

唐山京唐港电厂温排水对浮游植物群落的影响

马旺 (河北省水文工程地质勘察院, 河北石家庄 050021)

摘要 根据前期模拟唐山京唐港电厂温排水影响范围, 布设 5 个站位, 分别于 2020 年 5 月、8 月、11 月进行调查取样工作。通过调查取样得出的水温、盐度、电导率、叶绿素 a 等水文分布特征和硝酸盐、磷酸盐、硅酸盐、铵盐、亚硝酸盐等营养盐分布特征, 结合影响范围内浮游植物物种组成和多样性指数的季节变化, 采用冗余分析方法, 研究电厂温排水对浮游植物群落的影响。结果表明, 5 月份 JTG-1 受到硅酸盐影响较大, 其余站位受到硝酸盐或盐度影响; 8 月份各站位受温度影响较为明显; 11 月份则与盐度呈负相关。在优势种中, 大洋角管藻受盐度影响较大, 曲舟藻和新月菱形藻受硅酸盐和铵盐影响较大, 微小原甲藻受硝酸盐影响较大。

关键词 温排水; 浮游植物群落; 营养盐; 多样性指数; 优势种; 环境因子

中图分类号 X 171 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)03-0069-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.03.018



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Influence of Tangshan Jingtanggang Power Plant's Thermal Drainage on Marine Phytoplankton Community

MA Wang (Hebei Province Hydrogeology Survey Institute, Shijiazhuang, Hebei 050021)

Abstract According to the preliminary simulation of the thermal drainage impact of Tangshan Jingtanggang Power Plant, five stations were set up to conduct survey and sampling work in May, August and November 2020, respectively. The hydrological distribution characteristics of water temperature, salinity, conductivity, chlorophyll a, etc. and the distribution characteristics of nutrients such as nitrate, phosphate, silicate, ammonium and nitrite were obtained through investigation and sampling, combining with the seasonal changes of phytoplankton species composition and diversity index in the affected area, the redundant analysis method was used to study the influence of thermal drainage of power plant on phytoplankton community. The results showed that in May, JTG-1 was greatly affected by silicate, and other stations were affected by nitrate or salinity; in August, the stations were obviously affected by temperature; in November, there was a negative correlation with salinity. Among the dominant species, *Cerataulina pelagica* was more affected by salinity, *Pleurosigma* spp. and *Nitzschia closterium* were more affected by silicate and ammonium, and *Prorocentrum minimum* was more affected by nitrate.

Key words Thermal discharge; Phytoplankton community; Nutrients; Diversity index; Dominant species; Environmental factors

浮游植物是海洋生态系统中重要的初级生产者, 在海洋生态系统的能量流动、物质循环和食物链传递中起着至关重要的作用^[1-2]。沿海电厂温排水的排放会抑制部分狭温性浮游植物的生长甚至导致其死亡, 具有广温性适应性的藻类快速生长, 其竞争者的死亡将使得藻华生物获得更多的资源和生长空间, 致使植物群落生物多样性降低, 对群落的稳定性产生较大影响^[3-4]。

大唐国际王滩发电有限公司位于唐山市京唐港, 地理坐标位于 118°58'27.95"E、39°11'59.04"N, 于 2005 年 12 月建成, 根据收集资料显示, 2020 年夏季排水温度 33~34℃, 排水量约 330 万 m³/d, 温排水经过排水渠到入海口的海水相对于海水本身温度升高大约 2.0℃; 冬季排水温度 10~12℃, 排水量 90 万~130 万 m³/d, 温排水经排水渠到入海口的海水相对于海水本身温度升高大约 2.8℃。温排水的排放对海域水文特征和营养盐时空分布特征产生影响, 进而影响植物群落结构的组成和稳定性, 笔者通过使用冗余分析的方法探讨电厂温排水对浮游植物群落的影响, 为相关部门的管理提供一定的数据支撑。

1 材料与方法

1.1 站位布设及采样时间 根据前期模拟唐山京唐港电厂温排水影响范围^[5-6], 分别于 2020 年 5 月(春季)、8 月(夏季)、11 月(秋季)在退潮时进行调查取样工作, 布设 5 个站

