

# 厦门港浮游植物磷胁迫状况研究

欧林坚<sup>1</sup>, 黄邦钦<sup>2</sup>, 吕颂辉<sup>1</sup>, 齐雨藻<sup>1</sup>

(1. 暨南大学 赤潮与水环境研究中心, 广东 广州 510632 2 厦门大学 近海海洋环境国家重点实验室, 环境科学研究中心, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 通过检测碱性磷酸酶活性 (APA) 及相关理化因子, 研究 2002~2004 年间, 厦门港浮游植物的 P 生理状态的变化。结果表明, 厦门港总 APA 变化范围 0.92~9.50 nmol/(L·h), 在不同的季节及区域, 浮游植物遭受不同程度的 P 胁迫。厦门外港的年平均 APA 高于西港和浔江港, 表明浮游植物遭受的 P 胁迫程度较深。在厦门港赤潮爆发时, P 将成为浮游植物进一步生长繁殖的限制因子。

**关键词:** P 胁迫; 厦门港; 浮游植物

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2010)05-0657-05

## Study on stress status of P in phytoplankton in Xiamen Harbor

OU Lin-jian<sup>1</sup>, HUANG Bang-qin<sup>2</sup>, LÜ Song-hui<sup>1</sup>, QI Yu-ao<sup>1</sup>

(1. Research Center for Harmful Algae and Aquatic Environment, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. State Key Laboratory of Marine Environmental Science, Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract** During 2002~2004, the bulk alkaline phosphatase activity (APA) and other environmental parameters in the Xiamen Harbor were analyzed to understand the spatial and seasonal variations of phosphorus (P) status in phytoplankton in this sea area. The results showed that the range of bulk APA varied between 0.92~9.50 nmol/(L·h) in the Xiamen Harbor. Phytoplankton was different degrees of P stress in different seasons and zones. The annual average APA in the Outer Xiamen Harbor was higher than the Western Xiamen Harbor or the Xunjiang Harbor which meant that phytoplankton in the Outer Xiamen Harbor was more severe P stress. P is considered to be the limiting nutrient once a algal blooms occur in the Xiamen Harbor.

**Key words** phosphorus stress; Xiamen Harbor; phytoplankton

厦门港濒临台湾海峡, 由浔江港、西港和外港三个部分组成。浔江港和外港常年水体交换充分, 西港由于高集海堤阻断了其与浔江的联络, 成为了一个半封闭的港湾<sup>[1]</sup>。随着 20 世纪 80 年代后期工农业的迅猛发展, 厦门西港的大部分水域, 尤其是北部水域的富营养化程度非常严重, 赤潮频发<sup>[2-4]</sup>。在 1986 年的 5~6 月及 1987 年的 3~5 月, 短短 1 a 间就爆发了 5 次赤潮<sup>[5]</sup>, 西港的北部水域也成为名副其实的赤潮多发区<sup>[6]</sup>。而富营养化, 尤其是富 N 的与日俱增, 是造成厦门港赤潮频发的根本原因<sup>[1,2]</sup>。陈其浹等认为, 相较于溶解态无机氮 (DN), 厦门西港的溶解态无机磷 (DIP) 的含量较低, 年平均 N/P 值约为 30<sup>[7]</sup>。陈砚对厦门港赤潮发生期间水体的营养

状况进行研究, 发现在赤潮高峰期, PO<sub>4</sub>-P 的耗尽限制了浮游植物的进一步生长, P 是厦门西港浮游植物生长的潜在营养限制因子<sup>[8]</sup>。

碱性磷酸酶 (AP) 是浮游植物在海区 P 胁迫的情况下诱导表达的一种胞外酶<sup>[9]</sup>。浮游植物通过 AP 作用, 可以水解水体中的溶解有机磷 (DOP) 并释放 PO<sub>4</sub>-P 供其回收利用, AP 已被广泛应用于指示海区的 P 限制或胁迫水平<sup>[10,11]</sup>。本研究通过季度采样, 检测厦门港海区碱性磷酸酶活性 (APA) 的变化, 结合相关的理化数据, 分析在不同的季节厦门港浮游植物的 P 生理状态的变化, 比较港内不同区域浮游植物 P 胁迫状况的差异。

收稿日期: 2008-11-10 修订日期: 2009-01-13

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40806058 U0733006); 广东省自然科学基金项目 (7300662)

