

文章编号: 1674 - 5566(2014)03 - 0395 - 08

2012 年小洋山近岸水域浮游植物群落结构的特征

陈立婧, 张 薇, 边佳胤, 薛俊增

(上海海洋大学 省部共建水产种质资源发掘与利用教育部重点实验室, 上海 201306)

摘 要: 洋山港是中国首个离岸式深水港口, 小洋山位于洋山港海域北侧。2012 年 1 月 - 12 月对小洋山近岸水域浮游植物进行了采样调查, 共鉴定出浮游植物 183 种, 隶属 7 门 77 属。其中硅藻门为主要类群, 共 51 属 143 种, 占物种丰富度的 78.14%。浮游植物的年平均细胞丰度为 $(7.01 \pm 6.26) \times 10^4$ cell/L。骨条藻 (*Skeletonema* sp.) 和具槽帕拉藻 (*Paralia sulcata*) 为全年优势种, 细长列海链藻 (*Thalassiosira leptopus*)、碎片菱形藻 (*Nitzschia frustulum*)、菱形缝舟藻 (*Rhaphoneis rhomoides*) 和梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*) 为常见种。Shannon-Wiener 多样性指数 (H')、Margalef 丰富度指数 (D) 和 Pielous 均匀度指数 (J) 全年均值分别为 2.59 ± 0.75 、 4.00 ± 1.44 和 0.55 ± 0.15 。硅藻商全年均值为 1.06 ± 0.20 。冗余分析 (RDA) 表明对该水域浮游植物影响较大的环境因子是盐度、水温、溶解氧和悬浮物浓度。

研究亮点: 洋山港是中国首个离岸式深水港口, 小洋山近岸水域环境生态变化有其特殊性。小洋山近岸水域浮游植物一直都缺乏全面详细的调查。本文对小洋山近岸水域浮游植物群落结构进行了周年调查, 为洋山港海域的环境保护及其资源的合理利用提供科学依据。

关键词: 洋山港; 浮游植物; 群落结构; 物种多样性

中图分类号: S 932.7

文献标志码: A

浮游植物是海洋中营浮游生活的藻类, 它们是海洋最主要的初级生产者, 几乎是全部海洋动物食物来源的基础, 是该生态系统食物链中最重要的一环之一。海洋中浮游植物的种类和数量的变化直接或间接地影响其他海洋生物的丰度和分布, 甚至会影响整个生态系统的稳定^[1-2]。

为满足上海建设国际航运中心的需求, 上海市政府在离岸 30 km 外的洋山海域辟建了洋山港, 该港口是中国首个离岸式深水港口^[3]。小洋山岛链位于洋山港海域北侧, 距离上海芦潮港仅 31 km, 距离国际航线 45 km^[4], 现已全部建设完成投入使用。随着外来船只的停靠、压载水的排入、港区内人类活动等因素的影响日益增大, 在该水域进行浮游植物群落动态研究继而探讨该港口海域环境生态变化日趋重要。已有学者对小洋山港港口的浮游植物、桡足类、大型污损生物

等进行过研究^[5-7], 但对小洋山近岸水域浮游植物群落生态的研究较少。本次实验于 2012 年 1 - 12 月对小洋山近岸海域开展了一周年调查研究, 对浮游植物进行监测, 以期为洋山港海域的环境保护及其资源的合理利用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样本的采集与处理

参照《海洋监测规范》^[8], 根据采样海域径流特性及水动力学变化特点, 于 2012 年 1 - 12 月进行逐月浮游植物样本采集, 采样日期为每月中下旬, 每次采样在 2 h 内完成。在小洋山近岸海域设置 5 个采样点 (图 1), 采样点覆盖港内锚地以及锚地里外, 等距离设置。其中, S1 点在港口内部; S2、S3 点在港内锚地以内, 有航船停靠, S4 点靠近航道最窄处, 水流量最大; S5 点最靠近外海。

收稿日期: 2013-12-19 修回日期: 2014-03-05

基金项目: 上海市重点学科建设项目 (S30701); 上海高校知识服务平台上海海洋大学水产动物遗传育种中心 (ZF1206); 上海市科学技术委员会项目 (11dz1205000)

