地处渤海海峡,受暖流、山东沿岸流等因素影响,是各种鱼虾类进出渤海的洄游通道和产卵、索饵场所,盛产刺参(*Stichopus japonicus*)、栉孔扇贝(*Chlamys farreri*)、海湾扇贝(*Argopecten irradians*)、长牡蛎(*Ostreidae*)、鲈(*Pneumatophorus japonicus*)、蓝点马鲛(*Scomberomorus*)、口虾蛄(*Oratosquilla oratoria*)、三疣梭子蟹(*Portunidae*)等海产品,浮游植物生态类型主要以温带近岸种和广布性种为主^[2]。目前已建有三峡新能源海上风电项目(2022 年 12 月开工,2023 年 11 月完工),在建上海电气半岛北 N2 场址以及华能半岛北 L 场址海上风电项目。海上风能资源的开发和利用对海洋生态环境的影响备

受关注,研究显示,海水流经风电机组桩基和半潜式平台时,迎流面会产生上升流,冲刷底质,底层营养盐上涌与表层海水充分交换,促进各种浮游植物生长,从而诱集各类海洋生物前来索饵,形成高度复杂的食物链^[3]。高扬^[4]以江苏风电工程为研究对象,发现海上风电工程导致浮游植物密度总体升高。吴兆娣^[5]发现,风电建成后水下基础部分会为藤壶(*Balanus*)以及一些贝类提供更接近水面的附着基质,波浪会导致接近地表的水体运动幅度更大,从而也提高了浮游植物的更新率,进而促进贝类生长,提高贝类生物量。也有学者认为,风电场建设过程中,除了建设区域的底栖生物有损失外,风电塔的基础设施建设会使得一定范围内的悬浮沉积物增加,从而削弱浮游植物及藻类的光合作用^[6]。

研究风电工程海域浮游植物群落结构,有助于全面了解工程建设期浮游植物种类组成及其环境因子相关性,并进一步探明风电场建设对浮游植物群落结构的潜在影响。基于此,本文从浮游

收稿日期:2024-07-12;修回日期:2024-10-25

通信作者简介:杨晓彤(1994—),女,经济师,研究方向为渔业资源。E-mail:yangxiaotong0715@163.com

植物群落结构特征及其环境因子相关性的研究主线出发,利用浮游植物及环境调查数据,采用优势度指数(Y)、物种丰富度指数(D)、物种多样性指数(H')、物种均匀度指数(J')、等级聚类(CLUSTER)和非度量多维标度分析(NMDS)以及冗余分析(RDA)等方法对该海域浮游植物群落结构及其与环境因子的关系进行分析,研究生物多样性和群落结构聚类特征,探讨优势种与环境因子的相关性。本研究旨在通过调查研究,为风电工程对浮游植物的潜在影响研究提供数据基础。

1 样品采集与分析方法

1.1 数据来源

以三峡山东牟平 BDB6#一期(300 MW)海上风电场所在海域为研究区域($37^{\circ}41.748'N \sim 37^{\circ}58.342'N$, $121^{\circ}42.414'E \sim 121^{\circ}53.835'E$),于 2023 年 7 月在风电场建设海域布设 10 个资源环

境调查站位(图 1)。浮游植物采样和分析方法按《海洋监测规范》(GB 17378—2007)和《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)中的有关技术要求进行^[7],用浅水Ⅲ型浮游生物网自底至表垂直拖曳获得,经碘液固定、保存,显微镜下观察进行种类鉴定,个体记数;海水水文及水质指标观测、采样和分析方法按《海洋监测规范》(GB 17378—2007)和《海洋调查规范》(GB/T 12763—2007)中的有关技术要求进行^[8]。

1.2 分析方法

1.2.1 优势度指数

用浮游动植物优势度 Y 指数分析群落中的优势种^[9]。计算公式为:

