

上海某污水厂排水口邻近海域 浮游植物群落与水质评价

庾 旸¹, 张艺玟¹, 刘 静², 尹 杰^{1*}

(1. 上海海洋大学 海洋生态与环境学院, 上海 201306;

2. 上海市建设用地和土地整理事务中心 自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心, 上海 200003)

摘 要:上海作为人海互通极度频繁的滨海城市,海岸工程设置繁多,污水处理厂是缓解用水压力的重要海岸工程,该类型海岸工程的环境影响是研究热点,因此基于 2019 年上海某污水厂出水口邻近海域全年浮游植物群落结构数据,分析了浮游植物生物多样性,以期对污水处理厂进行环境影响评价。共鉴定出浮游植物 6 门 95 种,其中硅藻门 35 种,蓝藻门 27 种,绿藻门 22 种,裸藻门 6 种,甲藻门 4 种,金藻门 1 种。研究表明:浮游植物种类组成存在季节差异,总体上春秋季节种类组成较多,夏冬季节较少;优势种中以硅藻最多,且硅藻门在浮游植物密度中占比最高,年均细胞密度为 412.25×10^4 cells/L,占 79.09%,其中中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)为全年优势种;物种多样性指数(Shannon-Wiener)、丰富度指数(Margalef)和均匀度指数(Pielou)年度均值分别为 2.19, 3.09 和 0.48,表明该污水厂排水口邻近海域水体总体处于中度污染状态;冗余分析(RDA)表明本研究区域对浮游植物影响较大的环境因子是悬浮物浓度、盐度、水温和溶解氧。本文利用浮游植物群落生态学指标作为近海域水体健康程度的评价指标,同时作为水质指标评估的补充,有利于更全面、整体性、系统化、精细化地开展水质综合评价分析。

关键词:浮游植物;群落结构;物种多样性;水质评价

中图分类号:Q178.53

文献标志码:A

文章编号:1002-3682(2021)01-0037-11

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2021.01.005

引用格式:YU Y, ZHANG Y W, LIU J, et al. Structural analysis of phytoplankton community in adjacent waters of a sewage treatment plant in Shanghai[J]. Coastal Engineering, 2021, 40(1): 37-47. 庾旸, 张艺玟, 刘静, 等. 上海某污水厂排水口邻近海域浮游植物群落与水质评价[J]. 海岸工程, 2021, 40(1): 37-47.

浮游植物是海洋中的初级生产者和能源转换者,在海洋生态系统中扮演着十分重要的角色。它为浮游动物和鱼类、贝类等提供生存所必需的食物^[1-2]。浮游植物的种类组成和群落结构直接或间接影响其他海洋生物的分布和丰度变化,并影响生态系统能量流动和物质循环^[3]。浮游植物个体微小,生命周期短,在较短时间内会对环境变动作出响应,可随水体营养水平的不同,在物种组成和群落结构上存在较大差异^[4],因此,浮游植物各项生态指标可作为评价水体营养等级的重要指标^[5]。

上海作为滨海特大型城市,人海交汇频繁,海岸利用程度极高,经济社会发展水平较高,污废水排放较高,城镇污水处理厂在保证城市河道、湖泊和近海水生态环境健康方面发挥了重大作用;同时,上海的污水处理厂往往依海岸而建,近年来有越来越多的污水排放至其邻近海域,研究表明,2012—2015 年每天就有近 300 万 t 污水经污水厂初级处理后直接排向上海近岸海域^[6]。当前,随着生态文明建设的进一步推进、全民环保意识的不断提高,国家对污水厂出水水体理化因子进行了严格规定,制定了出水排放标准,并要求可综

收稿日期:2020-08-19

资助项目:自然资源部大都市区国土空间生态修复工程技术创新中心开放课题——基于陆海统筹与生态红线背景下海岸带生态修复模式与策略研究(CXZX202006)

作者简介:庾 旸(2000—),女,主要从事环境化学方面研究. E-mail: 2406493747@qq.com

* **通信作者:**尹 杰(1992—),女,实验师,主要从事生态毒理与修复方面研究. E-mail: jieyin@shou.edu.cn

(王佳实 编辑)

合、全面地评价出水水体对于邻近海域生态环境产生的影响。

然而,目前大部分水质评价体系一般采用单因子评价或者单纯的营养盐、有机污染物、重金属等指标评价某一区域的水质情况,缺乏从生态系统角度进行的综合评价,生物指标评价往往被忽视。此外,上海近岸海域环境因子复杂多变,排水口区域浮游植物的种类组成和群落结构表现出与其他水域环境的独特变化,这些指标在一定程度上可以指示该区域生态系统健康状况^[7]。因此,系统掌握浮游植物群落动态变化规律将更加有利于解析研究区域水质情况。基于此,本研究对上海某污水厂排水口邻近海域浮游植物的种类组成、生物多样性、细胞密度、时空分布等方面开展了 4 个季节的调查分析,以期从浮游植物群落生态学角度分析该污水厂出水是否对上海近岸海域生态环境造成影响。

1 材料与方法

1.1 监测范围与站位的确定

本文选取上海某污水厂排水口邻近海域进行站位设计和浮游植物监测。根据《陆源入海排污口及邻近海域监测技术规程》(HY/T 076—2005)^[8],以排污口为放射中心,布设了 10 个站位,采样站位覆盖污水处理厂出水范围,站位设置见图 1。本研究于 2019 年 3 月,6 月,9 月和 12 月中旬进行 4 个季节浮游植物样本采集,每次采样在 2 h 内完成。