作者简介: 陈立婧 (1971—), 女, 副教授, 研究方向为浮游生物生态学。E-mail: ljchen@shou.edu.cn

通信作者: 薛俊增, E-mail: jzxue@shou.edu.cn

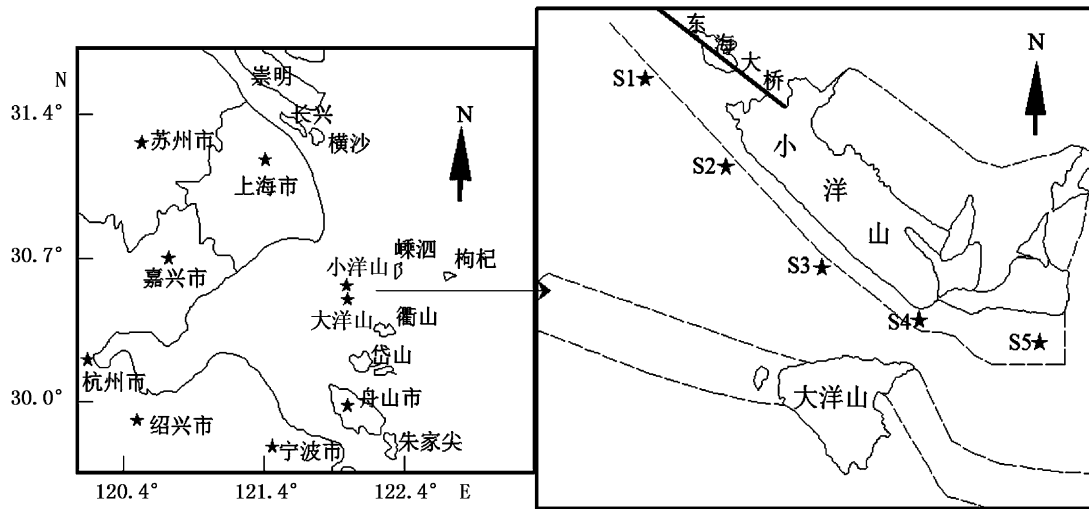


图1 调查水域和采样点示意图

Fig. 1 Investigation waters and sampling sites

浮游植物定量样品采用浮游植物采水器采集混合水样,用中性甲醛溶液(体积浓度5%)固定,样品在实验室根据泥沙含量作进一步浓缩,在OLYMPUS-CX21光学显微镜下进行计数。镜检分类的主要参考书籍有《中国海藻志》^[9]、《中国经济海藻志》^[10]、《中国淡水藻类:系统、分类及生态》^[11]、《欧洲硅藻鉴定系统》^[12]等。

电导率、溶解氧(DO)、水温、盐度等水质指标采用YSZ85-25型水质分析仪现场测定;pH使用HANNA便携式pH测定仪现场测定。用柱状采水器采集表底层混合水样1L,带回实验室后分析总氮(TN)、总磷(TP)和悬浮物(SS)等。

1.2 多样性指数和硅藻商指数分析

物种多样性指数(H')的计算采用香农-威纳指数^[13](Shannon-Wiener index),公式为:

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

物种丰富度指数(D)采用Margalef的计算公式^[14]:

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

物种均匀度指数(J)采用Pielou的计算公式^[15]:

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

物种优势度 Y 的计算公式^[14]:

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

硅藻商指数的计算公式^[16]:

$$\text{硅藻商指数} = S_a / S_b \quad (5)$$

式中: S 为样品中的种类数; P_i 为第 i 种的个体数与样品总个体数的比值; n_i 为第 i 种的数量; N 为每个种出现的数量的总和; f_i 为第 i 种在各站点出现的频度; S_a 为中心硅藻种类数; S_b 为羽纹硅藻种类数。

数据处理分析采用DPS^[17]、SPSS软件^[18]、CANOCO of Windows 4.5软件^[19]进行。

2 结果

2.1 浮游植物种类组成

共采集到浮游植物183种(不包括未定种),隶属7门77属。其中硅藻门51属143种,占物种丰富度的78.14%;绿藻门10属13种,占物种丰富度的7.10%;甲藻门6属11种,占物种丰富度的6.01%;裸藻门5属10种,占物种丰富度的5.46%;蓝藻门3属3种,占物种丰富度的1.64%;金藻门1属2种,占物种丰富度的1.10%;隐藻门1属1种,占物种丰富度的0.55%。