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

式中: n_i 表示第 i 种的个体数; N 为物种总个体数; f_i 表示第 i 种个体的出现频率。选取 $Y \geq 0.02$ 的物种作为优势种群。

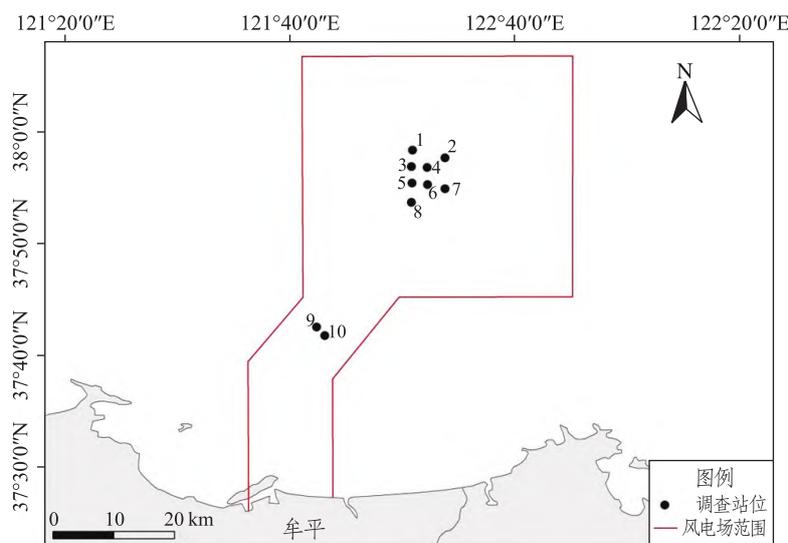


图 1 烟威风电场建设海域浮游植物调查站位图

Fig.1 Location map of phytoplankton survey stations in the construction area of Yanwei Wind Farm

1.2.2 生物多样性指数

采用物种丰富度指数(D)、物种多样性指数(H')、物种均匀度指数(J')表征物种多样性^[8]。

物种丰富度指数计算公式为:

$$D = \frac{S - 1}{\ln N}, \quad (2)$$

式中: S 表示种类数; N 表示样品中个体总数。

物种多样性指数 H' 计算公式为:

$$H' = - \sum_i^p \ln P_i, \quad (3)$$

式中: P_i 表示 i 物种在群落中所占的比例。

物种均匀度指数 J' 计算公式为:

$$J' = \frac{H'}{\ln S}, \quad (4)$$

式中: H' 表示物种多样性指数; S 表示种类数。

1.2.3 聚类分析

利用 CLUSTER 分析和 NMDS 分析来研究浮游植物群落结构,用胁强系数(stress)来衡量分析结果的有效性^[10],压力值范围设定为:分析结果有解释意义($>0.1 \sim 0.2$);结果基本可信($>0.05 \sim 0.1$);结果非常有效(≤ 0.05)。造成各组内群落结构相似的典型种和各组间群落结构差异的分歧种,利用相似性百分比(SIMPER)来进行分析。

1.2.4 环境因子相关性分析

用 CANOCO 5.0 分析浮游植物群落结构与环境因子的关系,首先对浮游植物优势种数据与环境因子数据进行 $\lg(x+1)$ 转换,转换后的数据进行去趋势分析(DCA),若第一轴长小于 4 则选用冗余分析(RDA),大于 4 则选择典型关联分析(CCA)^[11],探究浮游植物与环境因子的相关性。

2 结果分析

2.1 种类组成与优势种分布

浮游植物用浅海Ⅲ型标准浮游生物网采集,采用优势度指数对群落优势种进行分析。在研究区域共采集浮游植物 15 种,其中,甲藻 5 种,分别是叉状角藻(*Ceratium furca*)、粗刺角藻(*Ceratium horridum*)、三角角藻(*Ceratium tripos*)、梭角藻(*Ceratium fusus*)、夜光藻(*Noctiluca scintillans*),其余 10 种为硅藻。优势种有甲藻门的粗刺角藻、三角角藻、梭角藻、夜光藻 4 种,硅藻门的角毛藻(*Chaetoceros* sp.)、洛氏角毛藻(*Chaetoceros lorenzianus*) 2 种。具体如表 1 所示。

2.2 群落多样性特征

本次研究采用物种丰富度指数(D)、物种多样性指数(H')、物种均匀度指数(J')分析浮游植物物种多样性,见表 2。结果显示, H' 平均值为 1.57,变化范围为 1.48~1.71, J' 平均值为 0.68,变化范围 0.64~0.73, D 平均值为 0.80,变化范围 0.59~0.98。

2.3 群落结构特征

利用 CLUSTER 分析和 NMDS 分析对浮游植物群落结构特征进行分析。结果显示,多维尺度分析的压力值为 0.09,小于 0.1,表明浮游植物群

落的分组结果基本可信。

表 1 烟威风电场建设海域浮游植物种类名录与优势度指数
Tab.1 List and dominance indexes of planktonic plant species in the construction area of Yanwei Wind Farm

类别	物种	拉丁名	优势度指数
甲藻	叉状角藻	<i>Ceratium furca</i>	0
	粗刺角藻	<i>Ceratium horridum</i>	0.411 0
	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	0.305 3
	梭角藻	<i>Ceratium fusus</i>	0.072 1
	夜光藻	<i>Noctiluca scintillans</i>	0.036 8
硅藻	佛氏海毛藻	<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	0.004 3
	格氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus granii</i>	0.000 7
	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	0.044 7
	洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	0.090 8
	曲舟藻	<i>Pleurosigma</i> sp.	0.001 6
	星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	0.006 9
	旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	0.002 3
	圆筛藻	<i>Coscinodiscus</i> sp.	0.009 3
	中华盒形藻	<i>Biddulphia sinensis</i>	0
	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	0.000 2