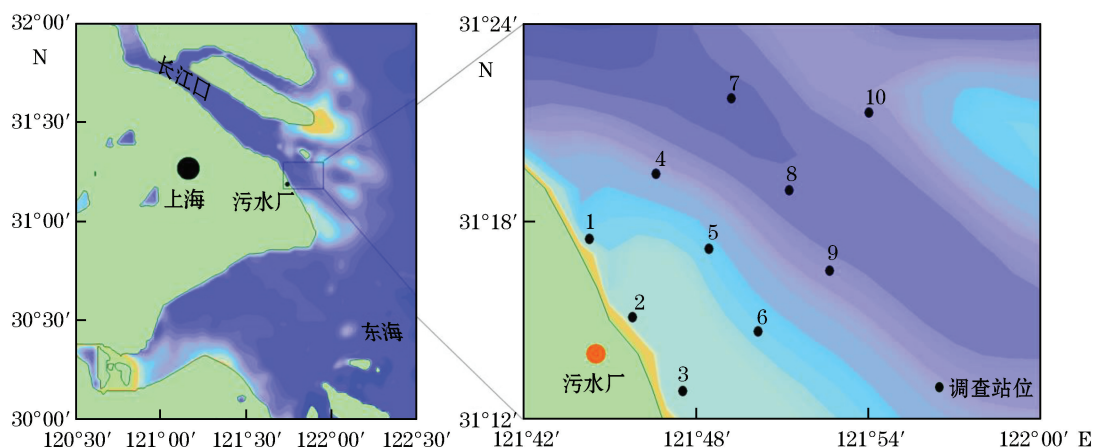


图 1 污水厂位置及尾水排放海域浮游植物调查站位分布

Fig.1 Location of sewage treatment plant and stations for phytoplankton survey in the adjacent waters of the sewage treatment plant

1.2 样品采集与处理

浮游植物的采集、处理过程参照《海洋监测规范》^[9]。首先,以浅水Ⅲ型浮游生物网自水底至表层进行垂直拖网;随后,加入质量分数为 5% 的甲醛溶液固定;最后,样品带回实验室后需进一步静置沉淀浓缩至 50 mL。在光学显微镜(Olympus-CX21, Japan)下进行浮游植物计数与种类鉴定。因上海近岸海域受冲淡水影响,因此,分类鉴定全面参考了《中国海藻志》^[10]《中国淡水藻类: 系统、分类及生态》^[11]和《欧洲硅藻鉴定系统》^[12]等文献资料。

采用便携式多参数水质检测仪(HACH-HQ440d, USA)现场测定水温(t)、盐度(S)、溶解氧(DO);采用上海博取悬浮物浓度计(ZWYG-2087, 上海博取)现场测定悬浮物(SS);利用连续流动分析仪(QuAAtro 8001882, Germany)在实验室检测总氮(TN)、总磷(TP)。

1.3 数据处理与分析

物种多样性指数(H')分析采用香农威纳指数(Shannon-Wiener Index)^[13]计算公式:

$$H' = - \sum_{i=1}^s P_i \log P_i, \quad (1)$$

物种丰富度指数(D)分析采用 Margalef^[14]计算公式:

$$D = \frac{s-1}{\log_2 N}, \quad (2)$$

物种均匀度指数(J)分析采用 Pielou^[15]的计算公式:

$$J = \frac{H'}{\log_2 s}, \quad (3)$$

物种优势度(Y)^[14]分析的计算公式为

$$Y = \frac{n_i}{N} f_i, \quad (4)$$

式中, s 为浮游植物样品中的种类数; P_i 为第 i 种的个体数占总数的百分比; n_i 为第 i 种的数量; N 为每个物种出现的数量总和; f_i 为第 i 种在各站位出现的频度。

采用 Arcgis 软件绘制浮游植物数量和密度时空特征分布图。分析浮游植物与环境因子相关性关系时,优先开展弓形效应和去趋势对应分析(Detrended Correspondence Analysis, DCA),显示最长轴长度小于 4,因此选取冗余分析(Redundancy Analysis, RDA)进行二者相关性分析较为合适。本文选取浮游植物优势种丰度为响应变量矩阵,环境因子为解释变量矩阵,基于相关矩阵进行 RDA,排序完成后获得原始模型。选择方差膨胀因子(Variance Inflation Factor, VIF)小于 10 的影响因子对优势种藻类丰度与环境因子进行 RDA。DCA 和 RDA 采用 R 语言 3.6.1 进行分析。

2 结果与讨论

2.1 浮游植物鉴定与种类组成

上海某污水厂排水口邻近海域共鉴定出了浮游植物 6 门 95 种。其中蓝藻门 27 种,占 28.42%;绿藻门 22 种,占 23.16%;硅藻门 35 种,占 36.84%;裸藻门 6 种,占 6.32%;金藻门 1 种,占 1.05%;甲藻门 4 种,占 4.21%(图 2)。

浮游植物种类组成存在季节差异(图 3),表现为秋季>春季>夏季>冬季。秋季各站位浮游植物数量介于 7~17 种,其中位于尾水排放口南侧的第 3 号站点浮游植物数量最少,而位于北侧的第 4 号站点数量最多,其中蓝藻门最多,占总量的 40.9%,硅藻门次之,占总量的 31.8%,金藻门最少,只有 1 种,为小等刺硅鞭藻(*Dictyocha fibula*);春季各站位浮游植物种类数量为 5~15 种,其中裸藻仅发现 1 种(尖尾裸藻 *Euglena oxyuris*),未发现甲藻;夏季各站位浮游植物种类数量为 2~10 种,其中硅藻门最多,占总量的 50%,甲藻仅有 3 种,裸藻只有 1 种(旋转囊裸藻 *Spinning cystis*);冬季各站位浮游植物种类数量为 3~9 种,依然是硅藻门最多,占总量的 50%。

