

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

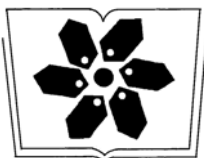
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第11期 Vol.33 No.11 **2013**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 33 卷 第 11 期 2013 年 6 月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义 徐涵秋, 唐 菲 (3249)
- 两种自然保护区设计方法——数学建模和计算机模拟 王宜成 (3258)
- 家域研究进展 张晋东, Vanessa HULL, 欧阳志云 (3269)
- 浅水湖泊生态系统稳态转换的阈值判定方法 李玉照, 刘 永, 赵 磊, 等 (3280)
- 辐射传输模型多尺度反演植被理化参数研究进展 肖艳芳, 周德民, 赵文吉 (3291)
- 微囊藻毒素对陆生植物的污染途径及累积研究进展 靳红梅, 常志州 (3298)

个体与基础生态

- 年龄、性别及季节因素对千岛湖岛屿社鼠最大活动距离的影响 叶 彬, 沈良良, 鲍毅新, 等 (3311)
- 寄主大小及寄生顺序对蝇蛹佣小蜂寄生策略的影响 詹月平, 周 敏, 贺 张, 等 (3318)
- 两种苹果砧木根系水力结构及其 PV 曲线水分参数对干旱胁迫的响应
..... 张林森, 张海亭, 胡景江, 等 (3324)
- 三种根系分泌脂肪酸对花生生长和土壤酶活性的影响 刘 苹, 赵海军, 仲子文, 等 (3332)

种群、群落和生态系统

- 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素 江志兵, 朱旭宇, 高 瑜, 等 (3340)
- 洞头海域网采浮游植物的月际变化 朱旭宇, 黄 伟, 曾江宁, 等 (3351)
- 狗牙根与牛鞭草在三峡库区消落带水淹结束后的抗氧化酶活力 李兆佳, 熊高明, 邓龙强, 等 (3362)
- 三亚岩相潮间带底栖海藻群落结构及其季节变化 陈自强, 寿 鹿, 廖一波, 等 (3370)
- 长期围封对不同放牧强度下草地植物和 AM 真菌群落恢复的影响 周文萍, 向 丹, 胡亚军, 等 (3383)
- 北京松山自然保护区森林群落物种多样性及其神经网络预测 苏日古嘎, 张金屯, 王永霞 (3394)
- 藏北高寒草地生态补偿机制与方案 刘兴元, 龙瑞军 (3404)
- 辽东山区次生林生态系统不同林型树干茎流的理化性质 徐天乐, 朱教君, 于立忠, 等 (3415)
- 施氮对亚热带樟树林土壤呼吸的影响 郑 威, 闫文德, 王光军, 等 (3425)
- 人工高效经营雷竹林 CO₂ 通量估算及季节变化特征 陈云飞, 江 洪, 周国模, 等 (3434)
- 新疆典型荒漠区单食性天花吉丁虫磷元素含量对环境的响应 王 晶, 吕昭智, 宋 菁 (3445)
- 双斑长跗萤叶甲越冬卵在玉米田的空间分布型 张 聪, 葛 星, 赵 磊, 等 (3452)
- 舟山群岛四个养殖獐种群遗传多样性和遗传结构 林杰君, 鲍毅新, 刘 军, 等 (3460)

景观、区域和全球生态

- 乡镇尺度金塔绿洲时空格局变化 巩 杰, 谢余初, 孙 朋, 等 (3470)
- 合并与不合并: 两个相似性聚类分析方法比较 刘新涛, 刘晓光, 申 琪, 等 (3480)

资源与产业生态

基于投入产出表的中国水足迹走势分析 王艳阳,王会肖,张 昕 (3488)

基于 MRICES 模型的气候融资模拟分析 朱潜挺,吴 静,王 铮 (3499)

黄东海陆架区沉积物中磷的形态分布及生物可利用性..... 张小勇,杨 茜,孙 耀,等 (3509)

鄱阳湖采砂南移扩大影响范围——多源遥感的证据 崔丽娟,翟彦放,邬国锋 (3520)

温度、盐度及其互作效应对吉富罗非鱼血清 IGF-I 与生长的影响 强 俊,杨 弘,王 辉,等 (3526)

城乡与社会生态

福建省城镇-交通系统的景观分隔效应 张天海,罗 涛,邱全毅,等 (3536)

研究简报

青藏高原高寒草原区工程迹地面积对其恢复植物群落特征的影响 毛 亮,周 杰,郭正刚 (3547)

黄土山地苹果树树体不同方位液流速率分析..... 孟秦倩,王 健,张青峰,等 (3555)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 314 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 33 * 2013-06



封面图说: 清晨的天山马鹿群——家域是动物行为学和保护生物学的重要概念之一,它在动物对资源环境的适应与选择,种群密度及社会关系等生态学过程研究中有着重要的作用。马鹿属于北方森林草原型动物,在选择生境的各种要素中,隐蔽条件、水源和食物的丰富度是最重要的指标。野生天山马鹿是中国的特产亚种,主要分布在北天山深山海拔1500—3800m 地带的森林草原中,在高山至谷地之间不同高度的坡面上,马鹿按季节、昼夜变化的不同进行采食。

彩图及图说提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201203250404

江志兵, 朱旭宇, 高瑜, 廖一波, 寿鹿, 曾江宁, 黄伟. 象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素. 生态学报, 2013, 33(11): 3340-3350.

Jiang Z B, Zhu X Y, Gao Y, Liao Y B, Shou L, Zeng J N, Huang W. Distribution of net-phytoplankton and its influence factors in spring in Xiangshan Bay. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(11): 3340-3350.

象山港春季网采浮游植物的分布特征及其影响因素

江志兵^{1,2}, 朱旭宇¹, 高瑜¹, 廖一波¹, 寿鹿¹, 曾江宁^{1,*}, 黄伟¹

(1. 国家海洋局海洋生态系统与生物地球化学重点实验室, 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012;

2. 应用海洋生物技术教育部重点实验室, 宁波大学海洋学院, 宁波 315211)

摘要: 根据 2010 年春季象山港 28 个站位的网采样品, 共鉴定出浮游植物 6 门 55 属 158 种, 其中硅藻 135 种 (占总丰度的 99.0%), 甲藻 18 种, 其余门类 (金藻、蓝藻、绿藻和隐藻) 5 种。浮游植物平均丰度为 35.29×10^4 个/ m^3 , 其分布呈较强的斑块状 (3.41×10^4 — 142.35×10^4 个/ m^3), 高值区位于横山至白石山水域及乌沙山电厂邻近水域。Shannon-Weiner 多样性指数和 Pielou 均匀度指数总体表现为港口和港口外高于港中部和港底。琼氏圆筛藻 (*Coscinodiscus jonesianus*) 为绝对优势种, 其丰度 (284.97×10^3 个/ m^3) 占总丰度的 80.8%。典范对应分析结果显示, 影响浮游植物群落的主要因子依次为透明度、悬浮物、温度、水深和氮磷比。光照充足、电厂温排水适度温升、营养盐丰富和氮磷比合适 (接近 Redfield 比值 16) 导致了港内微藻旺盛。受径流、水交换和海洋开发等影响, 象山港的理化参数表现了明显的斑块和梯度分布, 这为浮游植物的生长提供了不同类型的生境, 客观上造成了其分布的空间异质性。聚类、多维尺度和相似性分析结果表明, 港底、港中部、港口至港口外区域间的群落组成差异较大。结合历史数据分析表明, 象山港浮游植物丰度的升高及群落结构的改变与电厂运行、水产养殖、临港工业发展和滩涂围垦等海洋开发活动有关。

关键词: 象山港; 浮游植物; 典范对应分析; 环境因子; 海洋开发

Distribution of net-phytoplankton and its influence factors in spring in Xiangshan Bay

JIANG Zhibing^{1,2}, ZHU Xuyu¹, GAO Yu¹, LIAO Yibo¹, SHOU Lu¹, ZENG Jiangning^{1,*}, HUANG Wei¹

1 Laboratory of Marine Ecosystem Biogeochemistry, Second Institute of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China

2 Key Laboratory of Applied Marine Biotechnology, Ministry of Education, Marine College of Ningbo University, Ningbo 315211, China

Abstract: Xiangshan Bay ($121^{\circ}25'$ — $120^{\circ}00'E$, $29^{\circ}05'$ — $29^{\circ}46'N$), located at the East China Sea, is a long semi-enclosed bay with slow rate of water exchange. As one of the most important marine economic bases in Zhejiang Province, it has confronted a series of ecological challenges due to the coastal power plants (Ninghai and Wushashan Power Plant) running, excessive aquaculture, industrial development, tidal flat reclamation, and sea-crossing bridge construction. These large-scale human activities certainly lead to hydrodynamic alteration, temperature elevation, and eutrophication aggravation in this bay. The phytoplankton, as the basic and essential part of food chain, is very sensitive to such environmental stresses. However, present data about the combined effects of multiple marine exploitations on phytoplankton in the semi-enclosed bay is scarce. In this context, one cruise of phytoplankton and physical-chemical investigation was conducted in Xiangshan Bay in spring, 2010.

