

# 2000-2001 年柘林湾浮游植物群落结构及数量变动的周年调查

周 凯<sup>1</sup>, 黄长江<sup>1, 2</sup>, 姜 胜<sup>1</sup>, 黄文魁<sup>3</sup>, 董巧香<sup>4</sup>

(1. 暨南大学水生生态科学研究所, 广州 510632; 2. 汕头大学海洋生物重点实验室, 汕头 515063; 3. 广东省汕头市水产局, 汕头 515031; 4. Aquaculture Research Station of Louisiana State University, LA 70820, USA)

**摘要** 2000 年 5 月-2001 年 5 月对粤东赤潮重灾区柘林湾进行的浮游植物周年调查表明, 柘林湾共有浮游植物 54 属 153 种。其中硅藻为优势类群, 共 37 属 114 种, 占总种数的 74.51%; 甲藻 15 属 36 种; 其它 2 属 3 种。浮游植物种数和丰度的平面分布表现为湾内低于湾外, 东部低于西部的基本格局, 季节波动模式则为单峰型, 全年数量最高峰位于盛夏 7 月份。中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 为该湾的全年优势种, 在群落总细胞数中的百分比年平均高达 58.7%。通过对水温、营养盐、浮游植物群落的多样性指数和均匀度以及中肋骨条藻的种群密度等相互之间的回归分析, 并考虑增殖养殖渔业等因素, 发现柘林湾因大规模增殖养殖渔业和高强度的排污排废引起的富营养化已在很大程度上改变了该湾浮游植物的群落结构及时空分布, 使生物多样性与均匀度明显下降, 中肋骨条藻等少数种类则大量增殖。硅藻赤潮, 尤其是中肋骨条藻赤潮的发生机会明显增多, 但发生甲藻赤潮的可能性较小。

**关键词** 柘林湾; 浮游植物; 骨条藻; 赤潮

## Annual Dynamics of Phytoplankton in Zhelin Bay : 2000-2001

ZHOU Kai<sup>1</sup>, HUANG Chang-Jiang<sup>2, 1</sup>, JIANG Sheng<sup>1</sup>, HUANG Wen-Kui<sup>3</sup>, DONG Qiao-Xiang<sup>4</sup> (1. Institute of Hydrobiology, Ji'nan University, Guangzhou 510632, China; 2. Laboratory of Marine Biology, Shantou University, Shantou 515063 China; 3. Aquatic Bureau of Shantou City, Shantou 515031 China; 4. Aquaculture Research Station, Louisiana Agricultural Experiment Station, Louisiana State University Agricultural Center, Baton Rouge, Louisiana 70803, USA). *Acta Ecologica Sinica* 2002, 22(5): 688-698.

**Abstract** Zhelin Bay is one of the most important bays for marine culture in Guangdong Province of China. Due to the increasing human population and marine culture in the last 10 years, the environment has changed dramatically. Although *Phaeocystis* blooms had brought tremendous economic loss and ecological damage to this area in 1997 and 1999, few studies followed and there are no previous investigations of phytoplankton. To understand why *Phaeocystis* blooms frequently hit this area and how the increased marine culture affects this ecosystem, we investigated the temporal and spatial distribution of phytoplankton, zooplankton, nutrients, trace elements, dissolved oxygen, etc. from May 2000. This paper describes the distribution of phytoplankton communities in a 1-year period (2000-05~2001-05).

Water samples were collected from eight stations weekly (March to November) or biweekly (December to February). Sampling was scheduled to cover the period around high tide ( $\pm 1.5$ h). At each station, water samples were collected from 0.5 m below the surface and 0.5 m above the bottom using a 5-L HQM-1 sampler. Each sample (1 L) was fixed with acid lugol solution *in situ*, and concentrated to 300ml based on different

**基金项目** 广东省重大科技兴海资助项目(A200005F02); 国家自然科学基金“九五”重大资助项目(39790110); 国家教育部骨干教师资助计划(2000(23)号)

**收稿日期** 2001-09-30; **修订日期** 2002-02-02

**作者简介**: 周 凯 (1973~), 男, 湖北武汉人, 博士研究生。主要从事海洋浮游植物和海洋生态学研究。

万方数据

densities. Species were analyzed with the Zeiss microscope and a 1-ml Sedgewick-Rafte counting frame was used for cell counting. Most organisms were identified to species, but a few were clustered into higher classes. Because Zhelin Bay is shallow (mean depth 4.8 m) and the water is well-mixed, the data were recorded as the average of samples from surface and bottom unless otherwise indicated. The diversity index ( $H'$ ), max-diversity index ( $H'_{\max}$ ) and evenness ( $J$ ) were calculated according to Shannon-Weaver (1949) and Pielou (1969).

Among 153 taxa recorded, diatoms (114) accounted for 74.5%, followed by dinoflagellates (36), chrysophyta (2) and cyanophyta (1). In terms of cell number, diatoms contributed 99.1% of the total biomass, while dinoflagellates only had 0.78%. Diatoms were present throughout the whole year, but dominant species varied by season: spring was dominated by *Leptocylindrus danicus*, *Pseudonitzschia pungens*, *Thalassionema nitzschioides* and *Chaetoceros curvisetus*; summer was dominated by *Eucampia zodiacus* and *C. affinis*; autumn was dominated by *P. pungens*, *T. nitzschioides* and *Melosira sulcata*; and winter was dominated by *M. sulcata*. *Skeletonema costatum* was abundant and dominated throughout the whole year.

Species abundance increased from 51 species at the inner bay (station 1) to 91 at the outer bay (station 7). Temporally, phytoplankton reached the highest abundance of 86 species in June and dropped to the lowest of 26 in January. The density of phytoplankton also increased gradually from  $1.6 \times 10^5$  cells/L in the inner bay (station 1) to  $6.7 \times 10^5$  cells/L at the outer bay (station 7). However, the horizontal distribution of nutrient was inversed with phytoplankton abundance. We suggested that the large-scale filter-feeding oyster culture and high turbidity in the inner part of Zhelin Bay could be responsible for the low density of phytoplankton and high nutrients in the inner bay.