不同季节浮游植物的组成也不相同,分别为冬季(152种) > 秋季(109种) > 春季(92种) > 夏季(73种)。春季未发现蓝藻,夏秋两季未发现隐藻。采样期内以硅藻门物种占绝对优势,绿藻门、甲藻门、裸藻门次之,蓝藻门、金藻门、隐藻门物种数较少,所占比例低于4%。各季节浮游植

物种类组成为以硅藻门为主,其余门类较少且参差不齐。春季硅藻门种类达 81 种,占该季节物种丰富度的 88.04%;裸藻门列第二,占 5.43%,甲藻门和金藻门并列第三位,均占物种丰富度的 2.17%;绿藻门和隐藻门所占比例均为 1.01%;夏季硅藻门有 57 种,占 78.08%,与春季相比有所下降,其次为甲藻门 7 种,占 9.59%,蓝藻门最少,仅 1 种;秋季硅藻门在春季基础上有所回升,有 89 种,比例为 81.65%,甲藻门、裸藻门分别有 8 种和 6 种,占该季度物种丰富度的 7.34% 和 5.50%;冬季为浮游植物种类数最多的季节,其硅藻门种类也在该季节达到最高值 129 种,所占比例为 84.87%,绿藻门在全年中冬季出现种类最多,为 9 种,所占比例为 5.92%。

骨条藻 (*Skeletonema* sp.) 和具槽帕拉藻

(*Paralia sulcata*) 为全年优势种(表 1),4 个季度水域常见种类主要为硅藻,包括中肋骨条藻、具槽帕拉藻、细长列海链藻 (*Thalassiosira leptopus*)、碎片菱形藻 (*Nitzschia frustulum*)、菱形缝舟藻 (*Rhaphoneis rhomoides*) 和梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)。在秋季,尖刺伪菱形藻 (*Pseudo-nitzschia pungens*) 出现较多,优势度 Y 值达 0.049。由此可见,硅藻是小洋山近岸水体浮游植物的主要类群,其中骨条藻年平均细胞丰度达 $(4.35 \pm 4.92) \times 10^4$ cell/L,变化幅度为 $(0.33 \sim 31.36) \times 10^4$ cell/L,占浮游植物年平均细胞丰度总量的 62.08%,由于其在细胞丰度上的优势,对硅藻乃至整个浮游植物群落的贡献最大,浮游植物丰度的平面分布趋势在一定程度上受骨条藻细胞丰度的支配。

表 1 小洋山近岸水域浮游植物常见种季节变化

Tab. 1 Seasonal variation of the common species in the Xiao Yangshan inshore waters

物种	春季		夏季		秋季		冬季	
	F	Y	F	Y	F	Y	F	Y
骨条藻 <i>Skeletonema</i> sp.	1.00	0.439	1.00	0.788	1.00	0.626	1.00	0.583
具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	1.00	0.179	0.73	0.020	0.93	0.036	1.00	0.068
细长列海链藻 <i>Thalassiosira leptopus</i>	0.67	0.013	0.80	0.016	0.93	0.017	1.00	0.014
碎片菱形藻 <i>Nitzschia frustulum</i>	0.73	0.014	0.53	**	1.00	0.026	0.87	0.013
菱形缝舟藻 <i>Rhaphoneis rhomoides</i>	1.00	0.026	0.67	**	0.80	**	0.93	0.014
梅尼小环藻 <i>Cyclotella meneghiniana</i>	0.67	0.017	0.67	**	0.80	**	0.93	0.014
尖刺伪菱形藻 <i>Pseudo-nitzschia pungens</i>	-	**	0.33	**	1.00	0.049	0.33	**