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目 (2010CB428903); 海洋公益性行业科研专项 (200805069, 201305009, 2013418009); 浙江省自然科学基金 (Y5110131); 浙江省海水养殖重点科技创新团队项目 (2010R50025); 国家自然科学基金科学基金 (41176142, 41206103); 中国博士后科学基金 (20110491828) 和国家海洋局第二海洋研究所基本科研业务费专项 (JG1222, JT0806)

收稿日期: 2012-03-25; 修订日期: 2012-08-29

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangningz@126.com

Based on 28 net-phytoplankton samples, a total of 6 phyla, 55 genera, and 158 species were found, including 135 diatom species (occupied by 85.4% of the total species number and 99.0% of the total abundance), 18 dinoflagellate species and 5 other taxonomic species belong to Chrysophyceae, Cyanophyceae, Chlorophyceae and Cryptophyceae. The phytoplankton abundances (35.29×10^4 Cells/ m^3 on average) represented a strong patchy distribution, varying in the range from 3.41×10^4 Cells/ m^3 to 142.35×10^4 Cells/ m^3 , and the high values occurred in the areas around Hengshan Island to Baishishan Island and also around Wushashan Power Plant. *Coscinodiscus jonesianus* (284.97×10^3 Cells/ m^3) was the absolute dominant species with its cell number accounted for 80.8% of the total abundance, while other dominant species such as *Navicula corymbosa*, *Skeletonema costatum* and *Coscinodiscus concinnus* also had high cell densities (11.93, 6.92 and 4.06×10^3 Cells/ m^3 , respectively). Canonical correspondence analysis (CCA) showed that transparency, suspended solids, temperature, N/P and silicate were the main variables which affected phytoplankton community in turn. The ample solar light, moderate temperature increment of the thermal discharge, abundant nutrition and suited N/P (close to the Redfield ratio 16) induced a phytoplankton (especially the diatom) bloom at the inner bay. Due to the catchment input, water exchange and marine exploitation, the patchiness and gradient of physical-chemical parameters were obviously observed, and such complicated environment supplied different habitats for phytoplankton and resulted in spatial heterogeneity. Both the Shannon-Weiner diversity and Pielou evenness index at the mouth and outside were evidently higher than the midst and bottom of Xiangshan Bay. Thus, there was a great discrepancy among the community composition at embayment bottom, midst, mouth and outside, according to the cluster, multidimensional scaling, and similarity analysis results. Besides, comparing with the historical data, we found that the microalgal abundance increment and community structure alteration were tightly related to the various marine exploitations in this bay.

Key Words: Xiangshan Bay; phytoplankton; canonical correspondence analysis (CCA); environmental factor; marine exploitation

象山港是浙江省最重要的海水增养殖基地和渔业资源产地,也是浙江省发展海洋经济重要的天然资源,因其独特的地理区位和资源优势,近年来掀起了前所未有的海洋开发热潮,如大型火电厂运行、水产养殖、临港工业发展和滩涂围垦等。然而,由于象山港与外海的水体交换周期较长^[1],港内海洋自净能力弱、环境容量小、生态脆弱,沿港高强度的建设开发对海域生态环境造成极大的压力。目前,象山港海洋开发活动引起的水动力学改变、富营养化和水温上升等现象必然造成海洋生态环境的改变,并由此引起了相关研究者的注意,包括水动力^[2]、营养盐^[3-5]、微生物^[6-7]、浮游动物^[8-10]和底栖生物^[11-14]等。浮游植物作为生态系统中最主要的初级生产者,可为浮游动物、甲壳动物、软体动物和仔稚鱼等提供食物和必需的营养成分,且其分布状况与水动力、营养盐和温度等环境因子密切相关^[15-17]。虽然早期也有象山港浮游植物的调查^[1,18-20],但近年来报道较少^[21-22],且未有多种海洋开发活动联合作用对其影响的研究。本文根据2010年春季象山港网采浮游植物调查资料,选取相关环境因子,通过典范对应分析(CCA),确定影响该海域浮游植物群落的主要因素,并与同期历史数据比较,探讨海洋开发活动对浮游植物的影响,为象山港海洋经济和环境保护政策的制订提供基础资料和科学依据。

1 研究区域与方法

1.1 研究区域和站位布设

象山港地处浙江北部沿海,是一个纵长约为62.8 km的狭长型半封闭海湾^[18],总面积为563 km²,其中水域面积约占70%,滩涂面积约占30%,水动力条件较弱,港中部和港底90%水体被置换到外海的时间分别为65 d和80 d^[1]。本次调查共设28个站位(图1),调查范围自港底至口门外的大目洋(121.47—122.13°E, 29.42—29.75°N),测站最大水深29.0 m,平均测站水深11.2 m。根据象山港的地理位置,可将其分为支港:铁港(S1—S3)、黄墩港(S7和S8)和西沪港(S20和S21);主港:港底(S4—S6、S9和S10,邻近宁海电厂)、港

中部 (S11—S19, 邻近乌沙山电厂)、港口 (S22—S24) 和港口外 (S25—S28, 大目洋) 等 7 个区块。为便于分析, 将铁港、黄墩港和主港港底归为全港底部, 将主港中部和西沪港归为全港中部, 主港港口即为全港港口, 这些区块 (S1—S24) 均属于象山港港内。

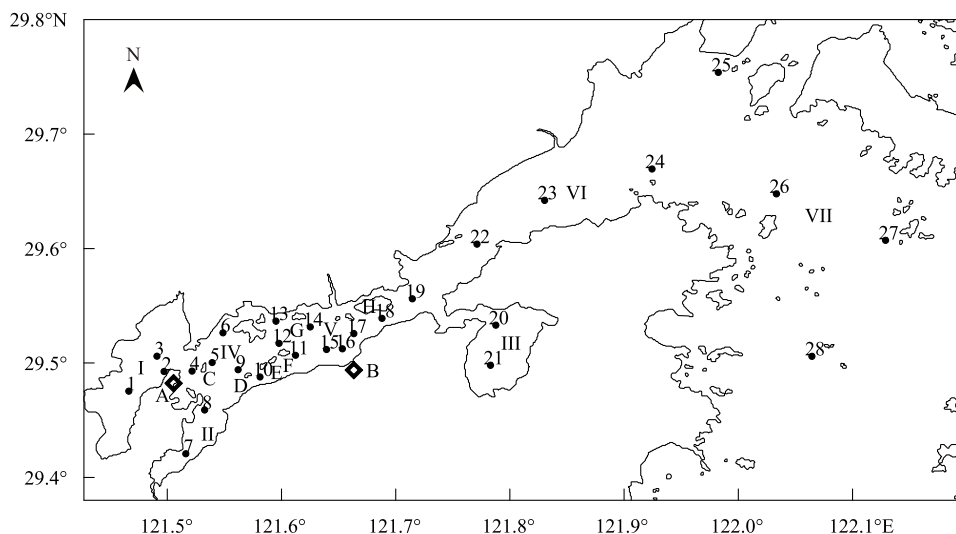


图 1 调查站位

Fig. 1 Sample stations in the Xiangshan Bay

I: 铁港 Tie harbor; II: 黄墩港 Huangdun harbor; III: 西沪港 Xihu harbor; IV: 主港底部 Bottom of the main bay; V: 主港中部 Middle section of the main bay; VI: 主港港口 Mouth of the main bay; VII: 主港港口外 Outside mouth of the main bay; A: 宁海电厂 Ninghai Power Plant; B: 乌沙山电厂 Wushashan Power Plant; C: 横山岛 Hengshan Island; D: 铜山岛 Tongshan Island; E: 中央山岛 Zhongyangshan Island; F: 白石山岛 Baishishan Island; G: 南沙岛 Nansha Island; H: 缸丹山岛 Gangpanshan Island