位, 分别为 JTG-1~JTG-5(图 1)。

1.2 样品采集和处理 此次调查中海水温度、盐度、电导率按照海洋调查规范海洋水文观测(GB/T 12763.2—2007); 叶绿素 a、浮游植物采样、固定和计数等按照海洋调查规范海洋生物调查(GB 12763.6—91)进行。

海水温度、盐度、电导率采用 TDS 进行现场测试; 叶绿素 a 样品采用定深取样器进行采集表层海水 2 L, 现场过滤通过 0.65 μm GF/F 滤膜放到棕色塑料瓶中, 滤膜由 90% 丙酮浸泡, 低温萃取 24 h 后, 采用荧光法测定; 浮游植物样品采用定深取样器进行采集表层海水 1 L, 现场加入浓度 4% 酸性鲁格试剂固定, 利用 Utermöhl 计数框定量分析浮游植物种类和细胞计数。

1.3 指标的测定与计算 浮游植物的优势种根据各个种的优势度(Y)来确定, 其计算公式如下:

$$Y = N_i / N \times f_i \quad (1)$$

式中, N_i 为 i 种类的个体数; N 为所有种类总的个体数; f_i 为 i 种类个体出现的频率。 $Y > 0.02$ 的种类为优势种^[7-8]。

Shannon-Weaver 多样性指数(H')计算公式如下:

$$H' = - \sum (N_i / N) \ln(N_i / N) \quad (2)$$

Margalef 丰富度指数(D)计算公式如下:

$$D = (S - 1) / \ln N \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(J)计算公式如下:

$$J = H' / \ln S \quad (4)$$

式中, N_i 为 i 种类的个体数; N 为所有种类总的个体数; S 是群落中的物种数。

1.4 数据处理 运用 SPSS 软件对测定数据进行统计分析和绘图, 采用 Canoco 5.0 软件对浮游植物与环境因子之间的

基金项目 河北省自然资源厅科技项目(454-0503-JBN-XCLS)。

作者简介 马旺(1986—), 男, 河北石家庄人, 工程师, 硕士, 从事海洋环境与海洋地质学研究。

收稿日期 2021-05-19

关系进行冗余分析^[9-11]。基于除趋势对应分析 (detrended correspondence analysis DCA) 对浮游植物丰度数据进行计算,

DCA 结果中 Lengths of gradient 的第一轴值为 2.340, 符合 RDA 分析。



图1 调查取样站位

Fig.1 Survey and sampling stations

2 结果与分析

2.1 水文时空分布特征

2.1.1 水温。从表1可以看出,5月份除 JTG-5(23.3℃)外,其余站位水温均低于20.0℃,在15.1~17.9℃。8月份各站位水温整体偏高,在22.1~28.1℃,最高值在 JTG-5 站位,最低值在 JTG-3 站位。11月份各站位水温有所降低,其中 JTG-5 站位水温最高,为22.1℃,JTG-3 站位水温最低,为16.4℃。

2.1.2 盐度。从表1可以看出,11月份盐度相对较高,其中最高值为32.09‰,出现在 JTG-2 站位;最低值为31.52‰,出现在 JTG-1 站位。8月份各站位盐度差异较小,在31.37‰~31.65‰,最小值出现在 JTG-4 站位,最高值出现在 JTG-1 站位。5月份盐度相对较低,为30.45‰~31.16‰,最高值出现在 JTG-3 站位,最低值出现在 JTG-4 站位。

2.1.3 电导率。从表1可以看出,8月份各站位电导率相对较高,其中最大值出现在 JTG-5 站位,为57.01 S/m,最低值为48.52 S/m,出现在 JTG-3 站位。5月份除 JTG-5 (45.49 S/m) 站位偏高外,其他各站位电导率差异较小,均小于40.00 S/m,处于37.21~39.67 S/m。11月份除 JTG-3 站位(39.77 S/m)小于40.00 S/m外,其余各站位电导率均高于40.00 S/m,在40.10~45.85 S/m。

2.1.4 叶绿素 a。从表1可以看出,8月份和11月份各站位叶绿素 a 浓度相对较低,均小于2.00 μg/L,处于0.21~1.93 μg/L。5月份各站位叶绿素 a 浓度相对较高,最高值为4.75 μg/L,出现在 JTG-1 站位。