注: F 为出现频度; Y 为优势度; ** 表示 $Y < 0.01$; - 表示未出现,频度为零。

2.2 浮游植物细胞丰度及时空分布

小洋山近岸浮游植物细胞丰度在采样期内不同月份间变化明显,且差异极显著 ($F = 4.921$, $P < 0.01$)。1 月份最高,为 80.50×10^4 cell/L,5 月份最低,为 11.58×10^4 cell/L(表 2)。在年均总细胞丰度的构成中,不同门类浮游植物所占比例不尽相同,其中硅藻门比重最大,年均细胞密度为 33.609×10^4 cell/L,占 95.84%,其次是蓝藻门 0.399×10^4 cell/L、绿藻门 0.397×10^4 cell/L 和甲藻门 0.303×10^4 cell/L,比重分别为 1.14%、1.13% 和 0.87%,裸藻门、金藻门和隐藻门所占比重极小。

骨条藻在采样期内不同月份间细胞丰度变化差异极显著 ($F = 4.921$, $P < 0.01$)。从浮游植物细胞丰度季节分布 Box-Whisker 图中可以看出,小洋山近岸浮游植物群落细胞丰度、硅藻的总细胞丰度和骨条藻的细胞丰度变化趋势基本

一致(图 2)。由于骨条藻在细胞丰度上所占的优势,它的分布几乎代表了浮游植物群落的分布格局,在该调查水域骨条藻的种群动态决定了浮游植物总细胞丰度的分布。

各采样点浮游植物细胞丰度的分布无显著差异 ($F = 0.992$),最高为 S5 站点,全年均值为 $(10.01 \pm 9.07) \times 10^4$ cell/L;最低为 S4 站点,全年均值为 $(5.55 \pm 5.57) \times 10^4$ cell/L。

2.3 浮游植物多样性指数及硅藻商指数

小洋山近岸海域浮游植物多样性指数有明显的时间分布规律。Shannon-Wiener 多样性指数全年均值为 2.59 ± 0.75 ,变化范围为 0.36 ~ 4.08。Margalef 丰富度指数全年均值为 4.00 ± 1.44 ,变化范围为 1.36 ~ 7.11。Pielous 均匀度指数全年均值为 0.55 ± 0.15 ,变化范围为 0.09 ~ 0.84。 H' 值表现出冬季 > 春季 > 秋季 > 夏季的季节分布趋势, J 值表现出冬季 > 秋季 > 春季 >

夏季的季节分布趋势, D 表现为春季 > 冬季 > 秋季 > 夏季的季节分布趋势。硅藻商指数全年均值为 1.06 ± 0.20 , 变化范围为 $0.77 \sim 1.36$ 。硅藻

商指数表现为秋季 > 冬季 > 春季 > 夏季的季节分布趋势。

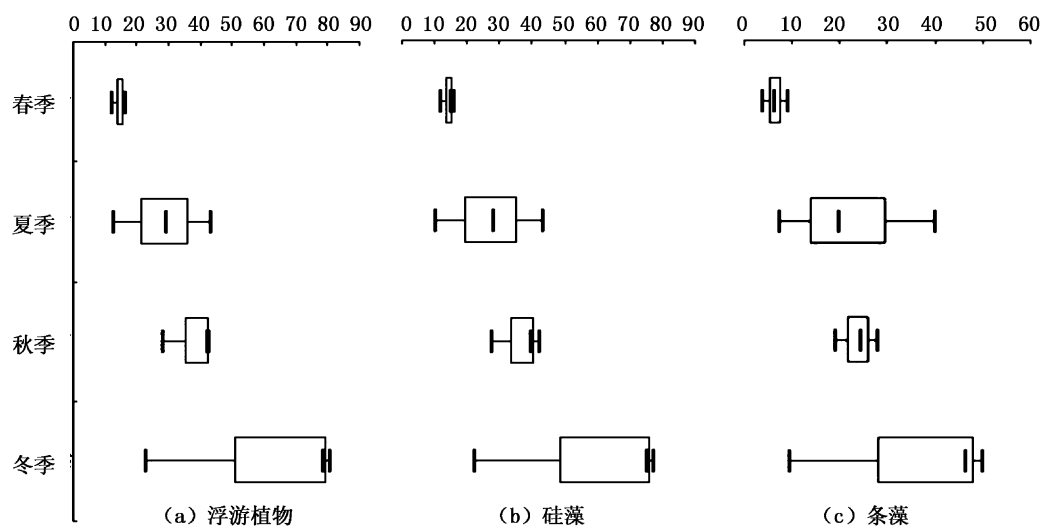


图 2 小洋山近岸水域浮游植物、硅藻和骨条藻细胞丰度 ($\times 10^4$ cell/L) Box-Whisker 图

Fig. 2 The annual variations of cells density ($\times 10^4$ cell/L) of phytoplankton, diatom and *Skeletonema* sp. in the Xiao Yangshan inshore waters (Box and Whisker plot)