1.2 样品采集及分析

于 2010 年春季 (4 月 23 日—24 日) 小潮期间在各站用浅Ⅲ浮游生物网自底至表作垂直拖网采集浮游植物样品 28 个, 用 Hydro-bios 流量计记录滤水量。样品用 2% 中性甲醛固定, 经浓缩后用 Leica DM2500 显微镜观察、鉴定和计数。所有操作均按《海洋调查规范》^[23] 进行。同时采集表层 (0.5 m) 水样, 测定其温度、盐度、pH 值、溶解氧 (DO)、溶解无机氮 ($\text{DIN: NO}_3^- + \text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+$)、活性磷酸盐 ($\text{PO}_4^{3-} - \text{P}$)、硅酸盐 ($\text{SiO}_3^{2-} - \text{Si}$) 和悬浮物浓度, 并记录水深和透明度。

1.3 数据处理

用 PRIMER 5.0 版软件计算浮游植物群落的 Shannon-Weiner 多样性指数 (H') 和 Pielou 均匀度指数 (J')。优势度 (Y) 计算公式为:

$$Y = n_i \cdot f_i / N$$

式中, N 为样品的总丰度; n_i 为样品中第 i 种的丰度; f_i 为该种浮游植物在样品中的出现频率。若某物种的 $Y \geq 0.01$, 则认定为优势种。相关参数 (或经 $\log$ 转换后) 如满足正态分布 (K-S 检验) 和方差齐次性 (Levene 检验), 用 SPSS 13.0 软件对其进行单因子方差分析 (One-way ANOVA), 反之则对变量进行非参数检验 (K-W 检验)。K-W 检验若发现各组间呈显著差异, 可利用 SPSS 软件自编程序进行多重比较 Nemenyi 秩和检验。用 PRIMER 软件对 $f \geq 10\%$ 的物种丰度进行 $\log(x+1)$ 转换后, 建立 Bray-Curtis 相似性聚类分析, 并采用非度量多维尺度分析 (nMDS) 分析浮游植物群落的空间分布。浮游植物群落区域间比较采用单因素相似性分析 (ANOSIM)。用 CANOCO 4.5 软件进行 CCA 排序, 用于排序的物种在各站位的 $f \geq 10\%$, 且其丰度占总丰度的比例需 $\geq 0.2\%$ ^[16, 24]。

2 结果与分析

2.1 种类组成与生态类群

象山港春季网采浮游植物共有 6 门 55 属 158 种 (含变种、变型), 其中, 硅藻 41 属 135 种 (占 85.4%), 其

丰度占浮游植物总丰度的 99.0%;甲藻 10 属 18 种(占 11.4%),其丰度占总丰度的 0.8%;金藻 1 属 2 种(占 1.3%);蓝藻、绿藻和隐藻各 1 属 1 种(各占 0.6%)。

根据浮游植物的适盐范围,可将其分为 4 个生态类群:(1)淡水和半咸水类群,出现频率和丰度均较低,代表种类有桥弯藻属(*Cymbella*)、颗粒直链藻极狭变种(*Melosira granulata* var. *angustissima*)、羽纹藻属(*Pinnularia*)和单角盘星藻具孔变种(*Pediastrum simplex* var. *duodenarium*)等;(2)沿岸河口低盐类群,出现频率和丰度均较高,代表种类有柱状小环藻(*Cyclotella stlorum*)、克尼角毛藻(*Chaetoceros knipowitschi*)、尖布纹藻(*Gyrosigma acuminatum*)和针杆藻属(*Synedra*)等;(3)近岸内湾性类群,是调查海域的优势类群,代表种类有琼氏圆筛藻(*Coscinodiscus jonesianus*)、整齐圆筛藻(*Coscinodiscus concinnus*)、中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、布氏双尾藻(*Ditylum brightwellii*)和微小原甲藻(*Prorocentrum minimum*)等;(4)外海高盐类群,仅在港口和港口外的个别站位出现,代表种类有镰角藻(*Ceratium falcatum*)、三角角藻大西洋变种(*Ceratium tripos* var. *atlanticum*)和夜光梨甲藻(*Pyrocystis noctiluca*)等。

2.2 群落参数的平面分布

浮游植物丰度(N)为 3.41×10^4 — 142.35×10^4 个/ m^3 ,平均值($\text{Mean} \pm \text{SD}$)为 $(35.29 \pm 33.65) \times 10^4$ 个/ m^3 ,总体呈现港口及港口外低而港底高、支港低而主港高的分布格局,且呈较强的斑块状分布,其高值区位于横山岛至白石山岛水域及乌沙山电厂邻近水域(图 2)。物种数(S)为 10—50,平均值为 28.9 ± 10.3 ,高值区位于西沪港、港口和南沙岛邻近水域。 H' 为 0.16—3.14,平均值为 1.27 ± 0.98 ,其总体分布表现为全港底部和主港中部 < 西沪港 < 港口和港口外。 J' 为 0.09—0.84,平均值为 0.82 ± 0.37 ,其总体分布表现为港底和港中部 < 港口 < 港口外(图 2)。

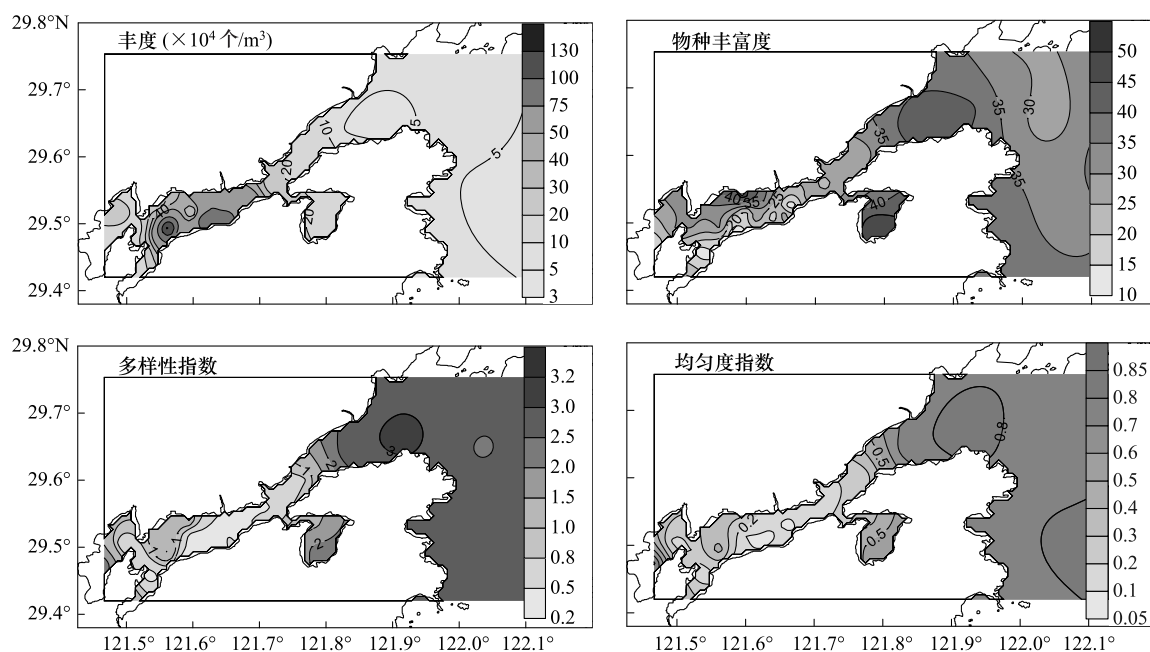


图 2 浮游植物丰度、物种丰富度、多样性指数和均匀度指数的平面分布

Fig. 2 Horizontal distributions of phytoplankton abundance, species richness, diversity and evenness