2.2 营养盐时空分布特征

2.2.1 硝酸盐。从表2可以看出,5月份各站位硝酸盐浓度较高,处于0.069~0.135 mg/L,最高值出现在 JTG-1 站位,最低值出现在 JTG-2 站位。8月份和11月份硝酸盐浓度较低,8月份除 JTG-1(0.053 mg/L) 站位外,其他站位均未检出;11月份除 JTG-4(0.051 mg/L) 站位外,其他站位均未检出。

2.2.2 亚硝酸盐。从表2可以看出,11月份 JTG-4 站位和 JTG-5 站位亚硝酸盐浓度较高,分别为0.053和0.033 mg/L,其余各站位浓度较低。8月份各站位亚硝酸盐浓度差异较小,为0.011~0.020 mg/L。5月份整体含量较低,均不高于0.010 mg/L。

2.2.3 磷酸盐。从表2可以看出,除11月份 JTG-4 (0.034 mg/L) 站位磷酸盐浓度较高外,其余各站位磷酸盐浓度均较低,在0.010~0.016 mg/L。其中,8月份5个站位均未检出,5月份2个站位(JTG-2 和 JTG-4) 未检出,11月份3个站位(JTG-1、JTG-2 和 JTG-3) 未检出。

2.2.4 硅酸盐。从表2可以看出,5月份各站位硅酸盐浓度较高,8月份较低。其中,5月份最高值出现在 JTG-1 站位,为1.850 mg/L;8月份最高值为0.939 mg/L,出现在 JTG-4 站位;11月份最高值为1.174 mg/L,出现在 JTG-4 站位。

2.2.5 铵盐。从表2可以看出,5月份除 JTG-2 和 JTG-4 站位未检出外,其他3个站位浓度含量变化不大,在0.064~0.066 mg/L;8月份除 JTG-1(0.053 mg/L) 外,其他4个站位未检出;11月份除 JTG-4(0.098 mg/L) 外,其他4个站位未检出。

表 1 水文要素因子分布特征

Table 1 Distribution characteristics of hydrological factors

站位 Station	温度 Temperature/°C			盐度 Salinity/‰			电导率 Conductivity//S/m			叶绿素 a Chlorophyll a//μg/L		
	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.
JTG-1	15.3	26.9	21.1	31.03	31.65	31.52	37.21	50.11	41.68	4.75	0.61	1.81
JTG-2	15.1	26.5	16.7	31.12	31.63	32.09	37.99	48.78	40.10	3.41	0.89	1.93
JTG-3	15.1	22.1	16.4	31.16	31.60	32.03	38.48	48.52	39.77	2.72	0.21	1.36
JTG-4	17.9	27.2	21.4	30.45	31.37	31.69	39.67	49.22	42.82	3.29	1.00	0.90
JTG-5	23.3	28.1	22.1	30.97	31.54	31.68	45.49	57.01	45.85	2.37	0.91	0.34

表 2 营养盐因子分布特征

Table 2 Distribution characteristics of nutrient factors

站位 Station	硝酸盐 Nitrate			亚硝酸盐 Nitrite			磷酸盐 Phosphate			硅酸盐 Silicate			铵盐 Ammonium		
	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.	5月 May	8月 Aug.	11月 Nov.
JTG-1	0.135	0.053	<0.050	0.010	0.017	0.017	0.016	<0.010	<0.010	1.850	0.486	0.678	0.064	0.053	<0.050
JTG-2	0.069	<0.050	<0.050	0.006	0.011	<0.005	<0.010	<0.010	<0.010	0.945	0.316	0.614	<0.050	<0.050	<0.050
JTG-3	0.125	<0.050	<0.050	0.007	0.018	<0.005	0.012	<0.010	<0.010	1.190	0.260	0.591	0.064	<0.050	<0.050
JTG-4	0.076	<0.050	0.051	<0.005	0.020	0.053	<0.010	<0.010	0.034	0.692	0.939	1.174	<0.050	<0.050	0.098
JTG-5	0.110	<0.050	<0.050	0.008	0.013	0.033	0.010	<0.010	0.012	1.030	0.881	0.915	0.066	<0.050	<0.050