Phytoplankton density also showed significant seasonal changes. Mean density in the investigated area was low in January ( $2.1 \times 10^4$  cells/L), but increased from February along with water temperature. Its peak reached to  $1.1 \times 10^6$  cells/L in July. Generally, phytoplankton blooms in spring and autumn in subtropical regions. In Zhelin Bay, however, the highest density was in July and August, ranging from  $6.4 \times 10^5$  to  $1.1 \times 10^6$  cells/L, which resulted in a positive correlation ( $r = 0.594$ ,  $P < 0.0001$ ) between phytoplankton and water temperature. In fact, the density was not low in spring (March - May, ranging from  $1.3$  to  $5.6 \times 10^5$  cells/L), but the vigorous growth of *S. costatum* in the warm season (July-August) made the total cell number of phytoplankton higher in summer.

In Zhelin Bay, *S. costatum* accounted for 58.7% of the total biomass in cell number, and it positively correlated to the total biomass ( $r = 0.909$ ,  $P < 0.0001$ ). Therefore, the horizontal and seasonal distribution patterns of *S. costatum* dominated the patterns of the total phytoplankton. *S. costatum* accounted for a higher percent of the biomass at the inner bay than that of the outer bay. Combined with our findings in the nutrient cycle and previous studies, we concluded that water with rich-silicate, low salinity and high turbidity at the inner bay was more conducive to the growth of *S. costatum* than to other species.

The diversity index ( $H' = 1.9$ ) and evenness ( $J = 0.47$ ) of the phytoplankton communities in Zhelin Bay were much lower than those in most bays along the southeastern coast of China. This finding suggested that increasing blooms of a few species would greatly change the community composition of phytoplankton. For example, *S. costatum* bloomed at station 8 with a density of  $5.5 \times 10^6$  cells/L on 23 July 2000, and accounted for more than 99% of the total biomass in cell number.

**Key words** Zhelin Bay; phytoplankton community; *Skeletonema costatum*; bloom

文章编号: 1000-093X(2002)05-0688-11 中图分类号: Q948.8 P714+.5 文献标识码: A

柘林湾位于粤闽交界处,是广东省海水养殖密度最大的海湾之一<sup>[1]</sup>,同时也是赤潮多发区。1997年11月中旬至翌年初在该湾发生了大规模的棕囊藻赤潮,造成的经济损失超过1亿元<sup>[2]</sup>。1999年7月中

旬 棕囊藻赤潮卷土重来,对柘林湾海水增养殖渔业和生态环境造成了严重的危害<sup>[3]</sup>。本文通过对柘林湾及湾外附近海域浮游植物群落的种类组成、数量分布及季节变化的周年调查,旨在从生态学角度评价和分析该湾大规模有害赤潮频发的生态背景,为研究和制定粤东海水增养殖业可持续发展和海湾生态保护策略提供基础资料。

1 材料与方法

样品采自于 2000 年 5 月至 2001 年 5 月,共设 8 个 站 位,布 设 如 图 1 所 示。冬 季 每 月 采 样 2 次,其 余 季 节 每 月 3~4 次。

浮游植物样品分网采(定性)与瓶采(定量),网具 采 用《海 洋 调 查 规 范》<sup>[4]</sup>中 的 浅 水Ⅲ 型 浮 游 生 物 采 集 网 (网口直径 37cm、面积 0.1m<sup>2</sup>、网目孔径 77μm)自海底 (离底部 0.5m)向海面垂直拖网。瓶具采用 HQM-1 型 有 机 玻 璃 采 水 器 取 表 层 (离 水 面 0.5m)和 底 层 (离 水 底 0.5m)水 样 各 1L 装 入 聚 乙 烯 瓶 中。水 样 采 集 后,立 即 用 鲁 哥 氏 液 固 定,使 其 最 终 浓 度 为 15‰。定 量 水 样 静 置 24h 后,用 细 小 虹 吸 管 小 心 吸 去 上 清 液,如 此 反 复 多 次,最 后 浓 缩 至 30~100ml。分 析 时 取 均 匀 样 品 1ml 注 入 1ml 的 Sedgewick-Rafte 浮游植物计数框,在 德 国 Zeiss 光 学 显 微 镜 下 进 行 种 类 鉴 定 和 计 数。计 数 时 为 了 使 误 差 减 少 到 10%,每 次 所 计 浮 游 植 物 细 胞 数 均 达 到 400 个 以 上<sup>[5]</sup>。网 采 样 品 只 用 于 种 类 分 析。

水温、盐度、浊度、溶解氧和水深用美国 YSI-6600 型水质分析仪进行现场测定。另取 1L 水样带回实验室,过滤后用荷兰 SKALAR 水质流动注射分析仪和日本 SHIMADZU UV-2501PC 紫外/可见分光光度计进行营养盐等水化指标的测定。

文中引用数值均为表、底层平均值。其中,种类数是综合瓶采和网采两种样品的分析结果得出的。浮游植物的多样性指数、最大多样性指数和均匀度采用以下计算公式:

多样性指数 
$$H' = - \sum_{i=1}^S P_i \log_2 P_i \quad (P_i = N_i / N) \quad (\text{Shannon-Weaver, 1949})$$

最大多样性指数 
$$H'_{\max} = \log_2 S \quad (\text{Shannon-Weaver, 1949})$$

均匀度 
$$J = H' / \log_2 S \quad (\text{Pielou, 1969})$$

式中,  $N_i$  第  $i$  种的个体数;  $N$  样品中的总个体数;  $S$  总种数。

2 结果

2.1 水温和盐度

调查海区水温湾内略高于湾外(图 2)。黄冈河口  $S_1$  站的水温最高(16.230.3℃),年平均值为 23.6℃。湾外  $S_8$  站最低(15.427.1℃),年平均值为 22.0℃。调查期间水温的季节变化非常明显(图 3),变化范围在 15.430.3℃。整个海区的周年平均值为 23.0℃;1 月份水温最低,月平均值为 16.4℃;7 月份最高,月平均值为 27.9℃。

调查海区盐度由湾内向湾外递增的趋势非常明显(图 2)。黄冈河口  $S_1$  站的盐度最低(5.1‰24.3‰),年平均值只有 19.6‰,而湾外  $S_8$  站最高(23.6‰34.6‰),年平均值达 29.6‰。由于离柘林湾约 10km 处横卧着面积为 108km<sup>2</sup> 的南澳岛(图 1),从而减弱了外海水对该湾的影响,使其盐度明显低于一般外海水的 35‰。调查期间盐度的变化范围为 5.1‰34.6‰,整个海区的周年平均值为 26.7‰。由于受雨季及地表径流的影响,调查海区盐度的季节变化比较明显(图 3)。夏季盐度相对较低,最低的 7 月份平均值为 24.7‰。秋季较高,最高的 11 月份平均值达到 31.4‰。