2.3 优势种组成及其丰度分布

本次调查,共有浮游植物优势种 4 种,其中,琼氏圆筛藻($Y=0.808$)是绝对优势种,丰度为 2.41×10^3 — 863.49×10^3 个/ m^3 ,平均值为 $(284.97 \pm 277.14) \times 10^3$ 个/ m^3 ,丰度高值区位于横山岛至铜山岛海域及乌沙山电厂邻近海域(图 3);盔状舟形藻(*Navicula corymbosa*, $Y=0.025$)次之,丰度为 0— 261.44×10^3 个/ m^3 ,平均值为 $(11.93 \pm 49.16) \times 10^3$ 个/ m^3 ,丰度高值区位于铜山岛和南沙岛海域的海带养殖区(图 3);中肋骨条藻($Y=$

0.016)居第3位,丰度为 $0\text{--}29.95\times 10^3$ 个/ m^3 ,平均值为 $(6.92\pm 8.33)\times 10^3$ 个/ m^3 ,丰度高值区位于铁港港口和西沪港的网箱养殖区(图3);整齐圆筛藻($Y=0.010$)居末位,丰度为 $0\text{--}12.19\times 10^3$ 个/ m^3 ,平均值为 $(4.06\pm 3.92)\times 10^3$ 个/ m^3 ,丰度高值区与琼氏圆筛藻类似(图3)。

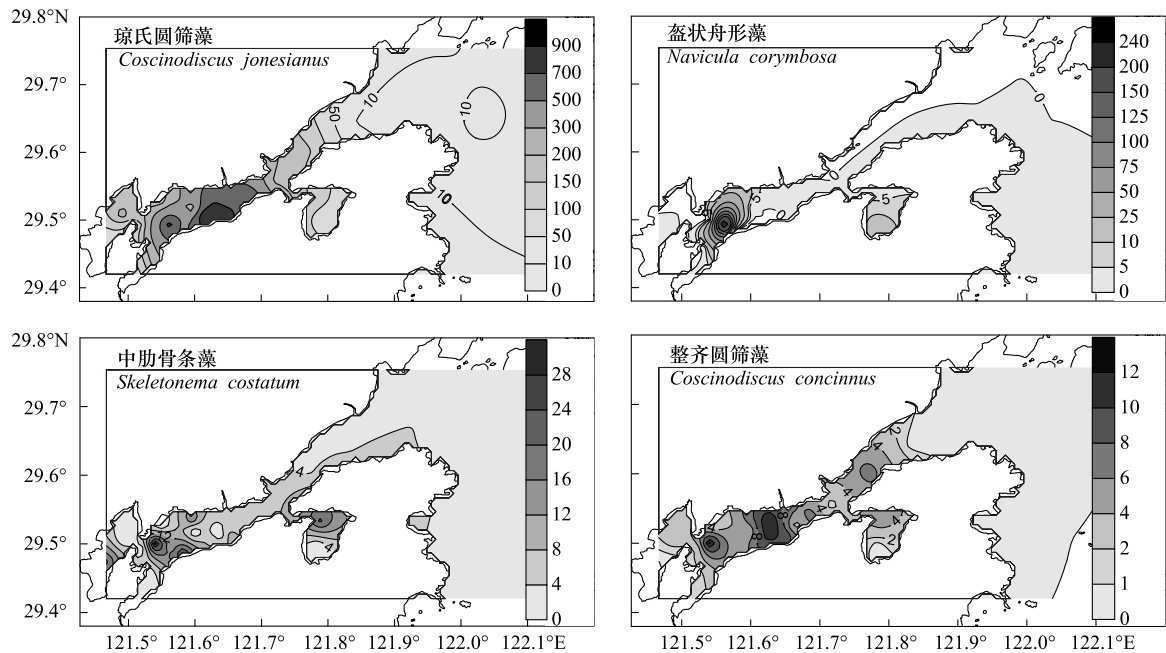


图3 浮游植物优势种丰度($\times 10^3$ 个/ m^3)的平面分布

Fig. 3 Horizontal distributions of dominant phytoplankton species abundances ($\times 10^3$ Cells/ m^3)

2.4 环境因子分布及其与群落参数的分区比较

主要环境因子与群落参数的分区比较见表1。除水深、DO 和无机氮分布无显著差异外,各区其余因子间均存在显著差异($P<0.05$)。

表1 象山港浮游植物群落参数和环境因子的分区比较

Table 1 Phytoplankton community indexes and environmental variables (Mean±SD) in different subareas of Xiangshan Bay								
海区 Subarea	I	II	III	IV	V	VI	VII	全区 Whole
S	25.3±7.4ab	19.0±9.9a	44.0±8.5b	26.8±9.7ab	25.9±11.1ab	37.0±7.8ab	32.3±5.1ab	28.9±10.3
N/($\times 10^4$ 个/ m^3)	18.3±6.98ab	18.2±9.26ab	16.80±3.73ab	55.17±50.55a	60.01±24.17a	9.19±7.92b	4.94±1.71b	35.29±33.65
H'	1.23±0.95ab	0.75±0.59a	1.82±0.48abc	1.00±0.44ab	0.46±0.29a	2.25±1.27bc	2.72±0.23c	1.27±0.98
J'	0.41±0.36ab	0.25±0.16ab	0.48±0.10abc	0.30±0.11ab	0.14±0.07a	0.61±0.32bc	0.79±0.04c	0.37±0.27
Dep/m	7.8±3.8a	10.8±4.6a	6.8±2.4a	8.7±4.2a	13.8±6.8a	13.1±2.0a	11.5±1.3a	11.2±1.3
Tem/°C	15.6±0.1a	16.1±0.4a	16.1±0.2a	15.8±0.6a	14.8±0.4b	12.9±0.7c	12.5±0.1c	14.7±1.3
7Tra/m	1.6±0.8a	1.7±0.1a	1.2±0.4ab	2.1±0.6a	1.7±0.3a	0.6±0.3b	0.40±0.1b	1.4±0.7
Sal	18.5±5.3a	18.3±2.2a	21.5±0.1aa	22.2±0.5ab	22.6±0.8ab	24.9±0.3b	25.7±0.6b	22.4±2.8
DO/(mg/L)	8.92±0.05a	9.93±0.46b	9.41±0.38ab	9.35±0.64ab	9.36±0.23ab	9.09±0.02ab	9.13±0.12ab	9.29±0.39
SS/(mg/L)	7.7±2.3a	7.0±0.0a	12.0±5.7a	8.2±3.6a	12.0±3.0a	54.7±59.2b	133.8±74.9c	32.5±53.5
SiO ₃ ²⁻ -Si/(mg/L)	2.046±1.016a	1.630±0.438ab	1.282±0.038ab	1.391±0.125ab	1.390±0.084ab	1.165±0.081b	1.102±0.072b	1.404±0.400
PO ₄ ³⁻ -P/(mg/L)	0.128±0.031a	0.087±0.030b	0.036±0.004c	0.081±0.019b	0.061±0.013bc	0.038±0.002c	0.033±0.002c	0.065±0.032
DIN/(mg/L)	0.550±0.101a	0.583±0.296a	0.351±0.039a	0.656±0.292a	0.490±0.187a	0.626±0.297a	0.728±0.358a	0.571±0.243
N/P	9.7±2.1a	14.5±2.5a	21.9±0.1a	19.3±11.3a	18.1±5.3a	36.5±16.2ab	47.4±20.8b	23.61±15.48

同行不同小写字母表示区域间差异显著($P<0.05$); S: 种类数 species richness; N: 丰度 abundance; H': 多样性指数 diversity index; J': 均匀度指数 evenness index; Dep: 水深 Depth; Tem: 温度 Temperature; Tra: 透明度 Transparency; Sal: 盐度 Salinity; DO: 溶解氧 Dissolved oxygen; SS: 悬浮物 Suspended solids; DIN: 溶解无机氮 Dissolved inorganic nitrogen