2.3 浮游植物种类组成 唐山京唐港电厂温排水影响区域 5 个采样站位共鉴定出 47 种浮游植物, 隶属硅藻门和甲藻门 (表 3 和图 2), 硅藻门 34 种、甲藻门 13 种。其中, 8 月份, 鉴定出浮游植物种类最多, 为 33 种, 硅藻门 24 种、甲藻门 9 种; 11 月份鉴定出浮游植物 24 种, 硅藻门 19 种、甲藻门 5 种; 5 月份鉴定出浮游植物种类数最少, 为 13 种, 硅藻门 12 种、甲藻门 1 种。

唐山京唐港电厂温排水海域浮游植物以硅藻为主, 在所有浮游植物物种中占比超过 86% (图 3)。相对而言, 5 月份 JTG-5 站位出现了较多的甲藻, 占比 14%; 8 月份甲藻略有增加, JTG-2 站位和 JTG-5 站位的甲藻分别占比 13% 和 11%;

11 月份硅藻占比维持较高水平, JTG-1 站位和 JTG-2 站位均出现 7% 的甲藻。

表 3 浮游植物群落结构

Table 3 Phytoplankton community structure

时间 Time	浮游植物 Phytoplankton	种类数 Number of species//种	比例 Proportion %
5月 May	硅藻门	12	92.31
	甲藻门	1	7.69
8月 Aug.	硅藻门	24	72.73
	甲藻门	9	27.27
11月 Nov.	硅藻门	19	79.17
	甲藻门	5	20.83

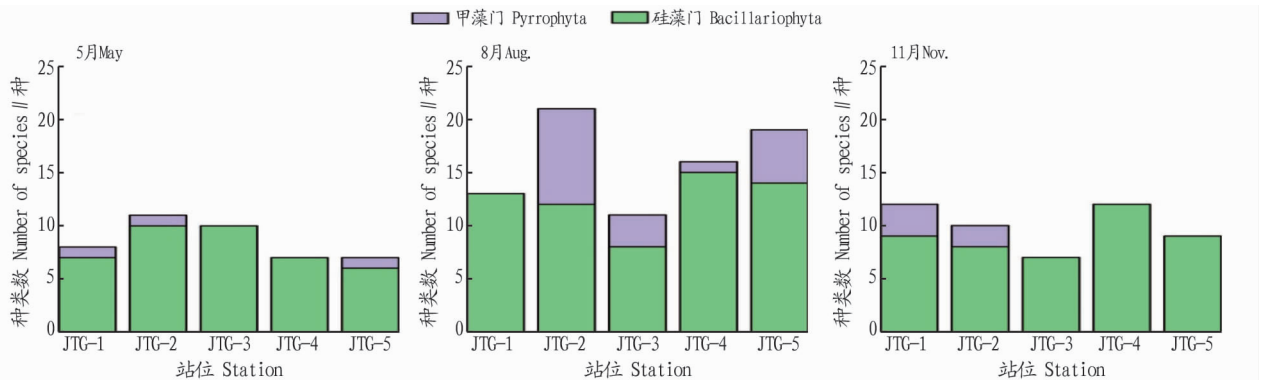


图 2 唐山京唐港电厂温排水海域浮游植物种类数量变化

Fig. 2 Changes of the number of phytoplankton species in the thermal drainage area of Tangshan Jingtang Port Power Plant

2.4 群落多样性指数季节变化

2.4.1 Shannon-Wiener 指数。 从图 4 可以看出, 唐山京唐港电厂温排水海域 Shannon-Wiener 指数季节差异较小, 最大值出现在 8 月份的 JTG-5 站位。5 月份总体指数较低, 位于 1.0~1.5; 8 月份最低值出现在 JTG-3 站位, 约为 1.5; 11 月份指数波动较小, 最大值出现在 JTG-4 站位。

2.4.2 Margalef 丰富度指数。 从图 5 可以看出, 唐山京唐港电厂温排水海域浮游植物 Margalef 丰富度指数的季节差异较为明显。8 月份 Margalef 丰富度指数均高于 5 月份和 11 月份, 其中最高值出现在 JTG-2 站位, 最低值出现在 JTG-3