浮游生物的各项多样性指数对水质有着不同的评价标准(表 2)。根据评价标准, Shannon-Wiener 多样性指数和 Margalef 丰富度指数均处于轻中污染等级, Pielous 均匀度指数处于轻污染

或无污染等级, 硅藻商指数显示该水域水体富营养化, 但其数值位于水体贫、富营养化的分界点。因此综合各项数据表明, 小洋山近岸水域水质总体属于轻度污染。

表 2 小洋山近岸水域水体污染评价

Tab. 2 Degree of saprobity in the Xiao Yangshan inshore waters

	评价标准 ^[20-21]	全年均值	污染评价
Shannon-Wiener 多样性指数	0~1: 重污染 1~2: 重中污染 2~3: 轻中污染 大于 3: 轻污染或无污染	2.59	轻中污染
Margalef 丰富度指数	0~1: 重度污染 1~2: 严重污染 2~4: 中度污染 4~6: 轻度污染 大于 6: 清洁水	4.00	轻中污染
Pielous 均匀度指数	0~0.3: 重度污染 0.3~0.5: 中度污染 0.5~0.8: 轻污染或无污染	0.55	轻污染或无污染
硅藻商指数	大于 1: 水体富营养化 小于 1: 水体贫营养化	1.06	水体富营养化

2.4 浮游植物与环境因子的关系

通过对物种数据和环境数据进行 DCA 分析

得到 4 个排序轴中梯度最大值为 1.127, 说明进一步分析应该采用基于线性模型的排序方法, 本

文选取冗余分析(RDA)。冗余分析是一种线性多元直接梯度分析,它基于统计学的角度评价一个或一组变量与另一组多变量数据之间的关系。RDA 分析方法能有效地对多个环境指标进行统计检验,并确定对群落变化具有最大解释能力的

最小变量组,从而更好地反映群落与环境之间的变化^[22]。

2012 年 RDA 分析的理化指标如表 3 所示,环境因子与前两个排序主轴的相关系数如表 4 所示。

表 3 小洋山近岸水域浮游植物 RDA 分析主要理化指标

Tab. 3 Main physicochemical parameters of RDA of phytoplankton in the Xiao Yangshan inshore waters

指标	盐度	水温 / $^{\circ}\text{C}$	总氮 TN / (mg/L)	总磷 TP / (mg/L)	悬浮物 SS / (g/L)	溶解氧 DO / (mg/L)	pH
均值	18.15	17.155	1.68	0.55	0.50	7.84	8.14
范围	13.40 ~ 22.30	6.20 ~ 27.90	0.34 ~ 6.00	0.08 ~ 2.83	0.02 ~ 2.98	5.27 ~ 10.76	7.93 ~ 8.35

表 4 RDA 主排序轴与环境因子的相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between environmental factors and the main ordination axes of RDA

指标	轴 1	轴 2
盐度	0.251 4	-0.697 2
水温/ $^{\circ}\text{C}$	-0.393 5	0.590 1
总氮/ (mg/L)	0.164 0	0.268 3
总磷/ (mg/L)	-0.447 3	-0.166 0
悬浮物/ (g/L)	0.608 0	0.106 5
溶解氧/ (mg/L)	0.213 3	-0.640 0
pH	0.282 6	-0.560 9