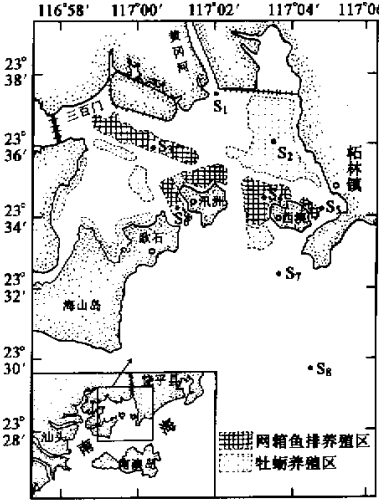


图 1 调查站位的分布

Fig. 1 A map of sampling stations

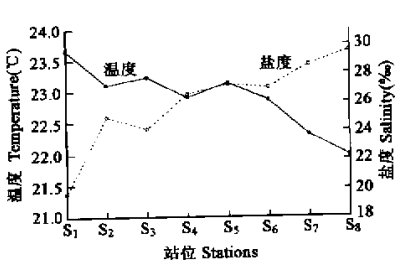


图 2 各调查站位水温和盐度的周年平均值

Fig.2 Annual average of water temperature and salinity in each investigated station

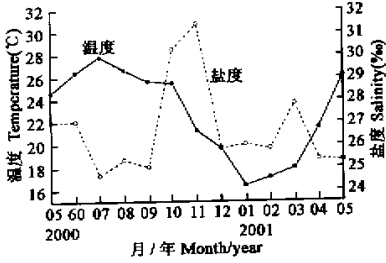


图 3 调查海区水温和盐度月平均值的周年变化

Fig.3 Annual variations of monthly averages of water temperature and salinity in the investigated area

2.2 浮游植物种类组成及时空分布

2.2.1 浮游植物种类组成 本调查期间共采集到浮游植物 153 种(含变种、变型)。其中硅藻门 37 属,114 种,占总种数的 74.51%;甲藻门 15 属,36 种;金藻门 1 属,2 种;蓝藻门 1 属,1 种。硅藻以角毛藻属(*Chaetoceros*)为最优势类群,共 25 种,占总种数的 16.3%,为硅藻总种数的 21.9%;甲藻则以角藻属(*Ceratium*)为优势类群,共 5 种。

2.2.2 优势种及其季节演替 本调查期间,浮游植物优势种主要有硅藻的中肋骨条藻(*Skeletonema costatum*)、旋链角毛藻(*Chaetoceros curvisetus*)、窄隙角毛藻(*Chaet. affinis*)、菱形海线藻(*Thalassionema nitzschioides*)、尖刺拟菱形藻(*Pseudonitzschia pungens*)、丹麦细柱藻(*Leptocylindrus danicus*)、具槽直链藻(*Melosira sulcata*)、翼根管藻(*Rhizosolenia alata*)、浮动弯角藻(*Eucampia zoodiacus*)、日本星杆藻(*Asterionella japonica*)和甲藻的灰白下沟藻(*Katodinium glaucum*)、三鳍原甲藻(*Prorocentrum triestinum*)。其中中肋骨条藻数量在调查海域始终占据着绝对优势位置,为全年优势种。

由亚热带内湾的性质所决定,调查海域常见种和优势种均由一些广温广盐的广布种组成,如中肋骨条藻、旋链角毛藻、窄隙角毛藻、浮动弯角藻和斯氏根管藻(*Rhizosolenia stolterfothii*)等。除了中肋骨条藻为全年优势种外,春季(35 月份)优势种较多,主要由广布性沿岸种组成,如适温、适盐范围较广的丹麦细柱藻、尖刺拟菱形藻、菱形海线藻和旋链角毛藻。夏季(68 月份)由于雨季的影响,盐度较低,一些低盐性种类如浮动弯角藻、窄隙角毛藻也成为该海区的优势种。秋季(911 月份)水温下降,降雨减少,盐度回升,低盐暖温性种类逐渐消失,主要优势种为尖刺拟菱形藻、菱形海线藻、具槽直链藻所替代。冬季(12 翌年 2 月份)由于低温的影响,浮游植物种数下降明显,主要优势种只有中肋骨条藻和具槽直链藻。

2.2.3 种数的平面分布 整个调查期间所有站位的种类组成均以硅藻占优势,为总种数的 68.6%-78.4%。种数的平面分布湾外高于湾内,表现为由湾外向湾内递减的态势(图 4)。黄冈河口 S<sub>1</sub> 站浮游植物的年出现种数最少,为 51 种。位于湾外近湾口处的 S<sub>7</sub> 站年出现种数最多,为 91 种。湾内除 S<sub>1</sub> 站外,以柘林港内的 S<sub>2</sub> 站最少,为 55 种,而位于西部海域中央的 S<sub>3</sub> 站年出现种数最多,达 74 种。

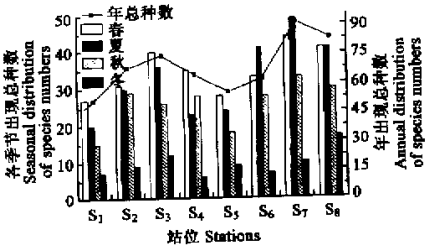


图 4 各站位浮游植物出现总种数的季节分布

Fig.4 Seasonal distribution of species number of phytoplankton in each investigated station  
年总种数 Total species number, 春 Spring 夏 Summer 秋 Autumn 冬 Winter

图 4 示,春、夏、秋三季均以  $S_7$  站的浮游植物出现种数为最多,以黄冈河口的  $S_1$  站最少。冬季则以最外面的  $S_8$  站的种数最多, $S_4$  站位的种数最少。调查期间,除  $S_6$  和  $S_7$  两站夏季浮游植物种数略多于春季外,其余站位均是春季最多,但与夏季的差值并不显著。

**2.2.4 种数的季节分布** 调查海区浮游植物种数的季节变化非常显著(图 5)。主要类群硅藻与甲藻的变化趋势差别不大。初春,由于水温上升,许多暖水性种类显著增多,如粗根管藻(*Rhizosolenia robusta*)、笔尖根管藻(*Rhiz. styliiformis*)、秘鲁角毛藻(*Chaetoceros peruvianus*)、太阳双尾藻(*Ditylum sol*)和三角角藻(*Ceratium trichoceros*)等,导致种数增多。至 6 月份,浮游植物月出现种数达到全年最高峰的 86 种。随后逐步下降,于冬季 1 月份降至全年最低值的 26 种。