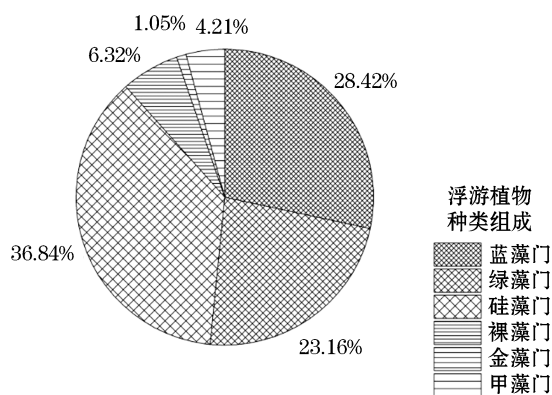


图 2 浮游植物种类组成

Fig.2 Species composition of phytoplankton in the surveying area

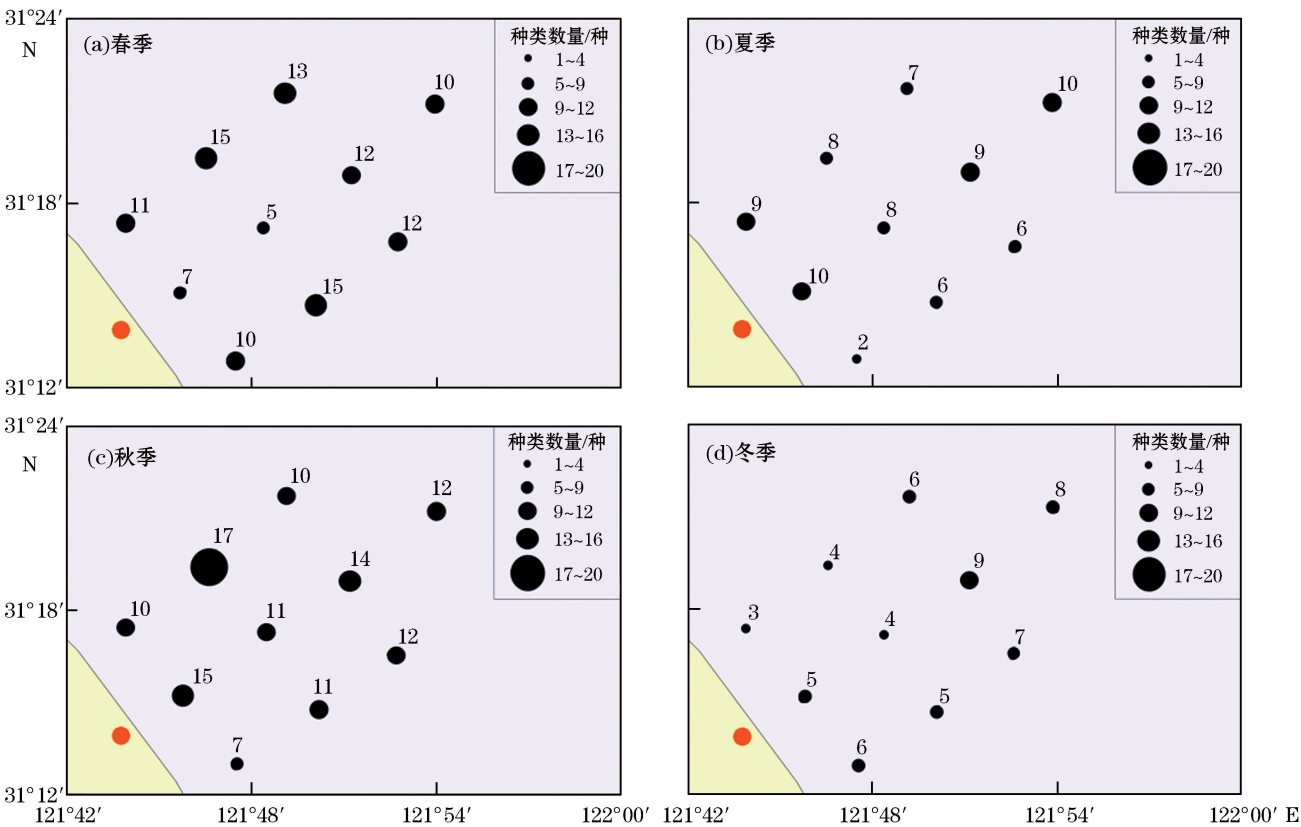


图 3 污水厂出水口邻近海域浮游植物数量时空分布特征

Fig.3 The spatial and temporal distribution of phytoplankton species number in the adjacent waters of the sewage treatment plant

2.2 浮游植物优势种

该污水厂排水口邻近海域浮游植物种类优势度如表 1,硅藻门中的中肋骨条藻为全年优势种,且占据绝对优势地位。春季优势种为中肋骨条藻、颗粒直链藻、水华微囊藻、拉氏拟浮丝藻、阿氏浮丝藻和土生伪鱼腥藻,其中中肋骨条藻在各站位均有分布,优势度($Y=0.36$) 远高于颗粒直链藻($Y=0.11$)和其他浮游植物,占绝对优势;夏季优势种为中肋骨条藻、颗粒直链藻和水华微囊藻三种,中肋骨条藻优势度为 0.42,远高于其他藻类;秋季优势种为中肋骨条藻、水华微囊藻、拉氏拟浮丝藻、阿氏浮丝藻和土生伪鱼腥藻,中肋骨条藻优势度为 0.34,水华微囊藻优势度为 0.08;冬季优势种仅为中肋骨条藻和颗粒直链藻,优势度分别为 0.87 和 0.04。