站位。5 月份和 11 月份波动较小, 除了 JTG-2 站位和 JTG-3 站位, 11 月份 Margalef 丰富度指数均超过 5 月份。

2.4.3 Pielou 均匀度指数。 从图 6 可以看出, 唐山京唐港电厂温排水海域浮游植物 Pielou 均匀度指数 11 月份各站位 (除 JTG-5) 均高于 5 月份和 8 月份, 其中最高值出现在 JTG-3 站位。除 JTG-3 站位, 5 月份 Pielou 均匀度指数均低于 8 月份和 11 月份。JTG-5 站位 Pielou 均匀度指数各季节较为相似, 均在 0.8 左右。

2.5 浮游植物群落与环境因子冗余分析 从唐山京唐港电厂温排水海域环境因子与浮游植物群落的冗余分析 (图 7)

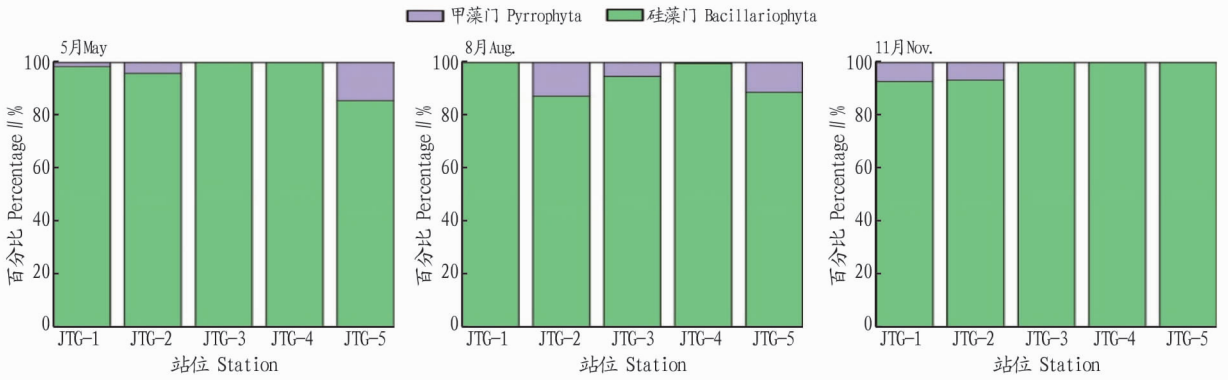


图3 唐山京唐港电厂温排水海域浮游植物密度百分比

Fig. 3 Percentage of phytoplankton density in the thermal drainage area of Tangshan Jingtang Port Power Plant

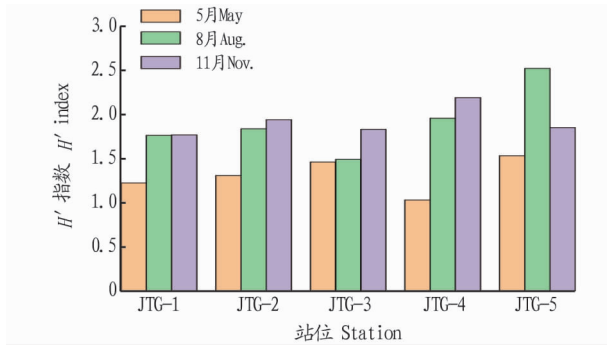


图4 唐山京唐港电厂温排水海域 Shannon-Wiener 指数 (H') 的季节变化

Fig. 4 Seasonal variation of Shannon-Wiener index (H') in the thermal drainage area of Tangshan Jingtang Port Power Plant

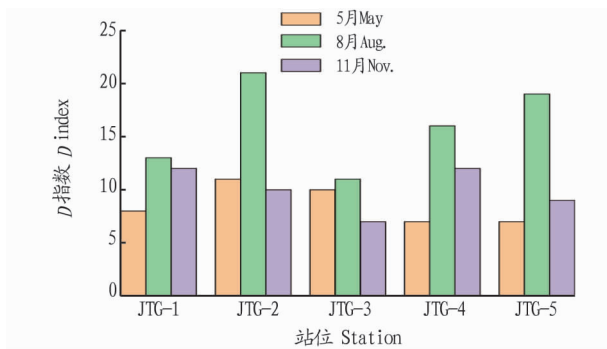


图5 唐山京唐港电厂温排水海域浮游植物 Margalef 丰富度指数 (D) 的季节变化

Fig. 5 Seasonal variation of the Margalef richness index (D) of phytoplankton in the thermal drainage area of Tangshan Jingtang Port Power Plant