作者简介: 欧林坚 (1979-), 女, 福建闽清人, 讲师, 博士, 主要从事海洋微型生物生理生态研究。

### 1 材料与方法

#### 1.1 采样测站的布设与采样时间

调查范围涉及厦门港的三块区域,着重对厦门西港进行调查。其中,西港测站包括位于马銮湾外的 17号测站、宝珠屿附近的 18号测站、集美大堤附近的 19号测站、海沧大桥附近的 21号测站、鼓浪屿西侧的 24号测站;外港测站包括有九龙江出海口的 26号测站、胡里山外侧的 27号测站、同安湾入口的 30号测站、前埔会展中心外侧的 31号测站;浔江港测站则包括位于同安湾养殖区域的 28号和 29号测站(图 1示)。

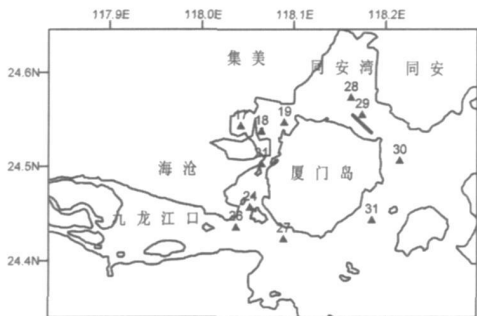


图 1 厦门港采样测站布设

Fig 1 Sample stations in Xiamen Harbor

为了研究厦门港海区浮游植物 P限制或胁迫的季节性变化,于 2002年 12月至 2004年 9月共开展了 7个航次的调查,具体调查时间为:2002年 12月 18~19日,2003年 3月 13~14日,2003年 8月 10~12日,2003年 12月 5日,2004年 2月 22日,2004年 5月 18~20日,2004年 9月 14日。其中,2003年的 12月及 2004年的 2月,仅对厦

门西港进行了调查。

#### 1.2 调查项目及方法

水温、盐度和溶解氧等参数由 YSI现场检测。DIP、NO<sub>3</sub>-N、NO<sub>2</sub>-N、NH<sub>4</sub>-N 及 Chl a等项目按照《海洋调查规范》测定<sup>[12]</sup>。DIN=NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N+NH<sub>4</sub>-N。

群落水平 APA 的测定采用 Ou 等的方法<sup>[11]</sup>。2002年 12月至 2003年 8月期间,分离游离态 (< 0.22 μm)(用 APA<sub>free</sub>表示)与颗粒态 (> 0.22 μm)两种粒径研究海水中的 APA。2003年 12月始,又进一步将颗粒态 APA 划分为细菌态 (0.22~3 μm)(用 APA<sub>bac</sub>表示)及浮游植物态 (>3 μm)(用 APA<sub>phy</sub>表示)两种粒径。

#### 1.3 数据分析处理

在进行数据分析时,将厦门港分为三块区域,分别取三港各测站参数的平均值代表三港水平。采用 Tukey test 检验研究海区环境因子及 APA 分布的差异性。采用线性回归分析 APA 与各环境因子的相关性。所有的检验均在统计分析软件 SPSS 13.0下完成。

### 2 结果

#### 2.1 厦门港不同季节理化环境因子的变化

图 2给出厦门港四季各测站温度和盐度的变化。厦门港温度季节性变化显著 ( $p < 0.01$  ANOVA),夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。春、夏、秋和冬季平均温度分别为 (24.80 ± 0.66)°C、(28.33 ± 0.50)°C、(18.54 ± 0.35)°C 和 (15.86 ± 1.19)°C。盐度变化范围 21.30~33.89 季节性变化较小 ( $p > 0.05$ ),其数值大小主要取决于测站所在的地理位置。