表 1 污水厂排水口邻近海域浮游植物常见种季节变化

Table 1 Seasonal variations of the common phytoplankton species in the adjacent waters of the sewage treatment plant

类 别	物 种	春 季		夏 季		秋 季		冬 季	
		F	Y	F	Y	F	Y	F	Y
蓝藻门	水华微囊藻	1.00	0.07	0.87	0.02	0.68	0.08	0.13	**
	拉氏拟浮丝藻	0.93	0.03	0.74	0.01	0.59	0.02	0.43	0.01
	阿氏浮丝藻	0.77	0.02	0.69	0.01	0.44	0.04	0.21	**
	土生伪鱼腥藻	0.84	0.02	0.71	0.01	0.76	0.02	0.45	0.01
硅藻门	中肋骨条藻	1.00	0.36	1.00	0.42	1.00	0.34	1.00	0.87
	颗粒直链藻	0.67	0.11	0.58	0.13	0.73	0.01	0.53	0.04

注: F 为出现频度; Y 为优势度, ** 表示 $Y<0.001$

2.3 浮游植物细胞密度时空变化

污水厂排水口邻近海域浮游植物细胞密度(ρ)季节性变化非常明显(图 4)。具体表现为: $\rho_{秋季} > \rho_{冬季} > \rho_{春季} > \rho_{夏季}$, 全年平均密度约 521.25×10^4 cells/L, 峰值出现在秋季, 位于 4 号站位, 达到 $4\,624.91 \times 10^4$ cells/L, 最低密度出现于夏季, 位于 9 号站位, 仅为 5.01×10^4 cells/L。不同种类浮游植物的密度占比不同, 其中硅藻门浮游植物贡献最多, 年均个体密度高达 412.25×10^4 cells/L, 占比为 79.09%, 其次为蓝藻门 112.48×10^4 cells/L, 占比 19.71%; 绿藻门、裸藻门、甲藻门浮游植物极少, 均占比不到 1%。各季度分布特征中, 硅藻门个体密度($\rho_{硅藻}$)与浮游植物总密度差异相似, 同样为 $\rho_{硅藻秋季} > \rho_{硅藻冬季} > \rho_{硅藻春季} > \rho_{硅藻夏季}$ 。

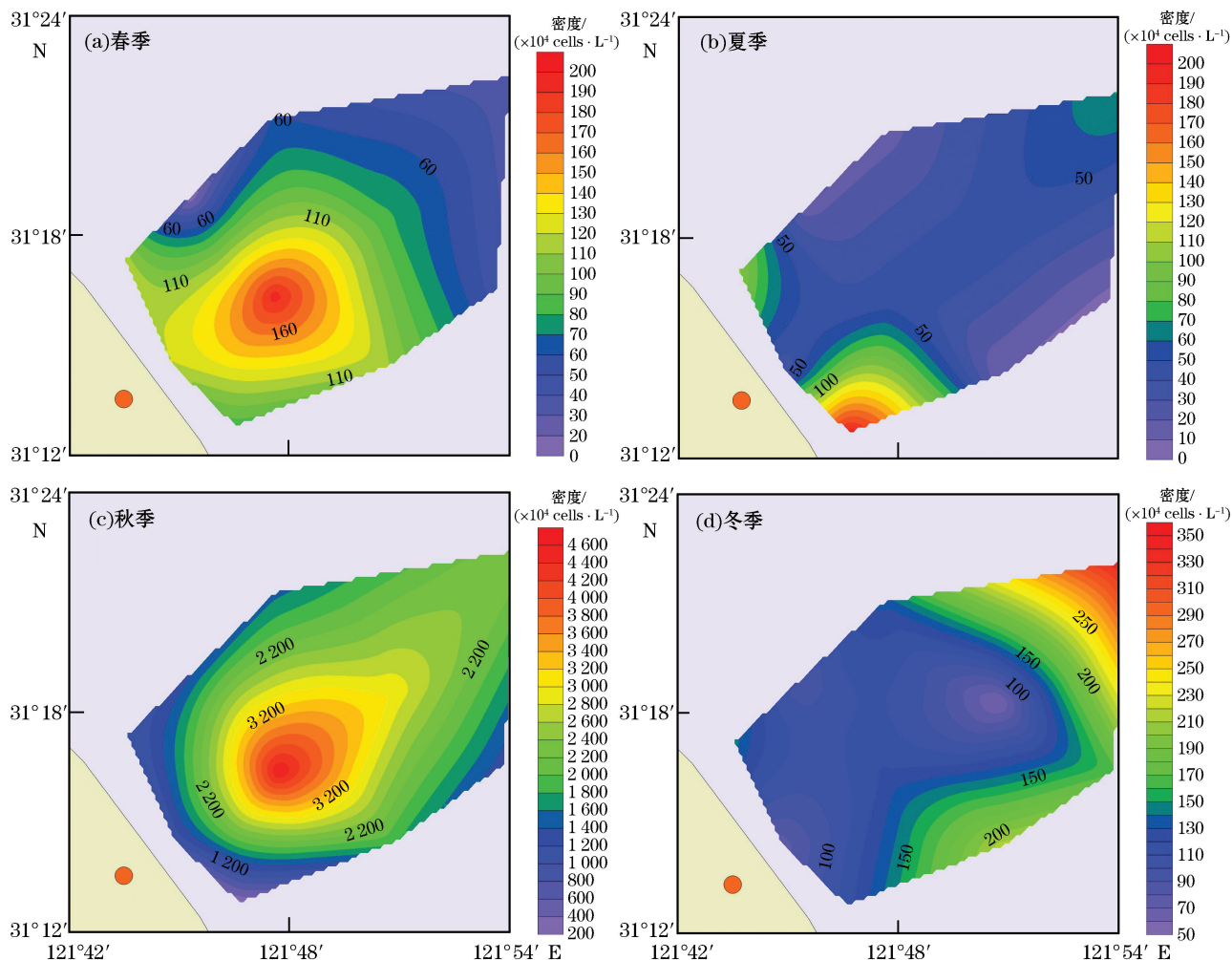


图 4 污水厂排水口邻近海域浮游植物密度时空分布规律

Fig.4 The spatial and temporal distribution of phytoplankton density in the adjacent waters of the sewage treatment plant