可以看出,5月份 JTG-1 受硅酸盐影响较大,其余站点受硝酸盐或盐度影响;8月份各站点受温度影响较为明显;11月份则与盐度呈负相关。

2.6 环境因子与浮游植物优势种的关系 从唐山京唐港电厂温排水海域环境因子与浮游植物优势种的冗余分析(图8)可以看出,优势种中受温度影响较大的有7种藻,包括5种硅藻和2种甲藻。2种甲藻是链状裸甲藻(*Gymnodinium catenatum*)和具毒冈比甲藻(*Gambierdiscus toxicus*)。此外,大

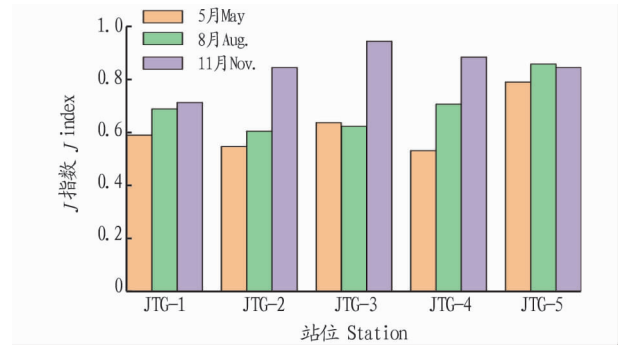


图6 唐山京唐港电厂温排水海域浮游植物 Pielou 均匀度指数 (J) 的季节变化

Fig. 6 Seasonal variation of Pielou uniformity index (J) of phytoplankton in the thermal drainage area of Tangshan Jingtang Port Power Plant

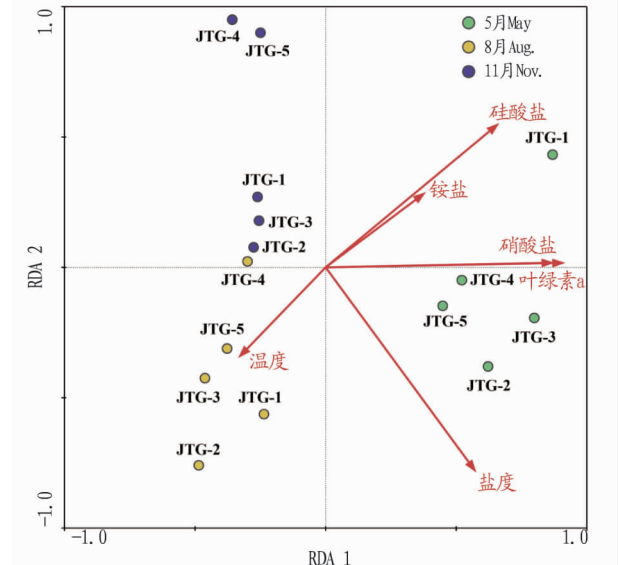
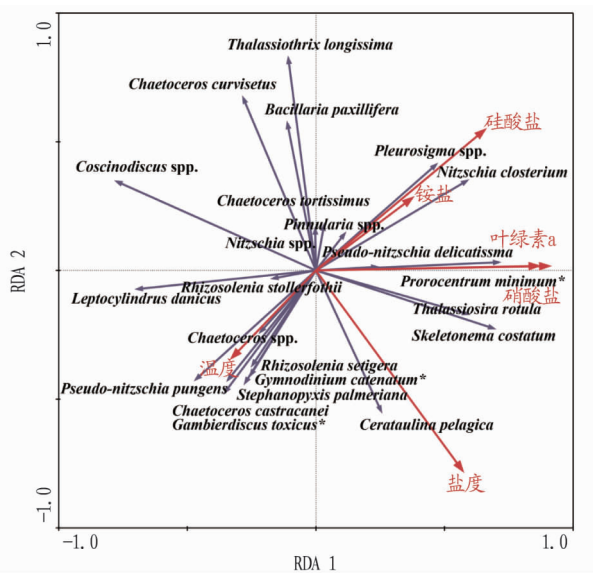