各站水温为 12.2—16.8 °C, 平均值为 (14.7±1.3) °C, 分布明显呈港底>港中部>港口>港口外的趋势(图 4), 特别是宁海电厂排水口邻近海域的水温较港口外正常水温高了 4 °C 多。从图 4 可知: 宁海电厂排水 1 °C 温升包络线向东已至横山岛周围海域, 0.5 °C 温升包络线向东已至中央山岛水域; 乌沙山电厂温排水的 1 °C 温升包络线仅局限于出水口附近的小范围内, 0.5 °C 温升包络线向东可至西沪港口, 向西可至白石山岛水域。可见主港底部、中部以及铁港和黄墩港均已纳入两座电厂的 0.5 °C 增温范围内。

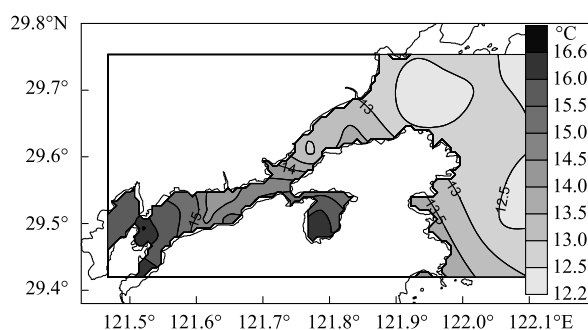


图 4 表层水温的平面分布

Fig. 4 Horizontal distributions of surface water temperature

盐度为 12.5—26.4, 平均值为 22.4±2.8, 其分布则刚好与水温相反, 呈港底<港中部<港口<港口外。透明度为 0.3—2.5 m, 平均值为 (1.4±0.7) m, 高值区位于横山岛至铜山岛海域及缸片山岛邻近海域, 低值区位于港口和大目洋; 悬浮物浓度为 2—221 mg/L, 平均值为 (32±53) mg/L, 分布呈港底和港中部<港口<港口外。无机氮浓度为 0.323—1.127 mg/L, 平均值为 (0.571±0.243) mg/L; 磷酸盐浓度为 0.031—0.157 mg/L, 平均值为 (0.065±0.032) mg/L; 硅酸盐浓度为 1.032—3.213 mg/L, 平均值为 (1.405±0.400) mg/L。磷酸盐和硅酸盐与无机氮的分布存在较大差异, 前两者均大致呈港底向港外降低趋势, 而后者浓度高值区位于主港中部、港口和港口外。氮磷比 (N/P) 高值区位于港口和港口外。

2.5 聚类和多维尺度分析

根据聚类(图 5)和 nMDS(图 6)结果, 可将浮游植物群落分为 S1 站群落、S23—S28 站群落、(S5、S6、S9、S13、S21)站群落、(S11、S14—S18、S20、S22)站群落和 (S2—S4、S7、S8、S10、S12、S19)站群落, 表明港底、港中部、港口至港口外与其余区域的群落组成差异较大。表 2 中的单因素 ANOSIM 也表明, 不同区域(支港和主港不同区域)间浮游植物群落组成存在极显著差异 (Global $R=0.47$, $P=0.001$), 特别是港口和港口外群落与港内群落差异较大 ($P<0.05$)。

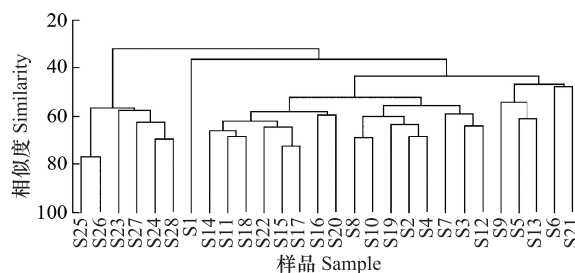


图 5 各站位浮游植物样品的聚类分析

Fig. 5 Clusters analysis of different phytoplankton samples

2.6 典范对应分析

根据浮游植物的出现频率和丰度比例, 选取 16 种用于 CCA 排序。蒙特卡罗检验表明, 第 1 轴和全部轴均呈极显著差异 ($P=0.002$), 故排序结果是可信的。排序图中的 11 个环境因子可解释浮游植物群落总变量的 56.8%。第 1 轴和第 2 轴的特征值分别为 0.243 和 0.081, 并各自解释了 27.8% 和 9.3% 的物种变量。第 1 轴和第 2 轴的物种-环境相关系数分别为 0.960 和 0.802, 表明这 11 个环境因子与 16 种浮游植物主要种类相关性较好。图 7 表明, 透明度、悬浮物、温度、水深和 N/P 是影响浮游植物群落的主要环境因子。其中, 第 1 轴主要受温度、透明度、悬浮物、无机氮、N/P 和磷酸盐等影响, 而第 2 轴则主要由水深、盐度、硅酸盐、DO

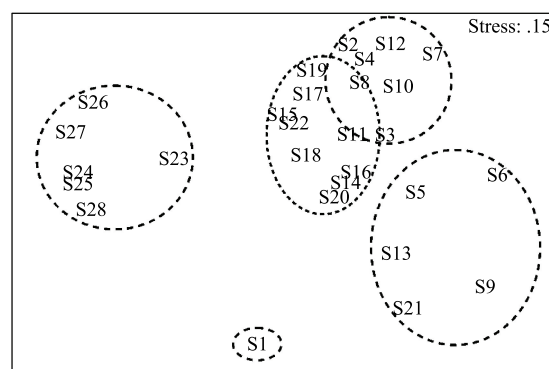


图 6 各站位浮游植物样品的多维尺度分析

Fig. 6 Non-Metric multidimensional scaling (nMDS) of different phytoplankton samples

和 pH 值等影响。优势种琼氏圆筛藻、整齐圆筛藻和盔状舟形藻与温度、透明度和磷酸盐呈密切正相关,而与悬浮物、N/P 和无机氮呈密切负相关;中肋骨条藻与水深和盐度呈密切正相关,而与硅酸盐呈密切负相关。

表 2 不同区域浮游植物群落的单因素相似性分析

Table 2 A one-way analysis of similarity for phytoplankton community at different regions				
区域 Subarea	R	P	区域 Subarea	P
I—III vs. IV	0.06	0.293	IV vs. VI	0.018
I—III vs. V	0.21	0.022	IV vs. VII	0.008
I—III vs. VI	0.42	0.033	V vs. VI	0.018
I—III vs. VII	0.90	0.003	V vs. VII	0.001
IV vs. V	0.27	0.051	VI vs. VII	0.343

3 讨论

3.1 浮游植物群落结构分布特征及其与水团的关系

象山港主要受长江和钱塘江冲淡水为主的沿岸流、台湾暖流和沿港径流影响^[18],既有径流入海、冲淡水带来的淡水种类和半咸水种类(桥弯藻、颗粒直链藻极狭变种、羽纹藻和单角盘星藻具孔变种等),又有土著的和沿岸流带来的河口种类(柱状小环藻、克尼角毛藻、尖布纹藻和针杆藻等)与近岸低盐种类(琼氏圆筛藻、整齐圆筛藻、中肋骨条藻、布氏双尾藻和微小原甲藻等)^[20-21],此外还有台湾暖流入侵所携带的外海高盐种类(镰角藻、三角角藻大西洋变种和夜光梨甲藻等),故其浮游植物种类组成较复杂,物种丰富度也较高(28.9种)。本次调查共有浮游植物 158 种,其中:硅藻 135 种(占总种类数的 85.4%,占总丰度的 99.0%),甲藻 18 种(占总种类数的 11.4%,占总丰度的 0.8%),其余门类 5 种(占总种类数的 3.2%,占总丰度的 0.2%)。可见,象山港春季浮游植物群落是以硅藻主导的群落。这与以往的调查结果相符^[18-22,25]。琼氏圆筛藻为调查海域的绝对优势种,其细胞数占总丰度的 80.8%,且在各个区域均有分布,其余优势种(盔状舟形藻、中肋骨条藻和整齐圆筛藻)仅占 6.5%。由于象山港浮游植物优势种组成较单一,导致多样性指数和均匀度指数(图 2)均较低,分别为 1.27 和 0.82。这说明春季象山港浮游植物群落组成结构较简单。