2.4 浮游植物群落特征与水质评价

由表 2 可知, 该污水厂排水口邻近海域浮游植物多样性指数季节差异较为显著。Shannon-Wiener 多样性指数(H')年均值为 2.19, 变化范围为 1.10~3.32, H' 值变化趋势为 $H'_{夏季} > H'_{冬季} > H'_{秋季} > H'_{春季}$, 除却春季均值仅为 1.23, 夏、秋、冬三季 H' 指数均超过 2.00。Margalef 丰富度指数(D)全年均值为 3.09, 变化范围为 2.24~3.97, D 值季节分布趋势为 $D_{冬季} > D_{夏季} > D_{秋季} > D_{春季}$ 。Pielou 均匀度指数(J)全年均值为 0.53,

变幅为2.14~3.97, J 值在夏、冬季较高,秋、春季较低。

表 2 不同季节污水厂排水口邻近海域浮游植物多样性指数

Table 2 Phytoplankton diversity indexes in the adjacent waters of the sewage treatment plant in different seasons

季 节	项 目	Shannon-Wiener 多样性指数	Pielou 均匀度指数	Margalef 丰富度指数
春季	变化范围	1.10~1.93	0.07~0.24	2.24~2.67
	平均值	1.23	0.14	2.51
夏季	变化范围	2.50~3.32	0.65~0.87	3.24~3.97
	平均值	2.94	0.75	3.48
秋季	变化范围	1.30~2.74	0.43~1.14	2.14~3.05
	平均值	2.21	0.57	2.74
冬季	变化范围	2.08~2.79	0.44~0.58	3.43~3.91
	平均值	2.39	0.47	3.66

依据浮游植物多样性指数水质评价标准(表 3),由污水厂排水口邻近海域浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数全年均值(2.19)可知,本研究区域水体处于轻中污染等级;由 Pielou 均匀度指数(0.47)和 Margalef 丰富度指数(3.09),结果亦显示水体处于中度污染等级。根据《海水水质标准》(GB 3097—1997)^[16],研究海域水质总体保持在一类至三类海水水质(表 4)。溶解氧指标显示该区域全年为一类水质,pH 指标显示该区域为二类水质,悬浮物指标显示该区域为三类水质。因此综合表 3 和表 4 的分析数据,综合表明污水厂排水口邻近海域水质总体属于轻中污染。

表 3 近岸水域水体污染评价

Table 3 Evaluation of water pollution in the adjacent waters of the sewage treatment plant

多样性指数	评价标准 ^[17-18]	全年均值	污染评价
Shannon-Wiener 多样性指数	$0 < H' \leq 1$ 为重污染	2.19	轻中污染
	$1 < H' \leq 2$ 为重中污染		
	$2 < H' \leq 3$ 为轻中污染		
	$H' > 3$ 为轻污染或无污染		
Margalef 丰富度指数	$0 < D \leq 1$ 为重度污染	3.09	中度污染
	$1 < D \leq 2$ 为严重污染		
	$2 < D \leq 4$ 为中度污染		
	$4 < D \leq 6$ 为轻度污染		
Pielou 均匀度指数	$D > 6$ 为清洁水	0.48	中度污染
	$0 < J \leq 0.3$ 为重度污染		
	$0.3 < J \leq 0.5$ 为中度污染		
	$0.5 < J \leq 0.8$ 为轻污染或无污染		

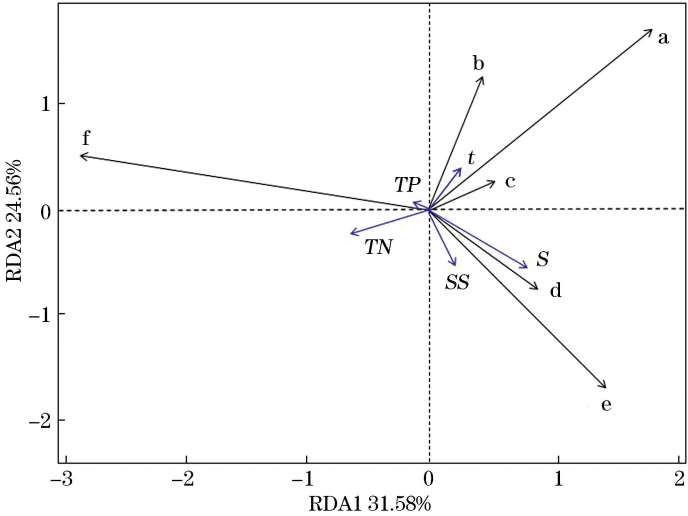
表 4 调查区域主要理化因子

Table 4 Main physical and chemical parameters in the adjacent waters of the sewage treatment plant

季 节	S	$t/^{\circ}\text{C}$	pH	$\text{TN}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{TP}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{SS}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	$\text{DO}/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
春季	13.27	11.40	7.96	0.49	0.08	18	7.85
夏季	16.42	20.90	7.90	1.75	0.10	15	6.81
秋季	22.89	24.60	7.69	4.02	0.15	11	7.54
冬季	17.41	20.00	7.57	1.49	0.05	6	7.54
均值	17.49	19.22	7.78	1.94	0.09	12.5	7.43