表 2 烟威风电场建设海域浮游植物群落多样性
Tab.2 Diversity of planktonic plant communities in the construction area of Yanwei Wind Farm

站位	物种多样性指数(H')	物种丰富度指数(D)	物种均匀度指数(J')
1	1.71	0.98	0.69
2	1.48	0.72	0.67
3	1.60	0.81	0.69
4	1.60	0.89	0.69
5	1.58	0.79	0.69
6	1.54	0.89	0.64
7	1.54	0.72	0.70
8	1.64	0.88	0.68
9	1.48	0.69	0.64
10	1.52	0.59	0.73

按照 85% 相似水平可将浮游植物划分为 2 个组群(如图 2),1 号、4 号、6 号站位为 1 组,剩余站位为 2 组。相似性百分比分析表明,对 1 组组群相似性贡献率较大的物种($>10\%$)有粗刺角藻、三角角藻、洛氏角毛藻、梭角藻,相似性累计贡献率达 55.9%,对 2 组浮游植物组群相似性贡献率较大的物种($>10\%$)有粗刺角藻、三角角藻、洛氏角毛藻、梭角藻、角毛藻,相似性贡献率累计达 71.85%。对组间差异贡献较大的分歧种如表 3 所示,其中旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、格氏圆筛藻(*Coscinodiscus granii*)、佛氏海毛藻(*Thalassiothrix frauenfeldii*)等硅藻类对组间差异性贡献较大($>10\%$)。

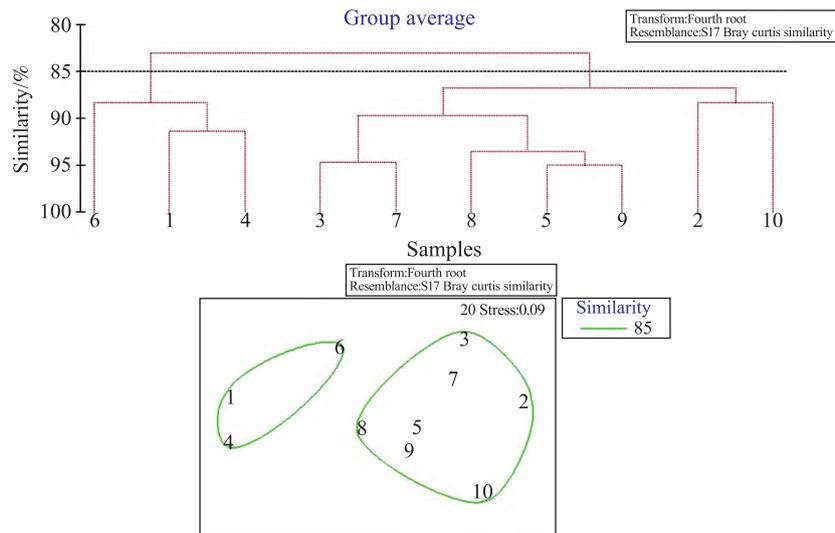


图 2 烟威风电场建设海域浮游植物聚类与 NMS 分析结果

Fig.2 Analysis results of CLUSTER and NMS on planktonic plants in the construction area of Yanwei Wind Farm

表 3 烟威风电场建设海域浮游植物组群间分歧种及其差异性贡献百分比

Tab.3 Divergent species and their differential contribution percentages among phytoplankton communities in the construction area of Yanwei Wind Farm

种类	拉丁名	浮游植物组间差异/%	种类	拉丁名	浮游植物组间差异/%
旋链角毛藻	<i>Chaetoceros curvisetus</i>	24.54	中肋骨条藻	<i>Skeletonema costatum</i>	7.42
格氏圆筛藻	<i>Coscinodiscus granii</i>	13.52	洛氏角毛藻	<i>Chaetoceros lorenzianus</i>	3.98
佛氏海毛藻	<i>Thalassiothrix frauenfeldii</i>	11.86	粗刺角藻	<i>Ceratium horridum</i>	3.16
曲舟藻	<i>Pleurosigma</i> sp.	9.57	角毛藻	<i>Chaetoceros</i> sp.	2.83
星脐圆筛藻	<i>Coscinodiscus asteromphalus</i>	8.12	三角角藻	<i>Ceratium tripos</i>	2.75