根据小洋山近岸水域浮游植物组成与环境因子关系的 RDA 排序图(图 3)中可以看出,对该水域浮游植物影响较大的环境因子是盐度、水温、溶解氧和悬浮物浓度。第一、第二排序轴的特征值分别是 0.154 和 0.096;轴 1 浮游植物种类与环境因子的相关性达到 0.738,轴 2 达到 0.842;物种累计百分数分别为 15.4% 和 25.0%;物种-环境相关性累计百分数分别为 48.6% 和 79.0%;说明前两个排序轴能够较好地反映小洋山近岸水域浮游植物与环境因子的相互关系。图 3 中 1~15 号为冬季样本,16~30 号为春季样本,31~45 号为夏季样本,46~60 号为秋季样本,60 个样本在环境因子上的分布与季节相一致。春季样本点到水温箭头的距离较近,说明在春季水温对浮游植物的影响较大;冬季样本点到悬浮物箭头的距离较近,说明在冬季悬浮物浓度对于浮游植物的影响较大;秋冬两季样本点到溶解氧和盐度箭头的距离较近,说明在秋冬两季溶解氧和盐度对浮游植物的影响较大。

3 讨论

3.1 浮游植物种类组成、细胞丰度的季节演替

近岸海域是陆海交汇区域,该生态系统较为复杂,在我国四大海域中,东海近岸海域污染较严重,其中上海近岸海域水质很差^[23]。洋山港港区隶属东海海域,小洋山一侧靠近长江口。洋山港一带海域受台湾暖流、长江冲淡水、江苏沿岸流、黄海冷水团和钱塘江水流的影响^[24],环境条件独特,泥沙量大。其中台湾暖流的分支黑潮以及由长江、钱塘江和闽江等入海径流与周围海水混合而成的东海沿岸流是影响东海海域水体环境的主要因素。

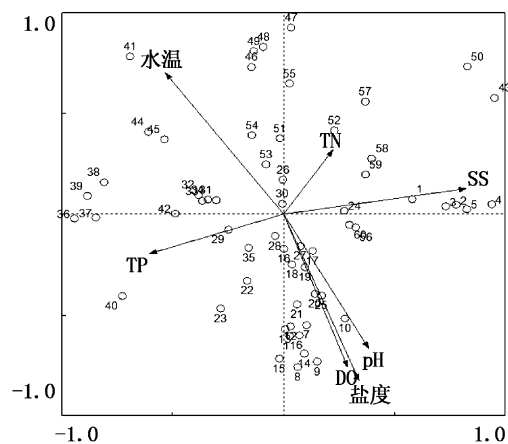


图 3 小洋山近岸水域浮游植物组成与环境因子关系的 RDA 排序图

Fig. 3 Biplot of the first two axes of the RDA analysis for environmental factors associated with phytoplankton variation in the Xiao Yangshan inshore waters

小洋山近岸水域采集到的浮游植物以硅藻门藻类占绝对优势,其次是绿藻门和甲藻门。在2012年的周年调查中,小洋山近岸水域浮游植物种类组成呈现明显的季节变化趋势,在各采样月份间差异性极显著($P < 0.01$)。冬季共采集到浮游植物152种,是全年藻类种类数目最多的季节,其次是春季(92种),夏季为全年最低,仅73种。浮游植物细胞密度的变化趋势与其种类数量规律相似,其最高细胞密度出现在冬季的1月份。由于骨条藻在细胞丰度上所占的优势,它的分布几乎代表了浮游植物群落的分布格局,在该调查水域骨条藻的种群动态决定了浮游植物总细胞丰度的分布。在洋山港水域,骨条藻通常是多种混合的,不同季节有时有2~3种不同骨条藻物种同时存在的现象,且中肋骨条藻在细胞丰度上占优。霍文毅等^[25]研究发现,中肋骨条藻是一种广温、广盐的近岸性硅藻,盐度为13~36范围内均可生长,但其最适增殖盐度范围则为20~30。调查水域冬季平均盐度为20.6,1月盐度为21.4,均在中肋骨条藻最适增殖盐度范围内,这与调查期该藻在冬季,特别是1月细胞丰度最高相符合。黄奕华等^[26]研究大鹏湾盐田海域的骨条藻数量受浊度的影响较大。GALLAGHER等^[27]的研究表明,中肋骨条藻能在较浅的浑浊水域中更有效地吸收和利用光,使其能够更适应浑浊水体中的生存。栾青杉等^[28]的研究则表明,中肋骨条藻的分布与海水的透明度呈负相关。本调查期间,小洋山近岸水域全年悬浮物浓度大、透明度低,冬季的悬浮物浓度最大时达1.896 g/L,夏季水较清澈,悬浮物浓度最小值仅为0.016 g/L。浑浊度高也是导致调查区水域冬季骨条藻大量繁殖、而其余藻类生长受限的重要因素。