2.5 浮游植物优势种与环境因子相关性分型

通过对 6 种优势种类丰度及 5 项环境因子(水温 t 、盐度 S 、总氮 TN 、总磷 TP 和悬浮物 SS)进行 RDA 分析,得到 RDA1 和 RDA2 的解释度分别为 31.58%和 24.56%(图 5)。分析结果如表所示,该研究中,2 个环境排序轴和 2 个物种排序轴相关系数均为 0,且蒙特卡洛检验结果中,第一轴和全部轴显著性差异值 $p<0.05$,表明排序结果是可靠的。



注:a 为水华微囊藻;b 为拉氏拟浮丝藻;c 为阿氏浮丝藻;d 为中肋骨条藻;e 为颗粒直链藻;f 为土生伪鱼腥藻

图 5 浮游植物优势种与环境因子的冗余分析

Fig.5 Redundancy analysis (RDA) of predominant phytoplankton species and environmental factors

从图 5 中可以看出, S 和 SS 出现正相关,所起到的作用也相近,中肋骨条藻(d)和颗粒直链藻(e)与 S 呈现正相关,土生伪鱼腥藻(f)与 S 负相关;水华微囊藻(a)、拉氏拟浮丝藻(b)、阿氏浮丝藻(c)主要受到 t 影响;土生伪鱼腥藻(f)与 TN 和 TP 呈现一定的正相关性。

3 讨 论

3.1 浮游植物群落结构及空间分布特征

上海是海陆交汇和人类活动十分频繁的区域,生态系统脆弱且复杂。根据 2019 年中国海洋环境状况公

报^[19],上海及邻近海域是我国近海富营养化程度最高的区域之一,水质总体较差。本研究区域位于长江口南侧,受到长江径流冲淡水影响,存在径流和潮汐的双向作用,且污水厂排水口为淡水,导致该水域环境因子变化非常大,营养盐浓度和悬浮物含量高,环境条件十分特殊,水体浑浊,泥沙含量高,大部分浮游植物很难生存或大量生长^[20]。

本区域采集到的浮游植物以硅藻门占绝对优势,在 2019 年全年的调查中,浮游植物种类组成呈现明显的季节性变化,其中秋季为年度浮游植物种类数目最多的季节,共采集到 44 种,其次是春季(36 种),夏季采集到 30 种,冬季仅采集到 24 种,为全年浮游植物种类数目最少的季节;浮游植物细胞密度最高值处于秋季,这与浮游植物种类组成最多所处季节相同。由于中肋骨条藻在细胞丰度上占有绝对优势,它的种群变化规律决定了总体浮游植物个体丰度的时空特征。

本区域中鉴定的浮游植物种类组成多为淡水浮游植物,分布有广盐种,以硅藻类为主。其中,中肋骨条藻作为一种近岸分布种,其盐度耐受范围为 13~36,是常见的广盐、广温性硅藻类浮游植物类群^[21];此外,中肋骨条藻可以在浑浊水体中尽可能多地吸收光线^[22],它的分布与透明度呈负相关性^[23]。有研究表明,本研究所处区域表层水悬浮物为 142.6~2 176.1 mg/L^[24],因此,水体浊度是导致本次调查中肋骨条藻为全年优势种的重要因素。

3.2 浮游植物多样性与水质分析

对污水厂排水口邻近海域全周年 Shannon-Wiener 指数、Margalef 指数和 Pielou 均匀度指数进行统计分析得到的结果,反映了浮游植物群落的物种组成、群落结构和生态功能,也可以作为水质评价的生态学依据。总体来看,该区域的生物多样性和均匀度均处于中等偏下水平,但鉴于各个站位中肋骨条藻的优势度较大,种间分布不均匀,导致其群落结构相对比较简单。本研究中浮游植物的多样性指数和均匀度指数季节性变化规律不明显,均在夏季达到最大值。根据表 3 的水质评价标准,判定研究区域的水质清洁度为轻中度污染。

近几年,国家和地方对城镇污水排放提出了很高的要求,规定排放标准不低于一级 A 标准,以期进一步减小污水厂排放的污水对海洋环境产生的负面影响。通过获取该污水厂排水口各项指标数据,本研究发现污水厂排水总磷平均含量为 (0.18 ± 0.03) mg/L,总氮为 (8.92 ± 1.70) mg/L,氨氮(NH_4^+-N)为 (1.44 ± 0.34) mg/L,而该污水厂邻近海域总体水质要比污水厂出水口水质差(待发表),说明污水厂对其邻近海域水质不会造成明显影响。此外,肖南燕等^[24]研究表明长江口附近海域浮游植物 Shannon-Wiener 多样性指数、Margalef 丰富度指数和 Pielou 均匀度指数分别为 2.59, 4.00 和 0.55,显示长江口水体总体处于轻中度污染水平,与本研究浮游植物水质评价基本一致,说明研究区域本身水体污染性偏高,与污水厂排水口营养物质输入相关性不大。

3.3 浮游植物与环境因子相关性分析

盐度、水温、营养盐状况、水动力参数等环境条件直接或间接对浮游植物种类组成和分布特征产生影响^[25-26]。本研究依据 RDA 排序结果显示,水温、盐度和悬浮物分别是影响该污水厂排放口邻近海域浮游植物分布的主要环境因子。