2.3 浮游植物数量的时空分布

**2.3.1 数量的平面分布** 调查海区浮游植物数量的平面分布由湾内向湾外递增的趋势十分明显(图 6)。 $S_7$  站数量最高,年平均密度达  $67.46 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。湾顶黄冈河口  $S_1$  站最低,年平均密度仅为  $16.14 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,相差达 4.18 倍。湾内以  $S_6$  站的细胞丰度最高, $S_3$  站的次之。如以汎洲为界,湾内西部海域  $S_3$  和  $S_6$  两站的细胞丰度显著高于东部水域的其它各站。

图 6 示,不同季节调查海区浮游植物数量平面分布格局也有所不同。冬季(12 月份、翌年 2 月份)整个海湾的浮游植物密度都较低(平均  $3.23 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ),变化幅度为  $0.47.8 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。其高值区不是位于湾外,而是位于黄冈河口的  $S_1$  站,平均值为  $4.53 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。低值区位于  $S_6$  站,平均值为  $2.45 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。其余季节,浮游植物数量高值区均出现在湾外和近湾口处的  $S_6$  站,其中  $S_7$  站的丰度最高,春、夏、秋三季平均密度分别为  $37.19 \times 10^4$ 、 $156.18 \times 10^4$  和  $64.31 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。春、夏两季数量低值区位于  $S_1$  站,平均密度分别为  $20.14 \times 10^4$  和  $15.4 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,秋季的数量低值区则位于  $S_2$  站,平均密度为  $15.63 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。

**2.3.2 数量的季节变化** 调查期间各站位浮游植物数量的周年变化范围在  $0.61559.25 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,整个海区年平均密度为  $35.95 \times 10^4 \text{ cells/L}$ (图 7)。调查海区浮游植物主要由硅藻组成,甲藻只占浮游植物总数年平均值的 0.78%。浮游植物月平均值的周年变动模式与水温的变动模式几乎完全一样,呈明显的单峰型(图 3、图 7)。全年低谷位于 11 月至翌年 1 月份,其中,冬季 1 月份为全年最低谷,月平均值为  $2.14 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。2 月份随着水温的上升,其数量随之上升。至夏季 7 月份,由于骨条藻数量的剧增,带动了浮游植物总数的升高,月平均值达到全年最高峰的  $109.32 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。此后,海区浮游植物数量逐步下降,但在 810 月份高温期(图 3)仍维持在较高水平,月平均值为  $39.4263.9 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。浮游植物数量急降期发生在 1011 月份之间,月平均值从  $39.42 \times 10^4 \text{ cells/L}$  降至  $1.92 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,相差达 20.53 倍。

调查期间在整个调查海区硅藻在浮游植物总细胞数中所占比例达 99.1%,周年变化范围在 0.56-558.97 $\times 10^4 \text{ cells/L}$ ,年平均密度为  $35.64 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。甲藻数量不多,占浮游植物总细胞数的 0.78%,周

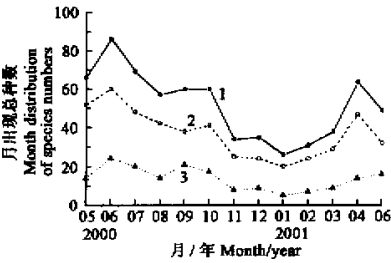


图 5 调查海区浮游植物出现种数的周年变化  
Fig. 5 Annual variation of species number of phytoplankton in the investigated area  
1 总种数 Total species number 2 硅藻 Diatom 3 甲藻 Dinoflagellate

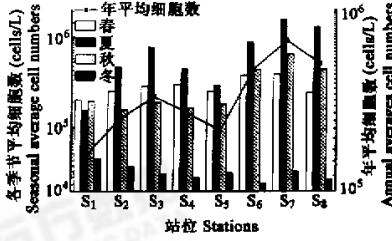


图 6 各站位浮游植物细胞数的季节和年平均均值  
Fig. 6 Seasonal and annual averages of total phytoplankton cell number in each investigated station  
春 Spring 夏 Summer 秋 Autumn 冬 Winter



年变化范围在  $0.0081.74 \times 10^4 \text{ cells/L}$  ,年平均密度为  $0.28 \times 10^4 \text{ cells/L}$ 。

2.3.3 浮游植物数量与水温、营养盐的回归分析 浮游植物数量的对数值与水温的回归分析表明(图 8a),调查海区浮游植物数量与水温呈显著的正相关关系,相关系数为 0.594。

由于季节变化引起的水温波动对浮游植物数量具有显著的影响(图 8a),为了消除水温的影响,将各调查站位浮游植物数量年均值的对数值与营养盐年均值进行回归分析。结果表明,浮游植物数量与溶解无机氮、溶解无机硅呈显著负相关关系,相关系数分别为  $-0.783$  和  $-0.808$ (图 8b、图 8c),但与无机磷的负相关关系不显著(图 8d)。

2.4 中肋骨条藻的时空分布

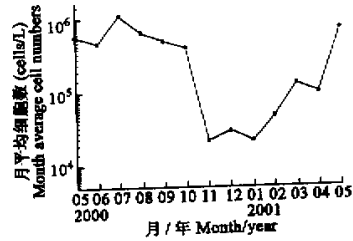


图 7 调查海区浮游植物总细胞数月均值的周年变化  
Fig. 7 Annual variation of monthly averages of total phytoplankton cell number in the investigated area

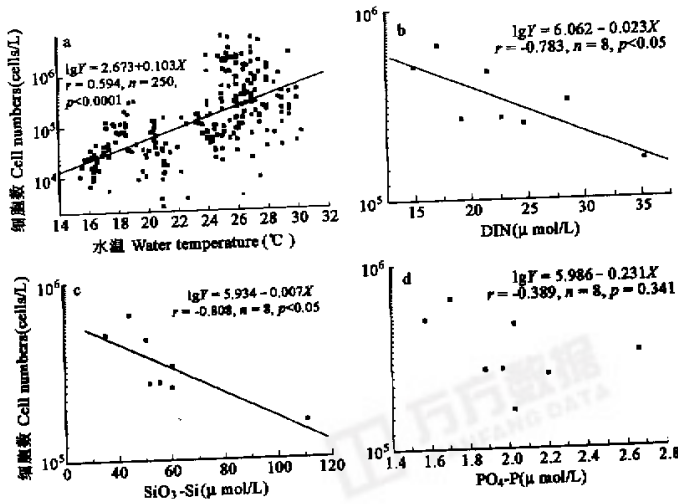


图 8 调查海区浮游植物细胞数与水温、营养盐的相关关系

Fig. 8 Correlation between total phytoplankton cell number and water temperature, nutrients in the investigated area (a: The *in situ* data; b, c and d: The annual average data in each station)