3.2 浮游植物多样性指数

总体来看,小洋山近岸水域浮游植物群落多样性和均匀度均不太高,群落结构相对简单。这是由于调查水域各站点优势类群骨条藻的数量庞大,使得其他物种的种间竞争处于弱势地位,导致其群落结构简单化,种间分布极不均匀,优势种突出,多样性降低,因而浮游植物群落多样性随着优势种骨条藻的细胞丰度的变化而变动,即骨条藻的数量和分布情况决定了调查水域浮游植物的时空分布格局,也影响了浮游植物数量和群落结构的动态变化。

对比本调查周年的多样性指数,小洋山近岸水域夏季(6~8月)温度高,群落结构较为单一,生物多样性低;Shannon-Wiener多样性指数和Margalef丰富度指数均在冬季(12~2月)达到最高值,群落结构较为复杂,多样性较高,组成均匀。

3.3 环境因子与浮游植物群落相关性

浮游植物的分布与海洋环境因子之间有密切关系。浮游植物物种分布的变化对环境的变化具有指示作用,反之环境条件改变也会直接或间接地影响到浮游植物的群落结构^[28]。温度、盐度、营养盐浓度等都对浮游植物生长有影响^[29-30]。研究表明,水体中浮游植物优势种群随着温度的上升而不断发生演替,当温度达到40℃时蓝藻为主要优势类群,30℃时绿藻占优势,20℃时以硅藻为主^[31]。小洋山近岸水域全年平均水温为17.2℃,适合硅藻生长,丰度比例达95.84%。但是在浑浊水域中,光通常是限制浮游植物生长的主要环境因子^[32],作为浮游植物生长的能量来源,光能利用率起着至关重要的作用^[33]。在洋山港区域,由于受大洋山正在施工、小洋山不定期清淤维护等因素的影响,近岸水域水层浅、悬浮物浓度高,使得光照成为限制除中肋骨条藻外浮游植物生长的主要因素。但是在一定范围内,悬浮物浓度与中肋骨条藻生长成正相关($R = 0.395^{**}$, $P < 0.01$)。该环境因子使得调查水域冬季中肋骨条藻细胞丰度较高,进而影响整个浮游植物群落。

参考文献:

- [1] 孙军. 保护海洋浮游植物多样性[J]. 科技创新与品牌, 2006, 36(6): 54.
- [2] 胡韧, 林秋奇, 段舜山, 等. 热带亚热带水库浮游植物叶绿素a与磷分布的特征[J]. 生态科学, 2002, 21(4): 310-315.
- [3] 杨忠勇, 程和琴, 朱建荣, 等. 洋山港海域潮动力特征及其对工程的响应[J]. 地理学报, 2012, 67(9): 1282-1290.
- [4] 唐峰华, 沈新强, 史赞荣, 等. 洋山工程海域虾蟹类资源的初步分析[J]. 上海海洋大学学报, 2010, 19(3): 372-377.
- [5] 孙玲霜, 薛俊增, 庄骅, 等. 洋山港浮游植物群落特征研究[J]. 海洋湖沼通报, 2012, (3): 50-57.
- [6] 王琼, 陈辰, 吴惠仙, 等. 洋山港浮游桡足类群落的周年变化特征[J]. 海洋科学, 2013, 37(2): 61-69.
- [7] 王宝强, 薛俊增, 庄骅, 等. 洋山港海域大型污损生物生态特点[J]. 海洋学报, 2012, 34(3): 155-162.