本研究区域地处长江口,长江径流和咸潮入侵其盐度变化较大,3 月份受长江冲淡水的强烈影响,呈现出较强的盐度梯度,此时盐度成为限制浮游植物生长的主要因子,RDA 分析同样显示 3 月份浮游植物受盐度影响较大。水温是影响浮游植物呼吸作用强度和光合酶促作用的关键因子,进而影响浮游植物的生长繁育过程。蓝藻为暖水生活习性^[27],9 月份蓝藻为优势种群,主要受温度影响,呈现正相关性。

4 结 语

基于 2019 年上海某污水厂排水口邻近海域 4 个季节浮游植物监测结果,开展了该海域浮游植物多样性

的研究及相关水质分析。共鉴定出浮游植物 6 门 95 种,其中硅藻门 35 种,中肋骨条藻(*S.costatum*)为全年优势种。浮游植物物种多样性指数季节性略有差异,并显示该海域水质总体属于轻中污染。作为引起上海富营养化来源之一的城镇污水厂,满足排放标准对缓解上海水体污染压力十分重要。据了解,2017 年该污水厂进行了提标改造工程,根据对该污水厂出水口水质进行连续跟踪监测,与提标改造前上海受影响区域水质相比,本次水质总体上得到改善,而且经 RDA 分析该区域浮游植物物种结构与环境因子的关系,悬浮物、盐度、水温和溶解氧等环境因子在本次调查浮游植物物种组成及分布方面起到重要作用。

参考文献(References):

- [1] WANG J, JIANG Z H, DONG S L. Role of filter-feeding bivalves in proliferation of phytoplankton community[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(5): 765-768. 王俊,姜祖辉,董双林.滤食性贝类对浮游植物群落增殖作用的研究[J].应用生态学报,2001,12(5): 765-768.
- [2] JIN D X. Marine diatoms[M]. Xiamen: Xiamen University Press, 1991. 金德祥.海洋硅藻学[M].厦门:厦门大学出版社,1991.
- [3] LAI J X, XU M B, ZHUANG J L, et al. Study on the community structure of Phytoplankton in the Beibu Gulf Coast and its relationships with environmental factors in spring in Guangxi, China[J]. Journal of Ocean Technology, 2017, 36(6): 65-70. 赖俊翔,许铭本,庄军莲,等.广西北部湾近岸海域春季浮游植物群落结构特征及与环境因子的关系[J].海洋技术学报,2017,36(6): 65-70.
- [4] PROKOPKIN I G, MOOIJ W M, JANSE J H, et al. A general one-dimensional vertical ecosystem model of Lake Shira (Russia, Khakassia): description, parametrization and analysis[J]. Aquatic Ecology, 2010, 44(3): 585-618.
- [5] SU Y, WEN H, WANG D W, et al. Analysis on the key water quality factors to phytoplankton community in Wujingang Region of Taihu Lake[J]. Environmental Science, 2011, 32(7): 1945-1951. 苏玉,文航,王东伟,等.太湖武进港区域浮游植物群落特征及其主要水质污染影响因子分析[J].环境科学,2011,32(7): 1945-1951.
- [6] YANG J J. The historical analysis on the evolution of the relationship between economy and ecology in the Yangtze River economic zone (from 1979 to 2015): taking water environment as the center[D]. Wuhan: Zhongnan University of Economics and Law, 2018. 杨晶晶.长江经济带经济与生态关系演变的历史分析(1979—2015年)——以水环境为中心[D].武汉:中南财经政法大学,2018.
- [7] SHEN G Y, HUANG L F, GUO F, et al. Marine ecology[M]. Beijing: Science Press, 2010. 沈国英,黄凌风,郭丰,等.海洋生态学[M].北京:科学出版社,2010.
- [8] National Center of Ocean Standards and Metrology. The technical specification for terrestrial pollution source and near sea area monitoring: HY/T 076—2005[S]. Beijing: Standards Press of China, 2005. 国家海洋标准计量中心.陆源入海排污口及邻近海域监测技术规范: HY/T 076—2005[S].北京:中国标准出版社,2005.
- [9] State Oceanic Administration. Specifications for oceanographic survey: Part 6 Marine biological survey: GB/T 12763.6—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. 国家海洋局.海洋调查规范:第6部分 海水生物调查: GB/T 12763.6—2007[S].北京:中国标准出版社,2007.
- [10] CHENG Z D, GAO Y H. Chinese seaweed records[M]. Beijing: Science Press, 2012. 程兆第,高亚辉.中国海藻志[M].北京:科学出版社,2012.
- [11] HU H J, WEI Y X. The freshwater algae of China: systematics, taxonomy and ecology[M]. Beijing: Science Press, 2006. 胡鸿钧,魏印心.中国淡水藻类:系统、分类及生态[M].北京:科学出版社,2006.
- [12] KRAMMERTT K, LANGE-BERTALOT H. Bacillariophyceae[M]. Guangzhou: Zhongshan University Press, 2012. KRAMMERTT K, LANGE-BERTALOT H. 欧洲硅藻鉴定系统[M].广州:中山大学出版社,2012.
- [13] SHANNON C E, WEAVER W. The mathematical theory of communication[M]. Champaign: University of Illinois Press, 1949: 11-25.
- [14] SUN J, LIU D Y. The application of diversity indices in marine phytoplankton studies[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(1): 62-75. 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,2004,26(1): 62-75.
- [15] PIELOU E C. An introduction to mathematical ecology[M]. New York: Wiley Interscience, 1969: 1-286.
- [16] State Environmental Protection Administration. Sea water quality standard: GB 3097—1997[S]. Beijing: Standards Press of China, 1997. 国家环境保护局.海水水质标准: GB 3097—1997[S].北京:中国标准出版社,1997.
- [17] ZHANG J P, HUANG X P, JIANG Z J, et al. Assessment of the Pearl River Estuary pollution by water comprehensive pollution index and biodiversity index[J]. Journal of Tropical Oceanography, 2010, 29(1): 69-76. 张景平,黄小平,江志坚,等.珠江口海域污染的水质综合污染指数和生物多样性评价[J].热带海洋学报,2010,29(1): 69-76.
- [18] SHEN Y F, ZHANG Z S, GONG X J. New technology of microbiomonitoring[M]. Beijing: China Architecture and Building Press,