图7 唐山京唐港电厂温排水海域环境因子与浮游植物群落的冗余分析

Fig. 7 Redundant analysis of environmental factors and phytoplankton community in the thermal drainage area of Tangshan Jingtang Port Power Plant

洋角管藻(*Cerataulina pelagica*)受盐度影响较大,曲舟藻(*Pleurosigma* spp.)和新月菱形藻(*Nitzschia closterium*)受硅酸盐和铵盐影响较大,微小原甲藻(*Proocentrum minimum*)受

硝酸盐影响较大。



注: * 表示甲藻,其余表示硅藻

Note: * means dinoflagellate, the rest means diatom

图8 唐山京唐港电厂温排水海域环境因子与浮游植物优势种的冗余分析

Fig.8 Redundancy analysis of environmental factors and dominant species of phytoplankton in the thermal drainage sea area of Tangshan Jingtang Port Power Plant

3 结论与讨论

通过此次调查,得出唐山京唐港电厂温排水影响区域内水文和营养盐的时空分布特征以及浮游植物群落物种组成和群落结构在不同季节的分布特征。通过冗余分析,得出5月份JTG-1受硅酸盐影响较大,其余站位受硝酸盐或盐度影

响;8月份各站位受温度影响较为明显,11月份则与盐度呈负相关。在优势种中,大洋角管藻受盐度影响较大,曲舟藻和新月菱形藻受硅酸盐和铵盐影响较大,微小原甲藻受硝酸盐影响较大。

此次调查研究也存在一定的局限性,主要表现在3次调查取样浮游植物群落物种组成存在较大差异,8月份浮游植物种类最多,硅藻门24种、甲藻门9种;其次为11月份,硅藻门19种、甲藻门5种;5月份浮游植物种类最少,硅藻门12种、甲藻门1种。在今后的工作中,应加大取样频率和取样站位,建立长期持续的监测工作,为海洋行政主管部门开展海洋生态环境监测提供基础数据。