中肋骨条藻是调查海区的全年优势种,其数量的平面分布格局与浮游植物总细胞数一样呈湾内向湾外递增的趋势(图 9)。其中,也是  $S_7$  站最高,年平均数量为  $39.37 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,  $S_1$  站最低,年平均数量为  $10.73 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,相差 3.67 倍。与此相反,中肋骨条藻在浮游植物总细胞数中所占百分比的站位差异明显较小,最高的  $S_3$  站为 77.64%,最低的  $S_8$  站为 52.44%,但百分比的平面分布格局却是湾内高于湾外。

调查期间中肋骨条藻数量的周年变化范围在  $0.15551 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,年平均丰度达  $21.1 \times 10^4 \text{ cells/L}$ ,占浮游植物总细胞数百分比的变化范围在 4.66%~99.14%,年均值高达 58.7%(图 10)。由此可见,海区浮游植物总细胞数季节变化的走势在很大程度上由中肋骨条藻所左右(图 11)。与平面分布相比,中肋骨条藻数量在浮游植物总细胞数中所占百分比的月均值变化幅度较大(30.94%~80.91%),由春季至夏季的递增趋势比较明显,但 2000 年 8 月却有一显著低值,月均值为 30.94%。2000 年 7 月 23 日,中肋骨条藻在  $S_8$  站达到全年最高峰,为  $5.5 \times 10^6 \text{ cells/L}$ ,占浮游植物总细胞数的 99.14%。

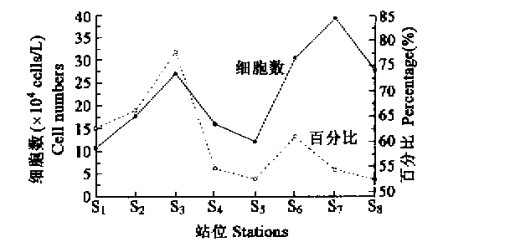


图9 各站位中肋骨条藻细胞数年均值及其占浮游植物总细胞数百分比

Fig. 9 Annual averages of cell number of *Skeletonema costatum* and its percentage in total phytoplankton in each station

2.5 群落多样性的时空分布

2.5.1 空间分布特点 调查期间,各站位浮游植物多样性指数( $H'$ )年平均值在1.68~2.30,整个海区年平均值为1.9(表1)。除了 $S_8$ 站外,其余站位多样性指数都小于2.0。最大多样性指数( $H'_{max}$ )的年平均值为3.86~4.78,整个海区年平均值为4.36。均匀度指数( $J$ )年平均值为0.41~0.51,整个海区年平均值为0.46,最大值是 $S_5$ 站的0.51。

2.5.2 季节分布特点 调查海区浮游植物多样性指数月平均值变化范围为0.782~58(图12),明显大于站位之间的变化幅度(表1)。多样性指数的季节变化规律性不强,整体来看,2000年7月最低,10月至翌年1月份相对较高。均匀度月平均值变化范围为0.16~0.73。其变化趋势与多样性的变化一致。最低值出现在夏季7月份,最高值出现在冬季的12月和翌年1月份。

表1 调查海区各站位浮游植物多样性指数、最大多样性和均匀度的周年平均值

Table 1 Annual average of diversity( $H'$ ), max-diversity( $H'_{max}$ ) and evenness( $J$ ) of phytoplankton in each station in the investigated area

站位 Stations	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$	$S_7$	$S_8$	平均值 Averages
多样性指数 $H'$	1.87	1.81	1.94	1.72	1.92	1.68	1.94	2.30	1.9
最大多样性 $H'_{max}$	3.86	4.24	4.48	4.22	4.15	4.35	4.78	4.76	4.36
均匀度 $J$	0.49	0.46	0.46	0.43	0.51	0.42	0.41	0.50	0.46

2.5.3 中肋骨条藻细胞数与多样性、均匀度的回归分析 中肋骨条藻细胞数与群落多样性、均匀度的回归分析表明,调查海区中肋骨条藻与群落多样性、均匀度存在着显著的负相关关系(图13)。

3 讨论

3.1 柘林湾浮游植物时空分布的特征及其影响因素

柘林湾浮游植物群落,无论是种类数或总细胞数,都表现为湾外高于湾内的格局。然而,对浮游植物生长和繁殖至关重要的营养盐氮、磷、硅<sup>[8]</sup>在柘林湾海域的平面分布模式却是湾内高于湾外,近岸高于离

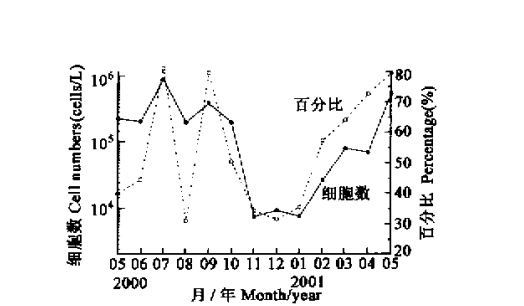


图10 调查海区中肋骨条藻细胞数月均值及其占浮游植物总细胞数百分比的周年变化

Fig. 10 Annual variation of monthly averages of cell number of *Skeletonema costatum* and its percentage in total phytoplankton cell number in the investigated area

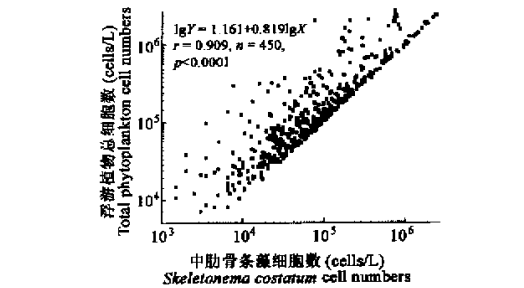


图11 调查海区浮游植物总细胞数与中肋骨条藻细胞数的相关关系

Fig. 11 Correlation between total phytoplankton cell number and *Skeletonema costatum* cell number in the investigated area