2.4 环境因子相关性

对研究海域环境因子进行测定,环境因子包括 pH 值、溶解氧(DO)、盐度(Sal)、化学需氧量(COD)、悬浮物(SS)、石油类(Oil)、活性磷酸盐(DIP)、氨氮(NH₃-N)、亚硝酸盐(NO₂-N)、硝酸盐(NO₃-N)以及重金属。结果如图 3 所示。

对浮游植物优势种进行物种-丰度矩阵进行去趋势对应分析(DCA),梯度长度的最大值为 0.05,故选用 RDA 排序方法探讨群落结构与环境因子的关系。利用 CANOCO 5.0 软件使用蒙特卡洛检验,筛选出对浮游植物群落结构影响贡献率较大的环境因子。

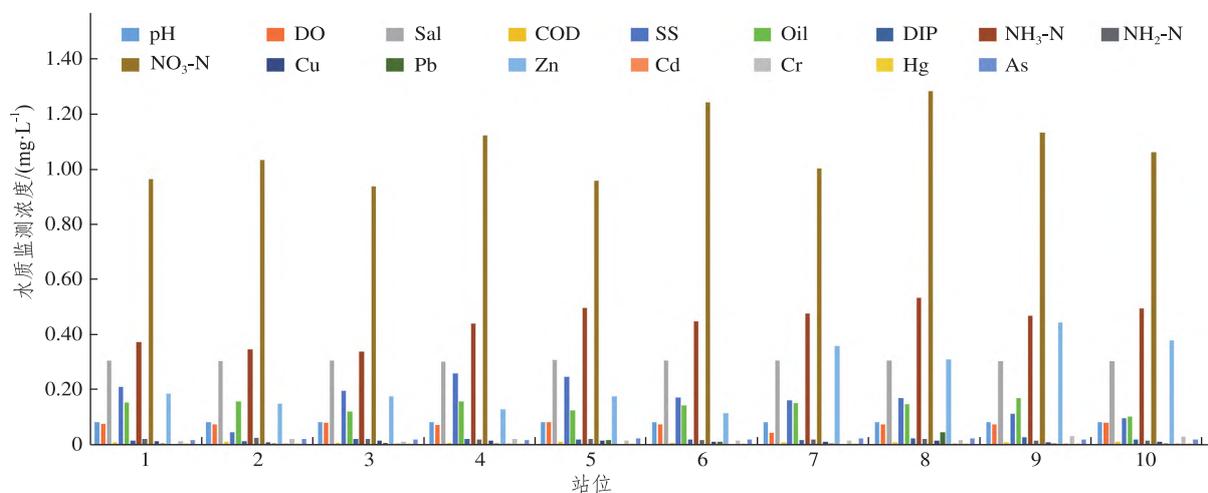
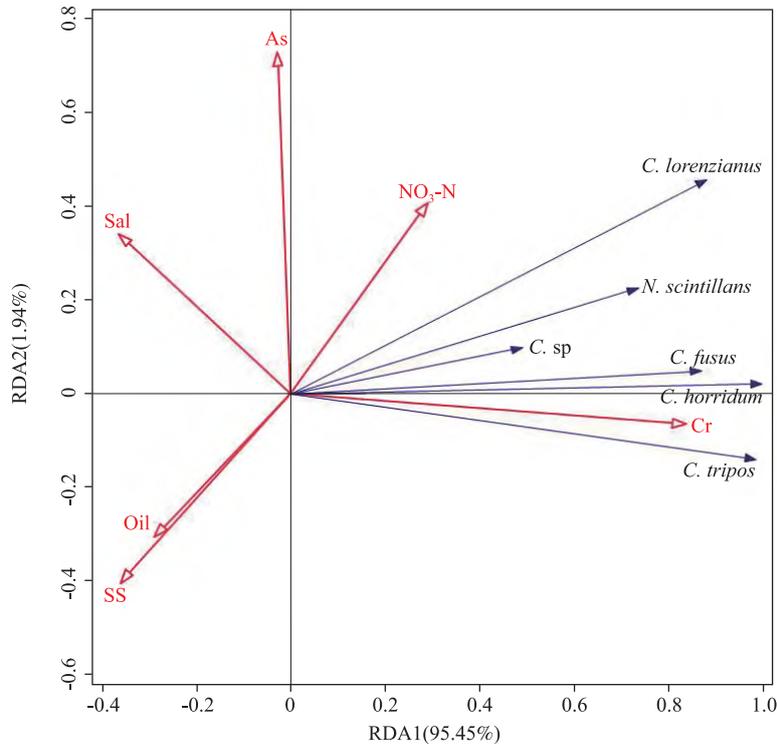