1990. 沈韞芬, 章宗涉, 龚循矩. 微型生物监测新技术[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1990.
- [19] Ministry of Ecological Environment of the People's Republic of China. Bulletin on the state of china's marine ecological environment in 2019[EB/OL]. (2020-06-01)[2020-08-19]. <http://www.luoshan.gov.cn/ueditor/php/upload/file/20200603/1591172038696640.pdf>. 中华人民共和国生态环境部. 2019 年中国海洋生态环境状况公报[EB/OL]. (2020-06-01)[2020-08-19]. <http://www.luoshan.gov.cn/ueditor/php/upload/file/20200603/1591172038696640.pdf>.
- [20] HAN X R. Analytical study on multi-environment factors that influencing the phytoplankton growth in the Changjiang Estuary and its adjacent area[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2009. 韩秀荣. 长江口及邻近海域浮游植物生长的多环境效应因子影响解析研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2009.
- [21] HUO W Y, YU Z M, ZOU J Z, et al. Outbreak of *Skeletonema Costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2001, 32(3): 311-318. 霍文毅, 俞志明, 邹景忠, 等. 胶州湾中肋骨条藻赤潮与环境因子的关系[J]. 海洋与湖沼, 2001, 32(3): 311-318.
- [22] HUANG Y H, CHU J H, QI Y Z. Multivariable analysis of *Skeletonema Costatum* quantity in Yantian, Dapeng Bay, the South China Sea[J]. Oceanologia et Limnologia Sinica, 1997, 28(2): 121-127. 黄奕华, 楚建华, 齐雨藻. 南海大鹏湾盐田海域骨条藻数量的多元分析[J]. 海洋与湖沼, 1997, 28(2): 121-127.
- [23] GALLAGHER J C, WOOD A M, ALBERTER S. Ecotypic differentiation in the marine Diatom *Skeletonema* sp.: influence of light intensity on the photosynthetic apparatus[J]. Marine Biology, 1984, 82(2): 121-134.
- [24] XIAO N Y, BIAN J Y, WU H X, et al. Annual changes of environmental factors in north branch[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(Suppl.1): 121-134. 肖南燕, 边佳胤, 吴惠仙, 等. 长江口北支水域生态环境因子的周年变化[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(增刊 1): 153-159.
- [25] BERGE T, DAUGBJERG N, ANDERSEN B B, et al. Effect of lowered pH on marine phytoplankton growth rates[J]. Marine Ecology Progress, 2010, 416: 79-91.
- [26] JIANG Y J, HE W, LIU W X, et al. The seasonal and spatial variations of phytoplankton community and their correlation with environmental factors in a large eutrophic Chinese lake (Lake Chaohu)[J]. Ecological Indicators, 2014, 40: 58-67.
- [27] HU H H, SHI Y J, CONG W, et al. Photosynthetic characteristics and nutrient absorptin of *skeletonema costatum* at different nitrogen and phosphorus levels[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2004, 10(6): 735-739. 胡晗华, 石岩峻, 丛威, 等. 不同氮磷水平下中肋骨条藻对营养盐的吸收及光合特性[J]. 应用与环境生物学报, 2004, 10(6): 735-739.

Structural Analysis of Phytoplankton Community in Adjacent Waters of a Sewage Treatment Plant in Shanghai

YU Yang¹, ZHANG Yi-wen¹, LIU Jing², YIN Jie¹

(1. College of Marine Ecology and Environment, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China;

2. Center of Shanghai Construction Land and Land Consolidation Affairs, Technical Innovation Center of Ecological Restoration Engineering in Metropolitan Area of Ministry of Natural Resources, Shanghai 200003, China)

Abstract: Based on the year-round structural data of phytoplankton community collected in the adjacent waters of a sewage plant located at the south bank of the Yangtze River Estuary in 2019 the phytoplankton biodiversity is analyzed in order to carry out environmental impact assessment of the sewage treatment plant. Totally, 95 species of 6 phytoplankton phyla have been identified, which include 35 species of Bacillariophyta, 27 species of Cyanophyta, 22 species of Chlorophyta, 6 species of Euglenophyta, 4 species of Pyrrophyta and 1 species of Chrysophyta. The species composition of phytoplankton varies seasonally, with more species being in spring and autumn and less in winter and summer. In the predominant species, diatom is the most and its mean annual cellular density in biological population is 412.25×10^4 cells/m³, accounting for about 79.09% of all the phytoplankton species. Among the diatom, *Skeletonema costatum* is the dominant species all year round. The annual average values of Shannon-Wiener index, Margalef index and Pielou index are 2.19, 3.09, 0.48 respectively, indicating that the water in the adjacent waters of the sewage treatment plant is in a medium pollution state. The redundancy analysis (RDA) shows that the environmental factors affecting greatly the phytoplankton in the study area are suspended matter concentration, salinity, water temperature and dissolved oxygen. In this paper, the ecological indicators of phytoplankton communities are used as the evaluation indicators of water health degree in the offshore area and also as the supplement of water quality assessment, which is in favor of comprehensive, systematic and refined evaluation and analysis.

Key words: phytoplankton; community structure; species diversity; water quality assessment

Received: August 19, 2020