3.2 浮游植物群落与环境因子之间的关系

根据 CCA 结果,透明度、悬浮物、温度、N/P 和硅酸盐是影响象山港春季网采浮游植物的主要环境因子(图 7)。影响透明度与悬浮物的主要因素就是水动力状况,由于象山港为狭长型海湾,且调查时间刚好处于小潮期间,港内潮流较缓,无法搅起底泥,使得象山港水体表现为港内较清(悬浮物浓度低,透明度高),而港口和港口外水体流速较大,水体较浑浊(悬浮物浓度高,透明度低)。浮游植物的生长与光照密切相关^[26],因此,在透明度较高的(普遍>1 m)条件下,光照充足是港内浮游植物旺发的主要原因之一。另外港内温度较高也是促进浮游植物生长的主要因素。由图 2 和图 4 可知,浮游植物丰度高值区(横山岛至白石山岛水域及乌沙山电厂邻近水域)刚好对应两座电厂温排水引起的>0.5℃增温水域,这与 Zeng 等^[27]对该处海域温排水

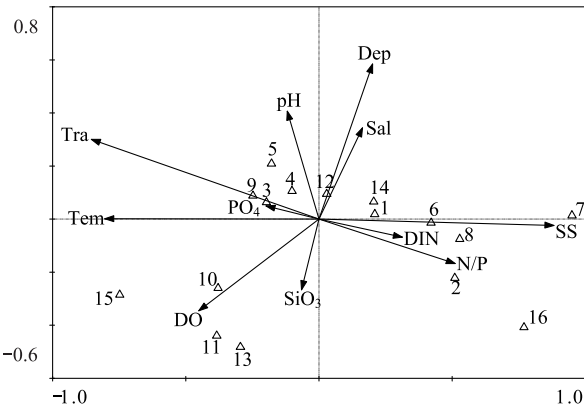


图 7 主要浮游植物种类与环境因子间的 CCA 排序图

Fig. 7 CCA ordination of main phytoplankton species with environmental variables

PO₄: 活性磷酸盐 PO₄³⁻-P; SiO₃: 硅酸盐 SiO₃²⁻-Si
1: 派格棍形藻 *Bacillaria paxillifera*; 2: 中华盒形藻 *Biddulphia sinensis*; 3: 克尼角毛藻 *Chaetoceros knipowitschi*; 4: 琼氏圆筛藻 *Coscinodiscus jonesianus*; 5: 整齐圆筛藻 *Coscinodiscus concinnus*; 6: 苏里圆筛藻 *Coscinodiscus thorii*; 7: 虹彩圆筛藻 *Coscinodiscus oculuse-iridis*; 8: 布氏双尾藻 *Ditylum brightwellii*; 9: 直链藻 *Melosira* sp.; 10: 盔状舟形藻 *Navicula corymbosa*; 11: 长菱形藻 *Nitzschia longissima*; 12: 中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*; 13: 菱形海线藻 *Thalassionema nitzschioides*; 14: 海链藻 *Thalassiosira* sp.; 15: 双角缝舟藻 *Rhaphoneis amphiceros*; 16: 夜光藻 *Noctiluca scintillans*

的数值模拟结果相符。可见,春季电厂温排水的适度温升可促进浮游植物的生长。廖一波等^[28]对象山港浮游植物的温升实验也证实了这一点。营养盐也是影响浮游植物群落最基本的因素。营养盐丰富和 N/P 适合(接近 Redfield 比值 16)促进了浮游植物的生长。本次调查的丰度高值区(横山岛至白石山岛水域及乌沙山电厂邻近水域)营养盐浓度较高,而 N/P 又接近 16(表 1),故其浮游植物丰度也较高。事实上,象山港的浮游植物丰度高值区是上述几个环境因子共同作用的结果,因为该海域整体呈现高透明度、低悬浮物、高营养盐、适合的 N/P 和适度的温升。

空间异质性是近年来生态学研究的一个极为重要的理论问题^[29],同时也是水域生态学家研究不同尺度的生态系统功能和过程中最感兴趣的问题之一^[30]。空间异质性是指生态学变量在空间上的不均匀性和复杂性,一般可理解为空间的缀块性和环境梯度的总和^[31]。浮游植物的空间异质性由水柱理化特性(如局部水动力、营养盐、温度、盐度及光照透明度等)和生态学过程造成的^[30,32-33],现已被认为是水生生态系统存在的一个普遍特征^[30],它对海洋生态系统稳定性、多样性、动力学、生产力和水质状况等有极重要的影响。本文尝试将象山港分为支港(包括铁港、黄墩港和西沪港)、主港(港底、港中部和港口)和港口外等 7 个区块,除水深、DO 和无机氮分布无显著差异外,不同区块其余环境因子和浮游植物群落参数均存在显著差异(表 1)。且根据聚类分析(图 5)、nMDS(图 6)和 ANOSIM(表 2)结果,港底部、港中部、港口至港口外的群落组成差异较大。这说明受径流、海水交换和海洋开发活动(如水产养殖和电厂温排水排放)等影响,象山港的理化参数(透明度、温度、盐度、营养盐浓度和结构等)表现了明显的斑块和梯度分布(表 1),这为浮游植物的生长提供了不同的生境,客观造成了其分布的空间异质性(图 2 和图 3)。

3.3 海洋开发活动对浮游植物的影响

2010 年象山港春季浮游植物总种类数高于以往,且甲藻种类数也较以往有所增加(表 3),这可能与本次调查较以往更密集、范围更广有关。本次调查的网采浮游植物丰度为 35.29×10^4 个/ m^3 ,该值仅低于 1987 年的 167.80×10^4 个/ m^3 ,而高于其余年份的调查数据,且自 1988 年以来象山港浮游植物数量呈增加趋势(表 3),这与营养盐浓度的持续升高有关^[1,3,7,18,25]。该海域春季无机氮和磷酸盐浓度自 20 世纪 80 年代^[18](分别为 0.3066 mg/L 和 0.0195 mg/L)以来持续升高,到本世纪初^[11]时分别达 0.388 mg/L 和 0.021 mg/L,而到本次调查时,已分别增至 0.571 mg/L 和 0.065 mg/L。据 Nobre 等^[34]估算,象山港每年约有 4 015 t 无机氮和 730 t 磷来自陆源,同时网箱养殖每年约排放 2 354 t 无机氮和 1 039 t 磷,另外虾塘养殖每年还产生 42 t 无机氮和 14 t 磷。而与此同时,曾相明等^[2]研究表明,从 1963 年到 2010 年,滩涂围垦已造成象山港全潮平均纳

表 3 不同年份象山港春季网采浮游植物的群落参数

Table 3 Community parameters of spring net-phytoplankton at different years in Xiangshan Bay

年度 Year	丰度 Abundance	优势种 Dominant species	甲藻/总种类数 DTSN	参考文献 Reference
1982	4.22	圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i> ; 菱形藻属 <i>Nitzschia</i> ; 根管藻属 <i>Rhizosolenia</i> ; 直链藻属 <i>Melosira</i>	—	[18]
1987	167.80	—	—	[18]
1988	0.77	—	—	[20]
2000	—	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i> ; 盔状舟形藻 <i>N. corymbosa</i> ; 具槽帕拉藻 <i>Paralia sulcata</i>	1/74	[1]*
2006	17.57	中肋骨条藻 <i>S. costatum</i> ; 布氏双尾藻 <i>D. brightwellii</i>	1/80	环境报告收 Data ^①
2007	32.41	琼氏圆筛藻 <i>C. jonesianus</i> ; 中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	14/111	[25]
2007—2009	30.50	圆筛藻属 <i>Coscinodiscus</i> ; 中肋骨条藻 <i>S. costatum</i>	—	[21]
2010	35.29	琼氏圆筛藻 <i>C. jonesianus</i> ; 盔状舟形藻 <i>N. corymbosa</i> ; 中肋骨条藻 <i>S. costatum</i> ; 整齐圆筛藻 <i>C. concinnus</i>	18/159	本次调查 This paper

* 浮游植物水样 Water sample of phytoplankton, 丰度单位: $\times 10^4$ 个/ m^3 , DTSN: Dinoflagellate/total species number; ①国家海洋局第二海洋研究所, 浙江大唐乌沙山电厂二期工程(2×1000MW 超临界发电机组)环境影响报告书海域部分, 2008