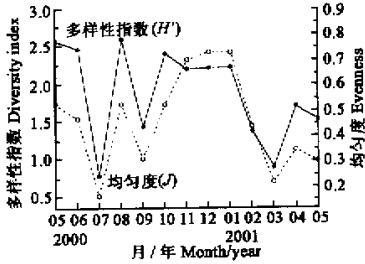


图 12 调查海区浮游植物多样性指数和均匀度月均值的周年变化

Fig. 12 Annual variation of monthly averages of diversity and evenness of phytoplankton in the investigated area

岸<sup>[9]</sup>。为此,将柘林湾各调查站位营养盐的年平均值与浮游植物群落总细胞的年平均值进行回归分析,两者呈现了显著的负相关关系(图 8b、图 8c)。一般来说,营养盐含量高的海域,浮游植物数量应该随之亦高,海域的富营养化程度越高,则发生赤潮的机会也就越大<sup>[10]</sup>。是什么原因造成了柘林湾浮游植物数量与营养盐含量这种相背离的走势?其一,水化数据<sup>[9]</sup>表明柘林湾是一个营养盐全面超标,富营养化程度很高的海湾,其溶解态无机氮、磷的年平均值分别为 22.64、1.95 $\mu\text{mol/L}$ ,均超过 3 类海水的国家《海水水质标准》<sup>[11]</sup>,无机硅含量的年平均值更高达 59.7 $\mu\text{mol/L}$ 。在一个营养盐全面过剩的海湾,营养盐对浮游植物生长繁殖的调控作用自然相对减弱,而其它因素的作用则会相对加强。水温与浮游植物总细胞数的显著正相关关系就是一个很好的说明(图 8a)。其二,柘林湾(约 70  $\text{km}^2$ )是一个网箱渔排超过 4 万格,贝类养殖面积近 20 $\text{km}^2$  的大规模海水增养殖区<sup>[9]</sup>。长期大规模的养殖活动产生的二次污染使得海湾生态环境严重恶化,渔民为了提高养殖鱼类的存活率,不断将网箱渔排迁往湾口深水处,湾内侧则尽量挂养牡蛎等滤食性贝类,仅湾内东部 S<sub>2</sub> 站所在的大平洋牡蛎养殖区的面积就达 15 $\text{km}^2$ (图 1)。这种大规模贝类养殖产生的摄食压力应该是湾内侧海域浮游植物群落种类数和丰度相对较低的重要原因<sup>[12]</sup>,也是湾内浮游植物丰度东部低于西部的合理解释。虽然养殖贝类对海湾水体的净化具有一定作用,但养殖动物排泄物在海底的沉淀堆积可能引起的生态系统结构性的变化值得深入研究。1998 年秋季发生大规模裸甲藻赤潮,并引起重大经济损失的烟台四十里湾就是一个大规模贝类养殖区<sup>[13]</sup>。

柘林湾所处纬度为 23°32' N 23°37' N,属亚热带海域,其浮游植物数量的周年变化曲线一般应为两峰型,而且春季高峰应该强于秋季高峰<sup>[5,14,15]</sup>。然而,本调查结果显示,柘林湾浮游植物数量在春季虽然也随着水温的上升显著回升,但数量在夏季不减反增,而且在秋季仍维持在很高的水平(图 7),因此周年变化曲线表现为明显的单峰型。从春季 5 月份达到 10<sup>5</sup> cells/L 月平均值、数量级的高值来看,柘林湾浮游植物的春季高峰还是非常显著的。与众不同的是柘林湾浮游植物数量在夏秋高温季节不降反升,并在 7 月份达到全年最高峰的 1.09 $\times 10^6$  cells/L(月平均值)。水化调查数据<sup>[9]</sup>显示,入春以后,随着浮游植物数量的增加,柘林湾氮、磷含量随之下降,致使无机氮(DIN)在 7 月份处于全年低谷水平,但仍维持在 10 $\mu\text{mol/L}$  以上(月平均值)。无机磷(DIP)含量在 5 月份降至全年最低水平的 0.72 $\mu\text{mol/L}$ (月平均值)后,即一路回升至 12 月份全年最高峰的 3.38 $\mu\text{mol/L}$ (平均值)。7 月份,由于浮游植物的大量繁殖,无机磷含量虽有所下降,但仍维持在 1 $\mu\text{mol/L}$ (平均值)以上的较高水平。从无机氮 10 $\mu\text{mol/L}$  和无机磷 1 $\mu\text{mol/L}$  的绝对值来看,

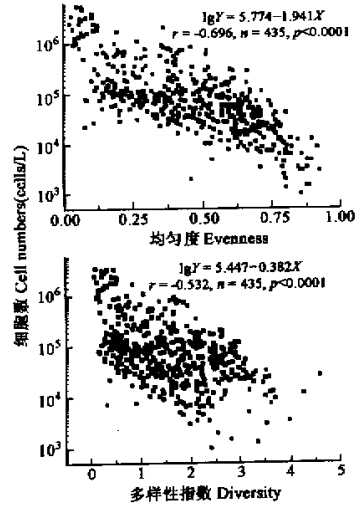


图 13 调查海区中肋骨条藻种群细胞数与浮游植物群落多样性指数及均匀度的相关关系

Fig. 13 Correlation between *Skeletonema costatum* cell number and diversity, evenness of phytoplankton in the investigated area



柘林湾夏秋高温季节的营养盐供应仍比较充分,加上高温季节营养盐循环速率必然相对加快,对浮游植物生长与繁殖的限制作用不大<sup>[16,17]</sup>。相比之下,这一时期水温的上升可能对浮游植物数量增加更具主导作用<sup>[10,18]</sup>。

3.2 柘林湾浮游植物群落结构的评价

柘林湾浮游植物群落完全是一个由硅藻为主导型的浮游植物群落,在 153 种浮游植物中甲藻虽然占据 36 种之多,但其数量的年平均值只占浮游植物总细胞数的 0.78%。在硅藻中,又以中肋骨条藻为全年优势种,其数量在浮游植物年平均总细胞数百分比中所占的比例竟高达 58.7%。也就是说,如果不考虑细胞的大小,中肋骨条藻对柘林湾整个浮游植物群落数量的贡献比其它 152 种的总和还大。为此,柘林湾浮游植物群落数量的时空变动在很大程度上取决于中肋骨条藻的种群动态(图 12)。