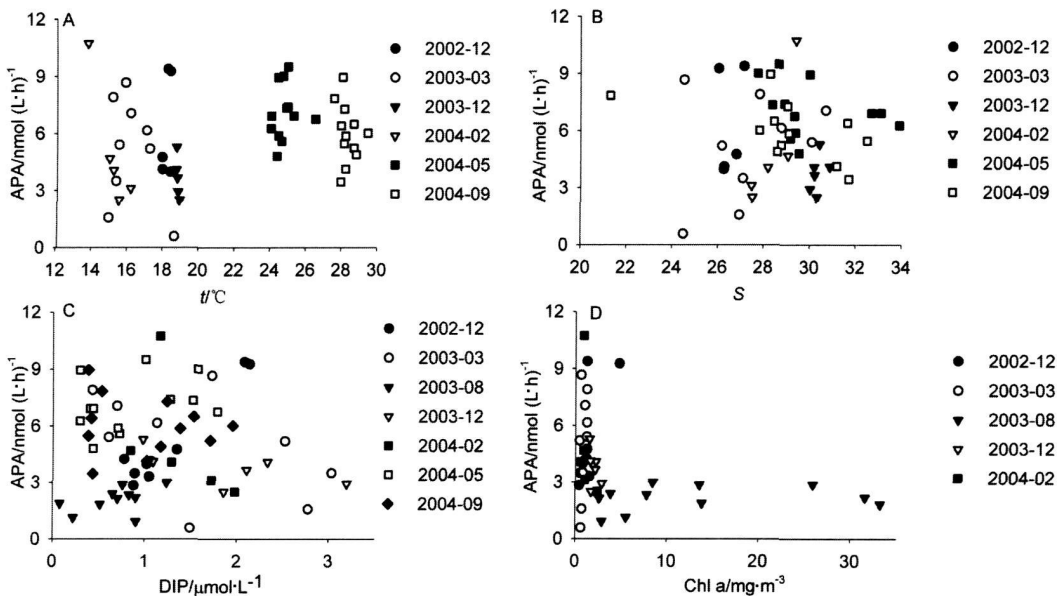


图 2 厦门港碱性磷酸酶活性随 (A)温度, (B)盐度, (C)溶解无机磷浓度及 (D)叶绿素含量的变化

Fig 2 Variation of alkaline phosphatase activity (APA) along (A) temperature (B) salinity (C) dissolved inorganic phosphorus DIP and (D) Chl a in Xiamen Harbor

2002 年 12 月至 2004 年 9 月, 厦门西港 DIP 和 DN 变化范围分别为  $0.4 \sim 3.2 \text{ mol/L}$  和  $16.1 \sim 61.1 \text{ mol/L}$ , 其年平均含量分别为  $(1.5 \pm 1.0) \mu\text{mol/L}$  和  $(40.8 \pm 12.4) \mu\text{mol/L}$  (图 2C)。在绝大多数季节, 西港各测站营养盐浓度都高于外港和浔江港。西港的年平均 DIP 浓度显著高于外港 ( $p < 0.01$ ), 年平均 DN 浓度显著高于外港和浔江港 (分别  $p < 0.01, < 0.05$ )。仅在 2004 年的 2 月, 厦门外港和浔江港的 DIP 含量高于西港。外港与浔江港的营养盐状况相比较, 浔江港的 DIP 浓度 [年平均值为  $(1.1 \pm 0.6) \text{ mol/L}$ ] 略高于外港 [年平均值为  $(0.9 \pm 0.5) \text{ mol/L}$ ] ( $p > 0.05$ ), 而外港的 DN 浓度 [年平均值为  $(32.0 \pm 17.9) \text{ mol/L}$ ] 略高于浔江港 [年平均值为  $(25.9 \pm 9.1) \text{ mol/L}$ ] ( $p > 0.05$ )。外港是受人类活动干扰最小的海区, 其营养盐含量在夏季 (8、9 月份) 相对较低, 而在冬季 (2、3 月份) 相对较高。整个厦门港海区一年四季的 N/P 值都高于 20 (2004 年 2 月浔江港除外)。在 2004 年的夏季航次, 外港海水中的 N/P 值甚至高达 86。与传统经典的 Redfield 比值  $N/P = 16:1$  相较, 浔江港内的 N、P 营养盐含量相对较为均衡, N/P 值年平均为  $25 \pm 9$ 。

除了在冬季 (2、3 月份) 厦门外港和浔江港的 Chla 含

量略高于西港外, 在其他的季节厦门西港的生物量均高于外港和西港。厦门西港、外港和浔江港的年平均 Chla 分别为  $5.53 \text{ mg/m}^3$ 、 $3.71 \text{ mg/m}^3$  和  $1.86 \text{ mg/m}^3$ 。在 2003 年的 8 月份, 西港发生赤潮, 叶绿素值高达  $21.44 \text{ mg/m}^3$  (图 2D)。