图 3 烟威风电场建设海域环境因子调查结果

Fig.3 Investigation results of environmental factors in the construction area of Yanwei Wind Farm

图 4 为烟威风电场建设海域浮游植物优势种与环境因子的 RDA 排序结果。RDA1 特征值为 0.954 5,解释物种变量为 95.45%,RDA2 特征值为 0.019 4,解释物种变量为 1.94%,排序图前两轴共解释了 97.40%的物种变化。物种均分布在排序轴右侧,洛氏角毛藻(*C. lorenzianus*)、夜光藻(*N. scintillans*)、

illans)、角毛藻(*C. sp.*)的分布与硝酸盐($\text{NO}_3\text{-N}$)以及重金属砷(As)浓度具有正相关性,但是与 As 的正相关性较弱,与盐度(Sal)、油类(Oil)以及悬浮物(SS)具有负相关性;梭角藻(*C. fusus*)、粗刺角藻(*C. horridum*)、三角角藻(*C. tripos*)的分布与铬(Cr)浓度具有正相关性,与 Sal、Oil、SS 具有负相关性。



注:*C. lorenzianus*, 洛氏角毛藻;*N. scintillans*, 夜光藻;*C. sp.*, 角毛藻;*C. fusus*, 梭角藻;*C. horridum*, 粗刺角藻;*C. tripos*, 三角角藻。

图 4 烟威风电场建设海域浮游植物与环境因子相关性 RDA 排序

Fig.4 RDA ranking of the correlation between phytoplankton and environmental factors in the construction area of Yanwei Wind Farm

3 讨论

3.1 种类组成及优势种

本研究调查海域位于烟威海域,地处烟台市牟平区北部,项目周边主要包括自然保护区、海洋公园、养殖区、海岛等,与威海相邻。2023 年 7 月,调查海域浮游植物以甲藻门为主。与常启歌^[12]在 2022 年威海近岸以及中科院牟平海岸带环境综合试验站长期在线监测结果一致^[13]。此外,工程海域附近分布有筏式养殖区,扇贝养殖海域浮游植物结构以硅藻-甲藻型为主,它们属于温水和广温性浮游植物^[14],牟平海域地处中纬度地区,四季分明,温度尤其表层水温对其影响较大,程玲等^[15]通过环境因子相关性分析发现,四

十里湾调查海域甲藻丰度与表层水温呈极显著正相关,表层水温为影响该海域甲藻丰度的决定因素,表层水温最高的 8 月,甲藻丰度达全年最高值,与本研究结果类似。风电工程的建设未对浮游植物种类以及优势种分布产生明显影响,但是也有研究发现,风电工程致使浮游植物优势种数目减少,在施工期表现的最明显^[4]。

3.2 群落结构特征

聚类分析结果显示,对组内相似性贡献率较大的物种均为粗刺角藻、三角角藻、洛氏角毛藻,其中粗刺角藻、三角角藻占绝对优势。粗刺角藻属暖海外洋性、高温高盐性质的种类^[16-17],三角角藻属高温外海型浮游植物^[18],洛氏角毛藻属夏季暖水性种类^[19],是温带至热带近岸性种,分布范围广,在中国海域均产,夏、秋季数量很多^[20]。

对组间差异贡献率较大的物种有旋链角毛藻、格氏圆筛藻、佛氏海毛藻等硅藻类。旋链角毛藻是广温性沿岸种类^[21],格氏圆筛藻属于广温性藻类^[22],佛氏海毛藻属外洋广温性种类^[23],适应性较强。7—8 月份,调查海区具有亚热带海洋性气候特征,温度在 25 ~ 32 ℃、盐度在 30.114 ~ 30.586 之间,周边临近养马岛天然海水浴场、牟平国家级沙质海岸保护区,历来是浮游植物的索饵、繁殖场所,加之沿岸沁水河等河流众多,水体营养盐丰富,是比较理想的海洋农牧化基地。综上可知,调查海域浮游植物种类以广温广盐型、近岸型为主,也有少数高温外海型浮游植物。

群落物种多样性是衡量浮游植物群落稳定性的重要尺度,风电区的浮游植物多样性指数、均匀度指数和丰富度指数,与同期历史资料^[1]相比无显著差异。推测是因为海上风电桩投放时间较短,风电区的浮游生物群落仍处于发展阶段,群落结构尚未达到稳定状态。但是,王舒奕^[24]在庄河风电场研究中发现,风电区内的浮游植物丰度高于对照区,例如优势种中的海生斑条藻(*Gracilariopsis lemaneiformis*)属于趋礁性藻类,一定程度上说明了风电区的群落结构复杂性要略高于对照区。Wilhelmsson 等^[25]发现在风电桩基的水下部分和邻近区域形成类似于人工鱼礁生态系统,使周围的海洋生物之间相互作用,影响,从而提高了浮游植物的生长率,促进贝类的生长。但这个过程是漫长的,可能需要十几年、甚至几十年的时间。