表 2 柘林湾浮游植物年平均总量、多样性指数及均匀度与其它海域的比较

Table 2 Comparison of total number, diversity and evenness of phytoplankton between Zhelin Bay and other sea areas						
海域 Sea areas	时间 Time	浮游植物总量 Phytoplankton total number ( $\times 10^4$ cells/L)	多样性指数 $H'$ Diversity	均匀度 $J$ Evenness	文献 Reference	
大嵛山岛 <sup>①</sup>	1990-051991-02	0.089	3.57	0.53	林金美,	199[27]
东山湾 <sup>②</sup>	1988-051989-02	0.999	—	—	林金美,	199[28]
同安湾 <sup>③</sup>	1991-011991-12	3.91	2.37	0.51	杜庆红,	199[14]
马鉴湾 <sup>④</sup>	1993-081994-05	115	0.78	0.28	杨清良等,	199[29]
湄洲湾 <sup>⑤</sup>	1996-051997-01	0.188	2.86	0.55	李延风,	199[15]
舟山群岛 <sup>⑥</sup>	1990-051990-10	5.07	—	—	朱根海等,	200[30]
Kuwait coast	1994-071995-04	1.73	3.07	0.89	Bu-Olayan 等,	200[30]
柘林湾 <sup>⑦</sup>	2000-052001-05	35.95	1.91	0.47	本文 this paper	

①Dayushan island ②Dongshan bay ③Tongan bay ④Majian bay ⑤Meizhuo bay ⑥Zhuoshan islands ⑦Zhelin bay

为什么中肋骨条藻在柘林湾浮游植物群落中的优势度会如此之大?这首先与柘林湾营养盐的结构有关。水化数据<sup>[9]</sup>显示,柘林湾是一个各项营养盐含量全面超标的海湾,按 Justic<sup>[19]</sup> 和 Dortch 等<sup>[20]</sup>的原则进行柘林湾浮游植物受控于单一营养盐限制因子出现率的分析结果是氮 41.75%,磷 22.9%,硅 2.36%<sup>[9]</sup>,其中以硅酸盐的含量最为丰富。而丰富的硅酸盐对中肋骨条藻的生长与繁殖具有明显的促进作用<sup>[21]</sup>。由此可以看出,硅藻,尤其是中肋骨条藻,在柘林湾具有比甲藻等其它营养上不需硅的藻类更为优越的生长竞争优势。其次,中肋骨条藻属于广温广盐种<sup>[22]</sup>,很适合在亚热带内湾生长<sup>[2123]</sup>,因为低盐度对中肋骨条藻的生长有促进作用<sup>[24]</sup>,其最适盐度范围为 20‰30‰<sup>[25]</sup>,而柘林湾各调查站位盐度年均值正好落在 19.6‰29.6‰之间(图 2)。然而最重要的可能是中肋骨条藻具有很强的光适应生理特征,光强度的衰减对其影响相对较小<sup>[26]</sup>,使其在透光率相对较低的近岸内湾海域更具有生长竞争优势<sup>[21]</sup>。

以往调查资料(表 2)表明,浮游植物群落丰度越大,则多样性指数和均匀度就越小。在表中列出的 8 个海湾当中,柘林湾浮游植物群落的密度为  $3.6 \times 10^5$  cells/L,仅次于厦门海域的马鉴湾,其群落多样性指数和均匀度为倒数第二,马鉴湾则为倒数第一。马鉴湾实际上是一个受海堤阻隔的封闭性很强的浅水内湾,其海水增殖养殖密度也很大,海域富营养化程度极高<sup>[29]</sup>。在 1993 年 8 月至 1994 年 5 月调查期间<sup>[29]</sup>,马鉴湾的菱形藻在浮游植物群落总个体数中所占的比例平均高达 84%,比本调查中肋骨条藻的 58.7% 还高。这表明,近岸海湾富营养化程度越高,必然使某些少数种类的生长竞争优势得到更充分的体现,浮游植物群落丰度随之上升,生物多样性与均匀度则相应下降,如得不到有效控制,其终极现象必然是赤潮的发生<sup>[31]</sup>。马鉴湾在 1986 年 5~6 月份和 1987 年 3 月份就发生过地中海指管藻、裸甲藻和聚生角毛藻赤潮<sup>[32]</sup>。实际上 2000 年 7 月 23 日的现场调查数据表明,湾外 S<sub>8</sub> 站中肋骨条藻的密度高达  $5.5 \times 10^6$  cells/L,其占浮游植物总细胞数的 99.1%,从群落的构成与密度来看,这都应看成是一次赤潮,只不过是规模较小,而且中肋骨条藻非有毒赤潮藻而已。

综上所述,粤东柘林湾因大规模增殖养殖渔业和高强度的排污排废引起的富营养化已在很大程度改变

了该湾浮游植物的群落结构及时空分布,使浮游植物群落的生物多样性与均匀度明显下降,中肋骨条藻等少数种类则大量增殖。硅藻赤潮,尤其是中肋骨条藻赤潮的发生机会明显增多,但发生甲藻赤潮的可能性较小。