### 2.2 厦门港 APA 变化

厦门外港全年总 APA 变化  $1.14 \sim 9.50 \text{ nmol/(L} \cdot \text{h)}$ , 年平均 APA [ $(5.64 \pm 2.54) \text{ nmol/(L} \cdot \text{h)}$ ] 较西港 [ $(4.82 \pm 2.42) \text{ nmol/(L} \cdot \text{h)}$ ] 与浔江港 [ $(4.08 \pm 2.13) \text{ nmol/(L} \cdot \text{h)}$ ] 高, 但并不存在显著性差异 ( $p > 0.05$ ) (图 3A)。在 2004 年的 5 月与 9 月, 整个厦门港的 APA 较高。图 3B 显示的是厦门港不同季节 APA<sub>fre</sub> 占总 APA 的百分比。不同海区不同季节, APA<sub>fre</sub> 对总 APA 的贡献存在显著差异。APA<sub>fre</sub> 在厦门港的不同季节都占有重要的比例, 从 35% ~ 99% 不等。2003 年 3 月, 厦门港三个海区的 APA 近乎都由 APA<sub>fre</sub> 构成。2003 年 12 月份始, 又将颗粒态 APA 区分为细菌态和浮游植物态两个粒径。结果表明, 2003 年 12 月及 2004 年 9 月, APA<sub>phy</sub> 对海区总 APA 贡献较大, 在 2004 年 5 月 APA<sub>bac</sub> 占有较大的比例 (表 1)。

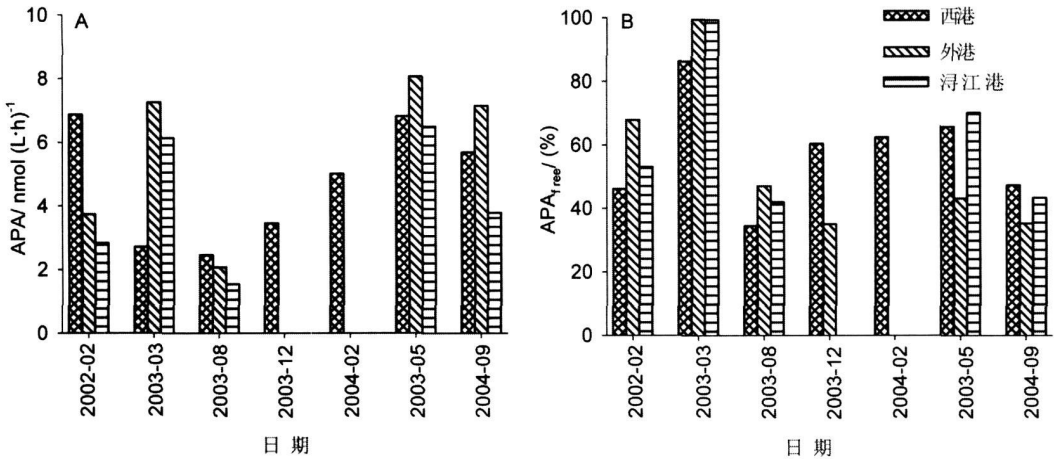


图 3 厦门港不同季节碱性磷酸酶活性及其游离态粒径变化

Fig. 3 Seasonal variation of bulk alkaline phosphatase activity (APA) and free size fractions (APA<sub>fre</sub>) in different areas of Xiamen Harbor

注: 2003 年 12 月及 2004 年 2 月未检测外港及浔江港的 APA

表 1 厦门港细菌态及浮游植物态碱性磷酸酶活性粒径组成

Tab. 1 Contribution of bacteria size alkaline phosphatase activity (APA<sub>bac</sub>) and phytoplankton size alkaline phosphatase activity (APA<sub>phy</sub>) to bulk total APA in Xiamen Harbor

时间	西港		外港		浔江港	
	APA <sub>bac</sub> / (%)	APA <sub>phy</sub> / (%)	APA <sub>bac</sub> / (%)	APA <sub>phy</sub> / (%)	APA <sub>bac</sub> / (%)	APA <sub>phy</sub> / (%)
2003-12	3 ± 3	37 ± 15	11	54	-	-
2004-02	22 ± 14	16 ± 17	-	-	-	-
2004-05	29 ± 6	5 ± 5	31 ± 21	4 ± 5	30 ± 17	0
2004-09	19 ± 8	34 ± 18	22 ± 11	25 ± 25	14 ± 19	43 ± 4