3.3 环境因子相关性分析

洛氏角毛藻、夜光藻、角毛藻的分布与 $\text{NO}_3\text{-N}$ 质量浓度呈显著正相关,与 As 质量浓度具有正相关性,但是相关性不是很大,与 Sal、Oil 质量浓度具有负相关性;洛氏角毛藻、夜光藻属于暖水广盐性类群^[26],氮磷等营养盐质量浓度不会直接对夜光藻的生长繁殖产生影响,但其质量浓度的升高可以提高浮游植物丰度,以提供丰富饵料的方式对夜光藻的生长繁殖产生间接的影响^[27],有研究发现,As 主要是通过影响浮游植物的群落变化以及食物链、食物网的富集和传递,间接地影响浮游动物^[28],夜光藻大量生长也显著影响了 As 与水体环境之间的相关性,这一现象可能受夜光藻对金属离子的吸附以及对其他浮游植物的摄食或抑制等影响^[29],且浮游植物在一定条件下具有解毒性^[30],所以 As 污染并没有显著影响浮游植物群落,而与盐度、悬浮

物的质量浓度负相关,表明夏季由于适宜的水温和雨季里沁水河入海营养盐含量的增加,使得这些种类适应牟平海域低盐、营养盐丰富的环境^[31]。水体悬浮物的适量增大可以促进浮游植物的生长,当悬浮物含量达到一定阈值后,会对浮游植物产生抑制作用,导致种群生长率下降^[32]。

梭角藻、粗刺角藻、三角角藻的分布与 Cr 的质量浓度具有正相关性,与 Sal、Oil、SS 的质量浓度具有负相关性。调查海域重金属中 Cr 的质量浓度有所上升,推测是因为风电机组的高强度连接螺栓,如基础锚固螺栓、叶片与轮毂的连接螺栓、塔筒每节的连接螺栓等通常采用达罗克技术(或无铬锌铝涂层技术)来进行防腐蚀处理^[33],风电工程的施工增加了梭角藻、粗刺角藻、三角角藻等甲藻生长海域中 Cr 的质量浓度。另外,悬浮物是影响该风电场建设海域生态环境的关键因子之一,风电工程施工,会产生大量的泥沙等悬浮物,导致局部海域悬浮物增加^[34]。徐兆礼等^[35]通过试验发现悬浮物影响水体的透明度,从而影响甲藻等浮游植物的光合作用,对浮游植物的生长起到抑制作用。甲藻类的梭角藻、三角角藻与温度和盐度的相关性范围较大,为广温广盐的物种,四季都存在,只是在夏季和秋季丰度较多^[36]。盐度的变化不会显著影响梭角藻的分布。对于粗刺角藻来说,属于高温高盐性质的种类,但其分布与盐度呈负相关,原因可能是盐度与叶绿素 a 呈负相关,并且调查海域处于近岸。马新等^[37]认为绝大多数浮游植物的生长速率在一定范围内与水温呈显著的正相关性、与盐度呈显著的负相关。王梦雪等^[38]通过四个季节叶绿素 a 及环境因子(温度、盐度、营养盐)分析结果可知,浮游植物生长受沿岸河流营养盐输入影响明显,尤其是夏、秋季节,叶绿素 a 高值主要分布在低盐度、高营养盐的近岸及河流入海口处,近岸水深浅,垂直混合强烈,同时风电工程的施工,使底部沉积物释放的营养盐对海水进行补充,沁水河等河流输入带来了低盐度环境和充足的营养盐,对浮游植物生长具有明显的促进作用。

浮游植物优势种与油类呈负相关,相关研究表明,石油类会破坏浮游植物细胞、损坏叶绿素及干扰气体交换,从而妨碍浮游植物的光合作用^[39],海上风电工程在施工期间,造成石油类污染物的增加,是由于风机基础和升压站基础会改变近岸海域水动力条件,海水交换受到一定程度的影响,对海

水自净能力产生不利影响,同时由于施工、日常维护引发的污水、油类入海,导致区域海洋水环境质量受到影响,但是,这种影响是短期、可逆的^[40]。

4 结论

1) 2023年7月在烟威风电场建设海域共采集浮游植物15种、甲藻5种、硅藻10种,其中粗刺角藻、三角角藻占绝对优势。浮游植物物种多样性指数(H')、物种均匀度指数(J')、物种丰富度指数(D)平均值分别为1.57、0.68、0.80,表明风电场建设海域浮游植物群落结构较稳定,生态环境质量好,并且与历史资料相比,差异不显著。