### 参考文献

- [ 1 ] Huang W K( 黄文魁 ). Discussion of the development of the fish culture in Shantou from the resource manages of Japan. In :Liu J T( 刘锦庭 )ed. *The exploitation and utilization of ocean resources in Shantou* ( in Chinese ). Shantou : Science Press , 1998. 183190.
- [ 2 ] Huang C J( 黄长江 ), Dong Q X( 董巧香 ), Zheng L( 郑磊 ). Taxonomic and ecological studies on a large scale *Phaeocystis pouchetii* bloom in the southeast coast of China during late 1997. *Oceanologia et Limnologia Sinica*( in Chinese )( 海洋与湖沼 ), 1999 , 30( 6 ) : 581590.
- [ 3 ] He J W( 何家苑 ), Shi Z X( 施之新 ), Zhang Y H( 张银华 ), *et al.* Morphological characteristics and toxins of *Phaeocystis cf. pouchetii* ( Prymnesiophyceae ). *Oceanologia et Limnologia Sinica*( in Chinese )( 海洋与湖沼 ), 1999 , 30( 2 ) : 172179.
- [ 4 ] GB/T. *The specification for oceanographic survey*( in Chinese ). Beijing : Standard Press , 1992.
- [ 5 ] Lund J W G , Kipling C and LeCren E D. The inverted microscope method of estimating algal numbers and the statistical basis of estimations by counting. *Hydrobiological* , 1958 , 11 : 143170.
- [ 6 ] Shannon E E , Weaver W. The mathematical theory of communication. Urbana , Chicago , Ill. London : Univ. Illinois Press , 1949. 125.
- [ 7 ] Pielou E C. An introduction to mathematical ecology. New York : Wiley- Interscience , 1969. 1286.
- [ 8 ] Bu-Olayan A H , Al-Hassan R , Thomas B V , *et al.* Impact of trace metals and nutrients levels on phytoplankton from the Kuwait coast. *Environment . International* . 2001 , 26 : 199203.
- [ 9 ] Zhou K( 周凯 ), Huang C J( 黄长江 ), Jiang S( 姜胜 ), *et al.* Annual investigation of distribution of nutrient in Zhelin Bay( 20002001 ). *Acta Ecological Sinica*( in Chinese )( 生态学报 ), 2002 , 22.
- [ 10 ] Agawin N S , Duarte C M and Agustí S. Nutrient and temperature control of the contribution of picoplankton to phytoplankton biomass and production. *Limnol . Oceanogr.* 2000 , 45( 3 ) : 591600.
- [ 11 ] ICS. *Sea water quality standard of China*( in Chinese ). 1997 , ( GB3097-1997 ).
- [ 12 ] Nakamura Y and Kerciku F. Effects of filter-feeding bivalves on the distribution of water quality and nutrient cycling in a eutrophic coastal lagoon. *J. of Mari. Syst.* , 2000 , 26 : 209221.
- [ 13 ] Wu Y L( 吴玉霖 ), Zhou C X( 周成旭 ), Zhang Y S( 张永山 ), *et al.* Evolution and causes of formation of *Gymnodinium sanguineum* bloom in Yantai Sishili Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica* ( in Chinese )( 海洋与湖沼 ), 2001 , 32( 2 ) : 159167.
- [ 14 ] Du Q H( 杜庆红 ). A primary study on dynamics of phytoplankton in Tongan Bay. *Marine Science Bulletin*( in Chinese ) ( 海洋通报 ), 1996 , 15( 6 ) : 2026.
- [ 15 ] Li Y F( 李延凤 ). Study on the relationship between the community structural characteristics and the water pollution in Meizhou Bay. *Rural Eco-Environment*( in Chinese )( 农村生态环境 ), 1999 , 15( 4 ) : 2831.
- [ 16 ] Goldman J C and Glibert P M. Kinetics of inorganic nitrogen uptake by phytoplankton. In : Carpenter E J and Capone D G , eds. *Nitrogen in Marine Environment* . Academic Press , New York , 1983. 233274.
- [ 17 ] Perry M J and Eppley R W. Phosphate uptake by phytoplankton in the central North Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* , 1981 , 28 : 3949.
- [ 18 ] Lehman P W. The influence of climate on phytoplankton community biomass in San Francisco Bay Estuary. *Limnol . Oceanogr.* , 2000 , 45( 3 ) : 580590.
- [ 19 ] Justic D , Rabalais N N , Turner R E. Stoichiometric nutrient balance and origin of coastal eutrophication. *Mar. Pollu. Bull.* , 1995 , 30( 1 ) : 4146.
- [ 20 ] Dortch Q and Whitedge T E. Does nitrogen or silicon limit phytoplankton production in the Mississippi River plume and nearby regions ? *Cont. Shelf Res.* , 1992 , 12 : 12931309.

- [ 21 ] Lin G M( 林更铭 ), Yang Q L( 杨清良 ), Lin J M( 林金美 ). Relationship between phytoplankton and environment factors in waters around Xiamen island. *Marine Science Bulletin* ( in Chinese )( 海洋通报 ), 1993 , 12 ( 6 ): 4045.
- [ 22 ] Jin D X( 金德祥 ), Chen J H( 陈金环 ), Huang K Q( 黄凯歌 ). *Marine Phytoplank Diatoms of China*( in Chinese ). Shanghai Science Press , 1960. 1230.
- [ 23 ] Jin D X( 金德祥 ). *Marine diatom*( in Chinese ). Xianmen : Xianmen University Press , 1990. 1239.
- [ 24 ] Yamamoto T and Tschia H. Physiological responses of Si-limited *Skeletonema costatum* to silicate supply with salinity decrease. *Bull. of Plankton Soci.* , 1995 , 42 ( 1 ): 117.
- [ 25 ] Huo W Y( 霍文毅 ), Yu Z M( 俞志明 ), Zou J Z( 邹景忠 ), et al. Outbreak of *Skeletonema costatum* red tide and its relations to environmental factors in Jiaozhou Bay. *Oceanologia et Limnologia Sinica*( in Chinese )( 海洋与湖沼 ), 2001 , 32 ( 3 ): 311318.
- [ 26 ] Anning T , Macintyre H L , Pratt S M , et al. , Photoacclimation in the marine diatom *Skeletonema costatum* . *Limnol. Oceanogr.* , 2000 , 45 ( 8 ): 18071817.
- [ 27 ] Lin J M( 林金美 ). Phytoplankton ecology in waters around Daiyushan island. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*( in Chinese )( 台湾海峡 ), 1995 , 14 ( 1 ): 5761.
- [ 28 ] Lin J M( 林金美 ). Distribution of phytoplankton in Dongshan Bay , Fujian. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* ( in Chinese )( 台湾海峡 ), 1996 , 15 ( 4 ): 357361.
- [ 29 ] Yang Q L( 杨清良 ), Chen Q H( 陈其焕 ), Lin J M( 林金美 ), et al. Ecological characteristics of phytoplankton community from eutrophic waters in the Maluan Bay. *Acta Oceanologica Sinica* ( in Chinese )( 海洋学报 ), 1998 , 20 ( 1 ): 101112.
- [ 30 ] Zhu G H( 朱根海 ), Yamamoto T( 山本民次 ), Ohtani( 大谷修司 ), et al. A study on nano- and microphytoplankton and causative species of red tide in adjacent waters off the Zhoushan islands , Zhejiang. *Donghai Marine Science*( in Chinese )( 东海海洋 ), 2000 , 18 ( 1 ): 2836.
- [ 31 ] Huang C J( 黄长江 ). Study and view of rid tide. *Chinese Bulletin of Life Sciences*( in Chinese )( 生命科学 ), 1999 , 11 : 115118.
- [ 32 ] Du Q( 杜琦 ). Investigations on red tide in the west area of Xiamen Sea. *Acta Jinan University*( in Chinese )( 暨南大学学报 )( Red tide reseach ), 1989 , 5767.