潮量减少 12.6%, 30 d、60 d 和 90 d 的平均水交换率分别减少 7.7%、6.8% 和 6.1%。因此,象山港大面积的滩涂围垦使原有的水动力环境(潮汐、流场和余流场等)发生改变,纳潮量和水交换率降低,环境容量变小,影响了污染物的自净和向外扩散能力,造成港内工农业污水和养殖废水排放的大量营养盐长期滞留港内,污染(如富营养化和热污染等)加剧。

此外,电厂温排水的海水温升也有一定关系。因为在海水适度温升的条件下,富营养化程度加剧^[5],温排水的适度温升会促进浮游植物的生长^[22,28],从而提高了象山港主港的浮游植物丰度,最终导致本次调查浮游植物丰度的空间分布呈现港口及港口外低而港底高、支港低而主港高(图 2 和表 1)的趋势。且这种空间分布格局与以往调查结果(港口低而港底高、支港高而主港低)并不一致^[1,18,20-21,25]。

本次调查琼氏圆筛藻为绝对优势种,且高值区位于宁海电厂至乌沙山电厂的邻近海域(图 2)。由于该藻属暖水性种,细胞分裂与温度和光照密切相关^[35],在温排水的适度温升和水体透明度较高的条件下,生长繁殖较快。盔状舟形藻的丰度高值区刚好对应于铜山岛和南沙岛的海带养殖区(图 2),这是因为该藻属附生性藻类,大量附着于海带叶状体,导致该藻在这两个养殖区及其邻近海域有较高的丰度^[22]。同样,中肋骨条藻的丰度高值区对应于铁港港口和西沪港的网箱养殖区(图 2)。Morozova 和 Orlova^[36]对日本海 Vostok 湾的研究也表明,该藻的种群密度与海水养殖面积呈正相关关系。对比历史数据(表 3)可知,2010 年春季优势种组成与近几年(2007—2009 年)的调查结果类似,但与 2006 年之前的调查结果相差较大。这种改变可能与电厂温排水引起的海水温升有关。海水温升使耐热能力较强的浮游植物种类(如琼氏圆筛藻)成为优势种,而对温升较敏感的种群逐渐丧失优势地位甚至消亡。如自 2005 年底宁海电厂开始运行后,象山港浮游植物优势种组成就发生了明显改变(表 3),同样在我国大亚湾,核电厂温排水造成的海水温升与当地优势种的演替及藻华的发生也有密切联系^[37]。此外,象山港浮游植物群落结构的改变与营养盐浓度的升高以及营养盐结构的改变也密切相关^[1,3,7,18,25]。如 Zhou 等^[38]研究认为,近 50 年来营养盐浓度升高和结构(N/P 和 Si/N)失衡是长江口浮游植物丰度升高、优势种组成改变及赤潮频发的主要原因。因此,象山港浮游植物群落结构的改变与当地的各种海洋开发活动有关。

致谢:感谢刘小涯、姚龙奎、姚梅、莫俊超、刘俊峰和金思韵等协助采样并提供相关理化参数;感谢冉莉华副研究员对本文写作的帮助。

References:

- [1] Ning X R, Hu X G. Investigation and Assessment of Aquaculture Capacity of Cage Fish and Cultural Ecology in Xiangshan Bay. Beijing: Ocean Press, 2002: 1-132.
- [2] Zeng X M, Guan W B, Pan C. Cumulative influence of long term reclamation on hydrodynamics in the Xiangshangang Bay. Journal of Marine Sciences, 2011, 29(1): 73-83.
- [3] Lü H Q, Chang K M, Shi G D. Circulation and distribution of nitrogen and phosphorus in Xiangshan Bay, China. Oceanologia et Limnologia Sinica, 2009, 40(2): 138-144.
- [4] Zhang L X, Jiang X S, Cai Y H, Li Z E. Comprehensive assessment on the situation of water quality at the red tide monitoring area of Xiangshan Harbor in recent four years. Transactions of Oceanology Limnology, 2007, (4): 98-103.
- [5] Yang H, Li C X, Yin C S, Chu M. Contrast of simulation nutrients transport and transformation with pelagic ecosystems of mesocosm in different temperature sections in Xiangshan Bay. Journal of Fisheries of China, 2011, 35(7): 1030-1036.
- [6] Liu J J, Zeng J N, Chen Q Z, Jiang Z B, Zhao Y Q, Liao Y B, Shou L, Xu X Q, Huang Y J, Du P. The bacterial ecological distribution in water and sediment of cage culture area in Xiangshangang Bay. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 377-388.
- [7] Wang H L, Yang J F, Tu H X, Chen J G, Feng H Q. Spatiotemporal distribution of marine viruses with related to environmental factors in the Xiangshan Bay. China Environmental Science, 2011, 31(5): 834-844.
- [8] Wang C S, Liu Z C, He D H. Seasonal dynamics of zooplankton biomass and abundance in Xiangshan Bay. Journal of Fisheries of China, 2003, 27(6): 595-599.
- [9] Wang X B, Qiu W S, Qin M L, Wei Y J. Studies on ecological community distribution of zooplankton in Xiangshan Bay. Marine Environmental Science, 2009, 29(增刊1): 62-64.