注: “-”表示未检测

总体而言,厦门港 APA 受海区 N/P 值变化的显著影响 ( $p < 0.05$ )。APA<sub>phy</sub> 随海区 DN 浓度的升高而升高 ( $p = 0.05$ )。对厦门港不同季节的 APA 进行分析,发现在夏季(2003 年 8 月和 2004 年 9 月),APA 随海区的 DN 浓度、N/P 值的升高而升高(分别  $p < 0.01$ ,  $< 0.05$ ),而在冬季(2002 年 12 月与 2003 年 12 月),APA<sub>fac</sub> 大小与盐度呈负相关关系 ( $p = 0.01$ )。采用多元线性回归分析,变量(DIP + DN + N/P)在夏季时能够解释总 APA 56% 的变化 ( $p < 0.01$ )。在厦门西港,温度对 APA<sub>bac</sub> 的大小及其占总 APA 比例的影响显著 ( $p < 0.01$ ),温度升高,APA<sub>bac</sub> 数值及其比例均下降;而盐度对 APA<sub>phy</sub> 所占比例影响较为显著 ( $p < 0.05$ ),盐度升高,APA<sub>phy</sub> 所占比例下降。APA<sub>bac</sub> 及其比例随海水中 DIP 和 DN 浓度的升高而降低 ( $p < 0.05$ )。

## 3 讨论

### 3.1 厦门港的富营养化水平

近 20 年来,厦门港尤其是西港的富营养化程度日益严重<sup>[2]</sup>。20 世纪 90 年代,浔江港大面积渔业网箱放养的开展导致浔江港的水质不断恶化<sup>[3]</sup>。本研究表明,在厦门港的三块区域中,外港的营养盐水平相对较低,但仍是显著高于陈其焕等检测厦门西港的营养盐水平(DN 年平均为  $15.0 \mu\text{mol/L}$ , DIP 年平均为  $0.5 \mu\text{mol/L}$ )<sup>[7]</sup>,也远远的超出日本水产厅 1972 年规定的内海海域赤潮连续长期发生的 N、P 警戒线(DN 为  $7 \mu\text{mol/L}$ , DIP 为  $0.45 \mu\text{mol/L}$ )<sup>[2]</sup>。本研究表明,近年来厦门港的富营养化程度加剧了,且富营养化的面积已由厦门西港,扩散至浔江港和外港。富营养化的加剧也导致厦门港赤潮的频繁爆发。在 2002 至 2004 年的调查航次中,多次于西港与浔江港发现大小规模不等的赤潮。

厦门港海区的 N、P 营养盐浓度表现出季节性变化的趋势:冬季较高,而在夏季明显降低。厦门港全年的 N/P 值都高于 20(2004 年冬季浔江港除外)。根据 Beardall 等<sup>[13]</sup>提出的检测海区 N、P 限制的标准:当 N/P 值大于 30 时,海区存在潜在的 P 限制。而外港和西港大部分季节的 N/P 值高于 30,2003 年夏季外港的 N/P 值甚至高达 86。相对于 N 营养盐,厦门港 P 的含量可能偏低,从而成为浮游植物生长的潜在营养限制因子。在厦门港赤潮爆发时,P 必将成为浮游植物进一步生长繁殖的限制因子。

### 3.2 厦门港 APA 状况

厦门外港的年平均 APA 高于西港和浔江港,表明外港浮游生物遭受的 P 胁迫程度较深,可能与该海区相对较低的 DIP 水平有关。2004 年,外港 APA 水平较 2003 年有所升高,表明海区的 P 胁迫状况升级。

游离态 AP 既包括细菌或浮游植物通过主动方式将细胞表面的磷酸酶释放到水体的部分,也包括了浮游植物、细菌等在被捕食的过程中被动释放到水体中的部分<sup>[10]</sup>。游离态 AP 在水体中能长时间的保持生理活性(2

d 至 40 d 不等),Li 等<sup>[14]</sup>提出根据海区不同粒径 APA 的分布判断海区磷历史状态的假说。从本研究结果看来,APA<sub>fac</sub> 在厦门港始终占据着重要的组分。2003 年 3 月,厦门外港和浔江港的总 APA 分别达到  $7.25 \text{ nmol}/(\text{L} \cdot \text{h})$  和  $6.14 \text{ nmol}/(\text{L} \cdot \text{h})$ ,而两海区 APA<sub>fac</sub> 占总 APA 的比例都高达 99%,表明这两个海区浮游生物近期内发生过 P 胁迫的状况,并刚从这个状况中解除出来。2004 年的 5 月和 9 月,厦门港三个海区的 APA 升高,且 APA<sub>fac</sub> 和颗粒态 APA 各占据重要的比例,表明厦门港浮游生物的 P 胁迫状况已有一段时间并仍在进行中。