2) 群落结构特征分析显示,按照85%相似水平可将浮游植物划分为2个组群,对组间差异贡献较大(>10%)的分歧种有旋链角毛藻、格氏圆筛藻、佛氏海毛藻等硅藻类。

3) 对浮游植物与环境因子之间进行冗余分析(RDA)表明, $\text{NO}_3\text{-N}$ 、Sal、Oil、Cr、SS是影响风电场建设海域浮游植物优势种密度的主要因素,风电场建设是一种人为活动干扰,对其影响有限。工程建设后该水域浮游植物群落结构状况及受环境变化影响的改变还需进行长期跟踪调查,以期为该水域重要渔业资源的保护和生态修复提供科学依据。

参考文献:

[1] 吴富村,阙华勇,张国范.我国皱纹盘鲍底播增养殖历史、现状及未来发展趋势[J].海洋科学,2020,44(8):56-68.

[2] 王妍,董志军,刘东艳,等.烟台近海浮游植物的时空变化特征[J].海洋通报,2013,32(4):408-420.

[3] 孙腾,龚语嫣,冯翠翠,等.海上风牧融合的挑战与挑战[J].海洋开发与管理,2023,40(9):19-29.

[4] 高扬.风电工程对海洋生态环境影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2023.

[5] 吴兆娣.对海上风能利用的探讨[C]//2022供热工程建设与高效运行研讨会论文集.2022:5.

[6] 张世朋,赵一飞,刘晴,等.基于CiteSpace分析的海上风电开发对生态环境影响研究[J].南京师范大学学报(自然科学版),2022,45(4):66-73.

[7] 黄文,夏永健,郑碧琪,等.霞浦长表岛附近海域浮游植物群落特征与环境因子分析[J].海洋开发与管理,2024,41(1):126-135.

[8] 王英.威海双岛湾人工鱼礁区浮游生物群落结构特征研究[D].烟台:鲁东大学,2022.

[9] 罗江之,欧腾,邓恺芊,等.贵阳市翁井水库浮游植物优势种生态位与种间联结性分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2024,42(3):16-25.

[10] 朱浩然.天津近岸海域大型底栖动物群落及其环境因子研究[D].天津:天津科技大学,2020.

[11] 蒋文良,陈胜林,李永明,等.渤海湾南部滩涂贝类群落结构特征及其环境因子相关性研究[J].海洋科学,2023,47(10):52-64.

[12] 常启歌.2022年威海近岸海域浮游植物的时空变动及其与环境因子的关系[D].济南:山东大学,2023.

[13] 程钊.浮游藻类群落离散三维荧光光谱快速检测方法与应用研究[D].合肥:中国科学技术大学,2021.

[14] 于潇.烟台扇贝养殖区水质变化及其对扇贝生长的影响[D].烟台:烟台大学,2020.

[15] 程玲,何健龙,付萍,等.烟台四十里湾浮游植物群落特征[J].生态科学,2022,41(5):169-176.

[16] 刘东艳,孙军,钱树本.琉球群岛及其邻近海域的浮游甲藻:1997年夏季的种类组成和丰度分布[C]//中国海洋学文集——西北太平洋副热带环流研究(二).青岛海洋大学海洋生命学院,2000:13.

[17] 杜庆红,冯季芳.南日岛周围海域浮游植物的分布[J].台湾海峡,1996(3):280-285.

[18] 王舒奕.庄河近海海上风电场的生态环境效应初步研究[D].大连:大连海洋大学,2023.

[19] 干满水,戴玲,潘静芬,等.舟山近岸海域赤潮生物与赤潮特征研究[J].环境生态学,2023,5(8):95-100.

[20] 陈楠生,张梦佳.中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展(三):南海[J].海洋与湖沼,2021,52(2):385-435.

[21] 田雯,封振,蔡玲,等.我国船舶压舱水排放与浮游植物科学调查及灾害研究进展[J].植物检疫,2024,38(2):10-18.

[22] 陈楠生,黄海龙.中国海洋浮游植物和赤潮物种的生物多样性研究进展(一):渤海[J].海洋与湖沼,2021,52(2):346-395.

[23] 粟丽,陈作志,黄梓荣,等.2015年春季南海北部陆架海域网采浮游植物群落结构及其与环境因子关系[J].海洋学研究,2019,37(3):86-96.

[24] 王舒奕.庄河近海海上风电场的生态环境效应初步研究[D].大连:大连海洋大学,2023.

[25] STENBERG C, STØTTRUP J G, Van DEURS M, et al. Long-term effects of an offshore wind farm in the North Sea on fish communities[J]. Marine Ecology Progress Series, 2015, 52: 8257-8265.