- [10] Du P, Liu J J, Xu X Q, Chen Q Z, Zeng J N, Jiang Z B, Wang Q. Characteristics comparison of zooplankton in different habitats of Xiangshan Bay in winter, 2010. Fisheries Science and Technology Information, 2011, (2): 92-99.
- [11] Wu R, Lan D Z, Gao Y H, Chen C P, Lan B B. Preliminary study on the distribution of benthic diatoms and their environments in intertidal zone of Xiangshan Bay. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2008, 27(4): 445-451.
- [12] Gao A G, Chen Q Z, Hu X G, Yang J Y, Dong Y T, Zeng J N, Ning X R, Zhang J. Ecological characteristics on macrobenthos of netcage cultural areas in the Xiangshan Bay. Acta Oceanologica Sinica, 2005, 27(4): 108-113.
- [13] Gu X Y, Tao L, Shi H X, Lou D, Jiao H F, You Z J. Macrobenthic faunal diversity in Xiangshan Bay. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(6): 1551-1557.
- [14] Liao Y B, Shou L, Zeng J N, Gao A G, Jiang Z B. A comparative study of macrobenthic community under different mariculture types in Xiangshan Bay, China. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(3): 646-653.
- [15] Gao Y H, Yu Q B, Qi Y Z, Zhou J Z, Lu D D, Li Y, Chen C P. Species composition and ecological distribution of planktonic diatoms in the Changjiang River estuary during spring. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(7): 1044-1048.
- [16] Luan Q S, Sun J, Song S Q, Shen Z L, Yu Z M. Canonical correspondence analysis of summer phytoplankton community and its environment in the Yangtze River Estuary, China. Journal of Plant Ecology, 2007, 31(3): 445-450.
- [17] Li Y, Li H, Lü S H, Jiang T J, Xiao Y P, Chen S. Species diversity and distribution of phytoplankton in Nanji Islands national nature reserve. Acta Hydrobiologica Sinica, 2010, 34(3): 618-628.
- [18] Editorial Committee of the Bay Chorography in China. The Bay Chorography in China: part 5. Beijing: Ocean Press, 1992: 166-233.
- [19] Zhang H B, Cai Y H, Xiang Y T. Study on the phytoplankton and HAB in Xiangshan Bay. Marine Science Bulletin, 2005, 24(1): 92-96.
- [20] Gu X G, Xu Z L. Central and western parts of Xiangshangang, Zhejiang. Marine Fisheries, 1993, 15(2): 199-209, 215-215.
- [21] You Z J, Jiao H F. Study on the Ecology and Environmental Protect and Restored Technology of Xiangshan Bay. Beijing: Ocean Press, 2011: 125-137.
- [22] Jiang Z B, Chen Q Z, Zeng J N, Liao Y B, Shou L, Liu J J. Phytoplankton community distribution in relation to environmental parameters in three aquaculture systems in a Chinese subtropical eutrophic bay. Marine Ecology Progress Series, 2012, 446: 73-89.
- [23] General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine. Marine Investigation Criterion (GB/T12763. 6-2007). Beijing: China Standard Press, 2007.
- [24] Lepš J, Šmilauer P. Multivariate Analysis of Ecological Data Using CANOCO. London: Cambridge University Press, 2003: 1-280.
- [25] Zeng J N, Pan J M, Liang C J, Chen Q Z. Integrated Investigation Report of the Ecology and Environment of Key Bay in Zhejiang Province. Beijing: Ocean Press, 2011: 189-194.
- [26] Miao Z Q, Yang D F. Solar light, seawater temperature, and nutrients, which one is more important in affecting phytoplankton growth? Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2009, 27(4): 825-831.
- [27] Zeng G N, Guang W B, Zeng J N, Chen Q Z, Ai N. 3D modeling of the thermal effluents dispersion from power plants in the Xiangshan Bay. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science Research, 2011, 28(1): 71-82.
- [28] Liao Y B, Chen Q Z, Zeng J N, Gao A G, Liu J J, Jiang Z B. Thermal effect on the marine phytoplankton in Xiangshan Bay, China. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4203-4212.
- [29] Kolasa J, Pickett S T A. Ecological Heterogeneity. New York: Springer Verlag, 1991: 1-332.
- [30] Pinel-Aloul B, Ghadouani A. Spatial heterogeneity of planktonic microorganisms in aquatic systems // Franklin R B, Mills A L, eds. The Spatial Distribution of Microbes in the Environment. Dordrecht: Springer, 2007: 203-310.
- [31] Wu J G. Landscape Ecology. Beijing: Higher Education Press, 2000: 1-258.
- [32] Martin A P. Phytoplankton patchiness: the role of lateral stirring and mixing. Progress in Oceanography, 2003, 57(2): 125-174.
- [33] Seuront L. Hydrodynamic and tidal controls of small scale phytoplankton patchiness. Marine Ecology Progress Series, 2005, 302: 93-101.
- [34] Nobre A M, Ferreira J G, Nunes J P, Yan X J, Bricker S, Corner R, Groom S, Gu H F, Hawkins A J S, Hutson R, Lan D Z, Lencart E S J D, Pascoe P, Telfer T C, Zhu M Y, Zhang X L. Assessment of coastal management options by means of multilayered ecosystem models. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2010, 87(1): 43-62.
- [35] Huang S Y, Lin J M. Effect of light and temperature on the cell division in *Coscinodiscus jonesianus*. Journal of Jimei University, 1998, 3(3): 126-131.
- [36] Morozova T V, Orlova T Y. Monitoring of phytoplankton in the area of a sea farm in Vostok Bay (Sea of Japan). Russian Journal of Marine Biology, 2005, 31(1): 1-6.
- [37] Li T, Liu S, Huang L M, Huang H, Lian J S, Yan Y, Lin S J. Diatom to dinoflagellate shift in the summer phytoplankton community in a bay impacted by nuclear power plant thermal effluent. Marine Ecology Progress Series, 2011, 424: 75-85.

- [38] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1483-1489.

参考文献:

- [1] 宁修仁, 胡锡钢. 象山港养殖生态和网箱养鱼的养殖容量研究与评价. 北京: 海洋出版社, 2002: 1-132.
- [2] 曾相明, 管卫兵, 潘冲. 象山港多年围填海工程对水动力影响的累积效应. *海洋学研究*, 2011, 29(1): 73-83.
- [3] 吕华庆, 常抗美, 石钢德. 象山港氮、磷营养盐环流和分布规律的研究. *海洋与湖沼*, 2009, 40(2): 138-144.
- [4] 张丽旭, 蒋晓山, 蔡燕红, 李志恩. 近4年来象山港赤潮监控区水质状况综合评价. *海洋湖沼通报*, 2007, (4): 98-103.
- [5] 杨红, 李春新, 印春生, 储鸣. 象山港不同温度区围隔浮游生态系统营养盐迁移—转化的模拟对比. *水产学报*, 2011, 35(7): 1030-1036.
- [6] 刘晶晶, 曾江宁, 陈全震, 江志兵, 赵永强, 廖一波, 寿鹿, 徐晓群, 黄逸君, 杜萍. 象山港网箱养殖区水体和沉积物的细菌生态分布. *生态学报*, 2010, 30(2): 377-388.
- [7] 王海丽, 季芳芳, 屠霄霞, 陈志刚, 冯辉强. 象山港海洋病毒时空分布特征及其环境影响因素. *中国环境科学*, 2011, 31(5): 834-844.
- [8] 王春生, 刘镇盛, 何德华. 象山港浮游动物生物量和丰度的季节变动. *水产学报*, 2003, 27(6): 595-599.
- [9] 王晓波, 邱武生, 秦铭俐, 魏永杰. 象山港浮游动物生态群落分布的研究. *海洋环境科学*, 2009, 29(增刊1): 62-64.
- [10] 杜萍, 刘晶晶, 徐晓群, 陈全震, 曾江宁, 江志兵, 王琪. 象山港不同生境冬季浮游动物生态特征比较研究. *水产科技情报*, 2011, (2): 92-99.
- [11] 吴瑞, 蓝东兆, 高亚辉, 陈长平, 兰彬斌. 象山港潮间带底栖硅藻的分布及其与环境关系探讨. *台湾海峡*, 2008, 27(4): 445-451.
- [12] 高爱根, 陈全震, 胡锡钢, 杨俊毅, 董永庭, 曾江宁, 宁修仁, 张健. 象山港网箱养鱼区大型底栖生物生态特征. *海洋学报*, 2005, 27(4): 108-113.
- [13] 顾晓英, 陶磊, 施慧雄, 楼丹, 焦海峰, 尤仲杰. 象山港大型底栖动物生物多样性现状. *应用生态学报*, 2010, 21(6): 1551-1557.
- [14] 廖一波, 寿鹿, 曾江宁, 高爱根, 江志兵. 象山港不同养殖类型海域大型底栖动物群落比较研究. *生态学报*, 2011, 31(3): 646-653.
- [15] 高亚辉, 虞秋波, 齐雨藻, 邹景忠, 陆斗定, 李扬, 陈长平. 长江口附近海域春季浮游硅藻的种类组成和生态分布. *应用生态学报*, 2003, 14(7): 1044-1048.
- [16] 栾青杉, 孙军, 宋书群, 沈志良, 俞志明. 长江口夏季浮游植物群落与环境因子的典范对应分析. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 445-450.
- [17] 李扬, 李欢, 吕颂辉, 江天久, 萧云朴, 陈舜. 南麂列岛海洋自然保护区浮游植物的种类多样性及其生态分布. *水生生物学报*, 2010, 34(3): 618-628.
- [18] 中国海湾志编纂委员会. 中国海湾志第五部分. 北京: 海洋出版社, 1992: 166-233.
- [19] 张海波, 蔡燕红, 项有堂. 象山港水域浮游植物与赤潮生物种群动态研究. *海洋通报*, 2005, 24(1): 92-96.
- [20] 顾新根, 徐兆礼. 象山港中、西部浮游植物生态及赤潮研究. *海洋渔业*, 1993, 15(2): 199-209, 215.
- [21] 尤仲杰, 焦海峰. 象山港生态环境保护与修复技术研究. 北京: 中国海洋出版社, 2011: 125-137.
- [23] 国家质量监督检验检疫局. 海洋调查规范(GB/T12763. 6-2007). 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [25] 曾江宁, 潘建明, 梁楚进, 陈全震. 浙江省重点港湾生态环境综合调查报告. 北京: 海洋出版社, 2011: 189-194.
- [28] 廖一波, 陈全震, 曾江宁, 高爱根, 刘晶晶, 江志兵. 海洋浮游植物的热效应. *生态学报*, 2008, 28(9): 4203-4212.
- [31] 邬建国. 景观生态学. 北京: 高等教育出版社, 2000: 1-258.
- [35] 黄世玉, 林均民. 琼氏圆筛藻细胞分裂的光温效应. *集美大学学报*, 1998, 3(3): 126-131.

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

本期责任副主编 朱永官

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 33 卷 第 11 期 (2013 年 6 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 11 (June, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元