参考文献

- [1] 郑承志,左丽明,马旺,等.不同温度下抑食金球藻、中肋骨条藻和海洋卡盾藻间的相互作用[J].热带海洋学报,2021,40(3):124-131.
- [2] 郭楠楠,李丹丹,陈曦,等.春秋两季西大洋水库生态修复示范区浮游植物群落结构特征[J].大连海洋大学学报,2020,35(3):417-423.
- [3] 唐森铭,商照荣,黄浩,等.刍议我国直流冷却电厂冷却用水生态危害与减损[J].应用海洋学报,2020,39(4):590-599.
- [4] 魏新渝,张琨,熊小伟,等.电厂取水设施运行对水生生物影响与减缓措施[J].水生态学杂志,2017,38(4):1-10.
- [5] 冯佳伟,顾杰,匡翠萍,等.秦皇岛海域夏季温排水对流扩散特征[J].水动力学研究与进展,2018,33(4):490-499.
- [6] 顾杰,韩雪健,匡翠萍,等.温排水在河口潟湖海岸中运输的三维模拟与分析[J].水动力学研究与进展,2020,35(2):201-212.
- [7] 汪琪,黄蔚,陈开宁,等.大溪水库浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J].环境科学学报,2020,40(4):1286-1297.
- [8] 刘林峰,周先华,高健,等.神农架大九湖湿地浮游植物群落结构特征及营养状态评价[J].湖泊科学,2018,30(2):417-430.
- [9] 马沛明,施练东,张俊芳,等.浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析[J].环境科学,2016,37(12):4560-4569.
- [10] 刘西汉,王玉珏,石雅君,等.曹妃甸海域浮游植物群落及其在围填海前后的变化分析[J].海洋环境科学,2020,39(3):379-386.
- [11] 曾茹,李亚军,何金曼,等.清澜港近岸海湾春秋两季浮游植物群落结构特征及其与环境因子的关系[J].安徽农业科学,2021,49(10):77-82,100.
- [12] 生态环境学报,2009,18(2):731-737.
- [13] 赵晓男,唐进年,樊宝丽,等.高寒地区不同程度沙化草地土壤种子库特征[J].草业科学,2020,37(12):2431-2443.
- [14] 左小安,赵学勇,张铜会,等.中国北方农牧交错带植被动态研究进展[J].水土保持研究,2005,12(1):162-166.
- [15] SITVERTOWN J W. Introduction to plantation population ecology [M]. London: Longman, 1982:126-135.
- [16] 罗鑫萍,张祖欣,陈大立,等.黄土高原人工灌草系统不同立地条件土壤种子库特征[J].草地学报,2020,28(4):940-946.
- [17] 陈学平,杨艳刚,尚占环,等.青藏高原公路两侧草地土壤种子库特征研究:以国道214公路共玉公路段为例[J].草地学报,2018,26(1):85-91.
- [18] BEKKER R M, BAKKER J P, GRANDIN U, et al. Seed size, shape and vertical distribution in the soil: Indicators of seed longevity [J]. Funct Ecol, 1998, 12(5): 834-842.
- [19] AMBROSIO L, DORADO J, DEL MONTE J P. Assessment of the sample size to estimate the weed seedbank in soil [J]. Weed Res, 1997, 37(3): 129-137.
- [20] 李国旗,邵文山,赵盼盼,等.封育对荒漠草原两种植物群落土壤种子库的影响[J].草业学报,2018,27(6):52-61.
- [21] 于浩,高丽,闫志坚,等.库布齐沙漠东段不同演替阶段沙丘土壤种子库变化特征[J].中国草地学报,2015,37(4):80-85.
- [22] 刘美珍,蒋高明,于顺利,等.浑善达克退化沙地恢复演替18年中植物群落动态变化[J].生态学报,2004,24(8):1734-1740.
- [23] 张蕊.不同生态恢复措施下宁夏黄土陵区典型草原土壤种子库特征[D].银川:宁夏大学,2018.
- [24] 邵文山.荒漠草原区4种植物群落土壤特性和种子库的研究[D].银川:宁夏大学,2017.
- [25] 陈颖颖,吴自荣,潘萍,等.飞播马尾松林土壤种子库的萌发特征及其与土壤理化性质的关系[J].土壤通报,2016,47(1):92-97.
- [26] 翟付群,许诺,莫训强,等.天津蓟运河故道消落带土壤种子库特征与土壤理化性质分析[J].环境科学研究,2013,26(1):97-102.
- [27] 赵丽娅,李元哲,陈红兵,等.科尔沁沙地恢复过程中地上定植群落与土壤种子库特征及其关系研究[J].生态环境学报,2018,27(2):199-208.
- [28] 崔珍珍,马超,陈登魁.1982—2015年科尔沁沙地植被时空变化及气候响应[J].干旱区研究,2021,38(2):536-544.
- [29] 李玉霖,赵学勇,刘新平,等.沙漠化土地及其治理研究推动北方农牧交错区生态恢复和农牧业可持续发展[J].中国科学院院刊,2019,34(7):832-840.
- [30] 刘静逸,牛艳东,郭克疾,等.南洞庭湖杨树清理迹地恢复初期土壤种子库特征及其与土壤因子的关系[J].应用生态学报,2020,31(12):4042-4050.
- [31] 韩润燕,陈彦云,李旺霞.不同微地形固定沙丘地上植被、土壤种子库和土壤含水量的分布特征[J].草业科学,2014,31(10):1825-1832.
- [32] 马妙君,周显辉,吕正文,等.青藏高原东缘封育和退化高寒草甸种子库差异[J].生态学报,2009,29(7):3658-3664.
- [33] 赵丽娅,李兆华,李锋瑞,等.科尔沁沙地植被恢复演替进程中群落土壤种子库研究[J].生态学报,2005,25(12):3204-3211.
- [34] 马克平,刘灿然,刘玉明.生物群落多样性的测度方法II β多样性的测度方法[J].生物多样性,1995,3(1):38-43.
- [35] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2002.
- [36] 中国科学院中国植物志编辑委员会.中国植物志[M].北京:科学出版社,2004.
- [37] 李洪远,莫训强,郝翠.近30年来土壤种子库研究的回顾与展望[J].

(上接第68页)