[26] 罗民波,陆健健,王云龙,等.东海浮游植物数量分布与优势种[J].生态学报,2007(12):5076-5085.

[27] 徐金涛,姚远,杨雯,等.2022年秦皇岛近岸海域赤潮成因初探[J].应用生态学报,2024,35(3):817-826.

- [28] 范丛笑.环境相关浓度砷对浮游动物群落的影响研究[D].昆明:云南师范大学,2023.
- [29] 綦世斌,覃超梅,黄少建,等.夜光藻斑块分布与水环境因子的相关关系[J].热带生物学报,2018,9(1):1-11.
- [30] YING J, DIANE P, HUW J, et al. Effects of arsenate (AS^{5+}) on growth and production of glutathione (GSH) and phytochelatins (PCS) in *Chlorella vulgaris* [J]. International Journal of Phytoremediation, 2011, 13(8): 834-844.
- [31] 孙翠慈,王友绍,孙松,等.大亚湾浮游植物群落特征[J].生态学报,2006(12):3948-3958.
- [32] 赵乐乐,耿志远,贺芷慧,等.汾河水库浮游植物种群变化及其与水环境因子的关系[J].湿地科学,2024,22(4):526-535.
- [33] 詹耀.风力发电机组的防腐技术和应用[J].涂料技术与文摘,2011,32(11):13-17.
- [34] 陈逸航,高劲松.大风江典型工程流场变化特征及悬浮泥沙扩散数值模拟[J].广西科学院学报,2022,38(4):420-428.
- [35] 徐兆礼,易翠萍,沈新强,等.长江口疏浚弃土悬沙对2种浮游植物生长的影响[J].中国水产科学,1999(S1):33-36.
- [36] 张雪.獐子岛邻近水域浮游植物群落结构及其与虾夷扇贝(*Patinopecten yessoensis*)食性关系的研究[D].上海:上海海洋大学,2013.
- [37] 马新,姚抒含,徐金涛,等.2021年6月和9月唐山近岸海域浮游植物群落结构特征及影响因素[J].海洋科学进展,2024,42(1):75-91.
- [38] 王梦雪,丁晓坤,侯兴,等.渤海叶绿素a的时空分布及其影响因素[J].中国海洋大学学报(自然科学版),2023,53(9):123-131.
- [39] 林建伟.“油粒子”模型在三沙湾溢油轨迹模拟中的应用[J].渔业研究,2022,44(6):529-540.
- [40] 张晶磊.江苏滨海北区海上风电工程累积环境影响评价[D].上海:上海海洋大学,2018.

The Community Structure and Its Relationship with Environmental Factors of Phytoplankton in the Construction Area of Yanwei Wind Farm in Summer

YANG Xiaotong^{1a,2}, ZHAO Lihua³, WANG Yan², LI Min^{1b}, LÜ Zhenbo^{1b}, CUI Wenhui^{1b},
JIANG Wenliang^{1b}, GAO Mengjuan^{1b}

(1.a.School of Fisheries;b.The Institute for Advanced Study of Coastal Ecology,Ludong University,Yantai 264039,China;

2.Yantai Muping District Fishery Technology Promotion Station,Yantai 264199,China;

3.Rizhao Donggang District Fishery Technology Promotion Station,Rizhao 276800,China)

Abstract: To better understand the effects of wind farm construction on phytoplankton communities in adjacent waters, based on the investigation of phytoplankton and environmental factors in the first phase of the Three Gorges Shandong Muping BDB6 # Offshore Wind Power Project, this study analyzed the changes in phytoplankton community structure and their correlation with environmental factors during the construction of the wind farm. The results showed that during the construction period, a total of 15 species of phytoplankton were collected. The main types of phytoplankton were broad-temperature and nearshore, with a few high-temperature offshore phytoplankton. *Ceratium horridum* and *Ceratium tripos* were the absolute dominant species. The average values of H' , J' , and D are 1.57, 0.68, and 0.80, respectively, and the difference is not significant compared to historical data. Clustering and Non Metric Multidimensional Sequencing indicate that divergent species that contribute significantly to inter group differences include diatoms such as *Chaetoceros curvsetus*, *Coscinodis grandii*, and *Thalassiothrix frauenfeldii*. Redundancy analysis showed that all species were distributed on the right side of the sorting axis. Species distribution is affected by nitrate (NO_3-N), salinity (Sal), Oil (Oil), chromium (Cr), suspended matter (SS) and other environmental factors, and wind farm construction has limited influence on it.

Keywords: Yanwei sea area; offshore wind power; phytoplankton; community structure; environmental factor correlation