- [8] 国家海洋环境监测中心. GB 17378.4 - 1998《海洋监测规范》[S]. 北京:海洋出版社,1998.
- [9] 程兆第,高亚辉. 中国海藻志 [M]. 北京:科学出版社,2012.
- [10] 曾呈奎. 中国经济海藻志[M]. 北京:科学出版社,1962.
- [11] 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] KRAMMER 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]. Urbana IL; University of Illinois Press, 1949;11 - 25.
- [14] 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] 刘建康. 高级水生生物学[M]. 北京:科学出版社,1999.
- [17] 唐启义,冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统: DPS data processing system for practical statistics [M]. 北京:科学出版社,2002.
- [18] 吴世军. SPSS 在数据分析中的应用[J]. 统计与决策,2006(9):160 - 160.
- [19] LEPŠJ, ŠMILAUER P. Multivariate analysis of ecological data using CANOCO [M]. Cambridge University Press, 2003.
- [20] 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指数评价[J]. 热带海洋学报,2010,29(1):69 - 76.
- [21] 沈韞芬,章宗涉,龚循矩. 微生物监测新技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,1990.
- [22] HASSON L A, ANNADOTTER H, BERGMAN E, et al. Biomaniplulation as an application of food-clain theory: constraints, synihesis, and recommendations for temperate lakes[J]. Ecosystems,1998,1(6):558 - 574.
- [23] 国家环境保护总局. 2009 年中国近岸海域环境质量公报 [R]. 北京:国家环境保护总局,2010.
- [24] 王宝强,田华,薛俊增,等. 洋山深水港海域水环境的周年变化[J]. 上海环境科学,2011,30(2):60 - 64.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] GALLAGHER J C, WOOD A M, ALBERTE R 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.
- [28] 栾青杉,孙军,宋书群,等. 长口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析[J]. 植物生态学报,2007,31(3):445 - 450.
- [29] JACOB C, LISE M F, CHARLOTTE B H, et al. Summer algal blooms in a coastal ecosystem: the role of atmospheric deposition versus entrainment fluxes [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2005, 62(4):595 - 608.
- [30] MONIKA W, JAMES E C. The annual cycles of phytoplankton biomass [J]. Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences, 2010, 365(1555):3215 - 3226.
- [31] EHRLICH P R, EHRLICH A H, HOLDREN J P. Ecocience: Population, Resources, Environment [M]. San Francio: W. H. Fresman and Company, 1977.
- [32] RITA B D, TĀNIA P, ANSELMO A B, et al. Light as a driver of phytoplankton growth and production in the freshwater tidal zone of a turbid estuary [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2011,91(4):526 - 535.
- [33] KOCUM E, UNDERWOOD G J C, NEDWELL D B. Simultaneous measurement of phytoplanktonic primary production, nutrient and light availability along a turbid, eutrophic UK east coast estuary (the Colne estuary) [J]. Marine Ecology Progress Series, 2002, 231: 1 - 12.

Characteristics of community structures of phytoplankton in Xiao Yangshan inshore waters in 2012

CHEN Li-jing, ZHANG Wei, BIAN Jia-yin, XUE Jun-zeng

(Ministry of Education Key Laboratory of Exploration and Utilization of Aquatic Genetic Resources, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Xiao Yangshan is located on the north of Yangshan port, which is the first offshore deepwater port in China. Phytoplankton community structure of Xiao Yangshan sea area was investigated and analyzed from January to December in 2012. A total of 183 phytoplankton species, belonging to 7 phyla and 77 genera, were identified. Diatom, including 51 genera and 143 species which accounted for 78.14% of species richness, was the main phytoplankton group. The annual average cell abundance of phytoplankton was $(7.01 \pm 6.26) \times 10^4$ cell/L. *Skeletonema* sp. and *Paralia sulcata* were the main dominant species through the year, while *Thalassiosira leptopus*, *Nitzschia frustulum*, *Rhaphoneis rhomoides* and *Cyclotella meneghiniana* were the common species. Based on analysis of diversity, the annual average values of Shannon-Wiener index, Margalef index and Pielous index were 2.59 ± 0.75 , 4.00 ± 1.44 and 0.55 ± 0.15 , respectively. The average number of Diatoms Index was 1.06 ± 0.20 . Redundancy analysis (RDA) showed that salinity, water temperature, dissolved oxygen and suspended solids concentration were the main environmental factors with great influences on phytoplankton.

Key words: Yangshan port; phytoplankton; community structure; species diversity