海水中的 AP 来源包括细菌、浮游植物及浮游动物<sup>[10]</sup>。细菌或浮游植物何者是海区中有机磷再矿化的主要贡献者,长期以来争论已久<sup>[15]</sup>。本研究表明,在不同的海区不同的季节,细菌和浮游植物对海区 APA 的贡献不同。2004 年的春季(5 月),厦门港内 APA<sub>lac</sub> 对总 APA 的贡献较大。2004 年的夏季(9 月),西港和浔江港 APA<sub>phy</sub> 占据了颗粒态 APA 的主要部分,而外港海区浮游植物和细菌对 APA 的贡献相当。在厦门西港,APA<sub>lac</sub> 及其比重随海水中 DIP 的升高而降低,该结果与学者们对藻菌竞争 P 营养盐的看法是一致的<sup>[15-16]</sup>。这些学者认为细菌在贫 P 的环境下较有竞争优势,而浮游植物在富 P 的情况下较有竞争优势。

### 3.3 厦门港 APA 的调控机理初探

近年来,随着人们对海区中 DOP 重要性的进一步认识<sup>[17]</sup>,在海区中对水解 DOP 起关键性作用的 AP 也受到了重视<sup>[10,11,14]</sup>。Hoppe 提出了海区中 AP 的调控机制假说<sup>[18]</sup>,诸多因素,如海区  $\text{PO}_4\text{-P}$  浓度、细胞内部的 N/P 比值、不同个体的 P 需求、海区中 DOP 的可利用性及抗性、海区中 DOP 的结构组成等,都会影响 APA 的大小。在本次研究中,厦门港的 APA 与众多理化因子并不表现出明显的相关性。APA 的高值有时甚至出现于  $\text{PO}_4\text{-P}$  的高值区。该结果的可能解释是 AP 较长的活性周期反映的是该海区前一段时间的 P 限制或胁迫状态。而厦门港本身是一个受人为干扰较为严重的区域,检测的营养盐等环境理化参数反映的是海区检测当时的状态,两者存在时间上的偏差效应。且厦门港内不同测站间理化性质差别较大,调控 APA 大小因子的作用效力不同,从而导致厦门港 APA 与各理化因子间表现出较为混乱、复杂的关系。

### 参考文献:

- [1] 高山,陈伟琪,陈祖峰. 厦门海域氮、磷的主要来源分析及其控制措施 [J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2006 45: 286-291
- [2] 齐雨藻. 中国沿海赤潮 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 蔡励勋. 厦门同安湾海域赤潮期间叶绿素变化的若干典型特征 [J]. 海洋环境科学, 27(4): 331-334.
- [4] 胡忠,谢晴宜,曹晓星,等. 厦门西海域综合整治后表层沉积物污染状况 [J]. 海洋环境科学, 2003 25(4): 4-6
- [5] 张水浸. 厦门港 *Eucampia zoodiacus* 赤潮的形成过程及其成

- 因分析 [A]. 厦门港赤潮调查研究论文集 [C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 19-28.
- [6] 杨清良, 林更铭. 厦门海域浮游植物夏季赤潮期间分布变异的多元分析 [J]. 生态学报, 2007, 27(2): 465-476
- [7] 陈其焕, 曾昭文, 张水浸, 等. 厦门港 1987 年赤潮调查报告 [A]. 厦门港赤潮调查研究论文集 [C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 1-18
- [8] 陈 砚. 厦门西港赤潮发生期间水体的营养状态 [A]. 厦门港赤潮调查研究论文集 [C]. 北京: 海洋出版社, 1993. 92-97.
- [9] HEALEY F P, HENDZEL L L. Fluorimetric measurement of alkaline phosphatase activity in algae [J]. *Freshwat Biol* 1979, 9: 429-439
- [10] CEMBELLA A D, ANTIAN J, HARRISON P J. The utilization of inorganic and organic phosphorous compounds as nutrients by eukaryotic microalgae: A multidisciplinary perspective Part I [J]. *CRC Crit Rev Microbiol* 1984, 10(4): 317-391
- [11] OUL J, HUANG B Q, LIN L Z, et al. Phosphorus stress of phytoplankton in Taiwan Strait using bulk and single-cell alkaline phosphatase assay [J]. *Mar Ecol Prog Ser* 2006, 327: 95-106.
- [12] GB/T 12763. 4-1998, 海洋调查规范 [S].
- [13] BEARDALL J, BERMAN T, HERAUD P, et al. A comparison of methods for detection of phosphate limitation in microalgae [J]. *Aquat Sci* 2001, 63: 107-121
- [14] LIH, VELDHUISM JW, POST A F. Alkaline phosphatase activities among planktonic communities in the northern Red Sea [J]. *Mar Ecol Prog Ser* 1998, 173: 107-115
- [15] COTNER J B, JR, WETZEL R G. Uptake of dissolved inorganic and organic phosphorus compounds by phytoplankton and bacterioplankton [J]. *Limnol Oceanogr* 1992, 37(2): 232-243
- [16] CAPELLAS M, AGUST S, DUARTE C M. Latitudinal variability in phosphate uptake in the Central Atlantic [J]. *Mar Ecol Prog Ser* 2000, 194: 283-294
- [17] KARLDM, YANAGIK. Partial characterization of the dissolved organic phosphorus pool in the oligotrophic North Pacific Ocean [J]. *Limnol Oceanogr* 1997, 42(6): 1398-1405
- [18] HOPPE H G. Phosphatase activity in the sea [J]. *Hydrobiologia* 2003, 493: 187-200

(上接第 644 页)

- [8] 刘芳文, 颜文, 王文质, 等. 珠江口沉积物重金属污染及其潜在生态危害评价 [J]. *海洋环境科学*, 2002, 21(3): 34-38
- [9] 刘芳文, 颜文, 黄小平, 等. 珠江口沉积物中重金属及其相态分布特征 [J]. *热带海洋学报*, 2003, 22(5): 16-24
- [10] 王增焕, 林钦, 李纯厚, 等. 珠江口表层沉积物铜铅锌镉的分布与评价 [J]. *环境科学研究*, 2004, 17(4): 5-9, 24
- [11] 彭晓彤, 周怀阳, 翁焕新, 等. 珠江口沉积柱中重金属 V, Ni 和 Co 的分布特征、迁移机制和污染评价 [J]. *浙江大学学报 (理学版)*, 2003, 30(1): 103-108
- [12] LIX D, WAIOW H, LIY S, et al. Heavy metal distribution in sediment profiles of the Pearl River Estuary, South China [J]. *Applied Geochemistry* 2000, 15: 567-581
- [13] ZHOU H Y, PENG X T, PAN J M. Distribution, source and enrichment of some chemical elements in sediments of the Pearl River Estuary, China [J]. *Continental Shelf Research* 2004, 24: 1857-1875.
- [14] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 1-501
- [15] 王立军, 张朝生. 珠江广州江段水体沉积物和悬浮物中 27 种元素的含量与形态分布特征 [J]. *应用基础与工程科学学报*, 1999, 7(1): 12-20
- [16] P C CM, LIX D, ZHANG G, et al. Over one hundred years of trace metal fluxes in the sediments of the Pearl River Estuary, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132: 157-172.
- [17] 吴自军, 周怀阳, 彭晓彤, 等. 甲烷厌氧氧化作用: 来自珠江口淇澳岛海岸带沉积物间隙水的地球化学证据 [J]. *科学通报*, 2006, 51(17): 2052-2059
- [18] 林瑞芬, 闵育顺, 卫克勤, 等. 珠江口沉积柱 210Pb 法年龄测定结果及其环境地球化学意义 [J]. *地球化学*, 1998, 27(5): 401-411
- [19] 蓝先洪. 珠江口现代沉积物中沉积磷酸盐的研究 [J]. *海洋与湖沼*, 1989, 20(5): 480-487.
- [20] 彭晓彤, 周怀阳, 叶瑛, 等. 珠江河口沉积物粒度特征及其对底层水动力环境的指示 [J]. *沉积学报*, 2004, 22(3): 487-493.
- [21] MULLER G. Schwermetalle in den sedimenten des Rheins-Verdunungen seit 1971 [J]. *Umschau Verlag* 1979, 79(24): 778-783