

大亚湾浮游植物群落结构变化及其对水温上升的响应

郝彦菊^{1,2,3}, 唐丹玲^{1,2,3*}

1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院南海海洋研究所, 广东 广州 510301;
3. 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 大亚湾核电站1994年建成运行。文章研究大亚湾长时期的生态和环境变化, 分析大亚湾浮游植物群落结构变化与环境变化, 特别是水温上升的相关性。研究显示, 网采浮游植物种类数目在1994年后减少了16种; 1994—2004年间, 网采浮游植物细胞相对密度以 $2.13 \times 10^7 \text{ m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 的速率下降, 而在1985—2004年间核电站建站的下降速率为 $2.85 \times 10^6 \text{ m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$; 与1982年和1994年相比, 1998年的浮游植物群落优势种中细胞个体相对较大的种的比重下降, 细胞个体相对较小的种的比重上升; 从1985年到2003年, 叶绿素a(Chl-a)质量浓度的上升速率为 $0.069 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$, 而1994年到2003年的上升速率加快, 为 $0.076 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{a}^{-1}$ 。与此同时, 大亚湾的水温在1994年后明显上升, 海水盐度、溶解氧(DO)、化学耗氧量(COD)、和营养盐在1994年后变化幅度也增大。研究结果揭示, 核电站热排放导致的水温上升是影响大亚湾浮游植物群落结构的主要因素。

关键词: 浮游植物; 群落结构; 叶绿素 a; 水温; 热排放; 大亚湾

中图分类号: X173 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-5906 (2010) 08-1794-07

海湾生态环境的退化与人类活动的加剧, 包括生活污水和工业废水的排放、养殖业的污染和富营养化有很大关系^[1-4]。近几年, 热污染越来越严重, 成为海湾生态系统的最主要影响因子之一^[5-6]。特别是位于海湾沿岸的发电厂, 其温排水会加剧受纳水体的层化现象, 改变受纳水体的水文条件, 继而影响藻类等水生生物的生长^[7-9]。

大亚湾是个半封闭型海湾, 原本水质优良, 生物资源丰富, 是广东省的主要海水养殖区。大亚湾经历了长期的工业、农业和水产养殖业发展, 尤其是1994年大亚湾核电站建成运行以来, 其生态环境发生了深远的变化^[1,10-11], 大亚湾水域的Chl-a、浮游植物群落组成和生物量也有了明显改变^[12-14]。

大多数对大亚湾海域生态环境的研究都注重于人类活动导致的污染、富营养化和养殖业的影响^[2,15-17]。本研究则侧重于水温和生态环境的长期变化, 综合分析当前对大亚湾环境的研究成果和关于环境参数的记录资料, 以期进一步认识在一个相对长的时期中, 大亚湾生态环境对核电站热排放引起水温变化的响应。

1 研究区域及数据来源

研究区域为位于广东省 $22^{\circ}30' - 22^{\circ}50' \text{N}$, $114^{\circ}30' - 114^{\circ}50' \text{E}$ 间、面积为 600 km^2 的大亚湾(图1a)。

现场调查数据来自中科院南海海洋研究所

1982—2004年, 每年春、夏、秋、冬4个季节对大亚湾的生态调查(图1b)。调查内容包括水温、浮游植物和营养盐。其中1994—1995年的调查仅限于大亚湾核电站刚建成投产后的“DC”水域(图1b中的“DC”)。

现场水温用水温CTD测量, 取海水表层温度和底层温度的平均值作为水温值。水样化学参数如总无机氮(TIN; $\text{TIN} = \text{NO}_3\text{-N} + \text{NO}_2\text{-N} + \text{NH}_4\text{-N}$)、磷酸盐($\text{PO}_4\text{-P}$)、硅酸盐($\text{Si}_2\text{O}_3\text{-Si}$)、Chl-a等根据海洋调查规范中规定的方法进行^[18]。浮游植物水样用浅水III型网采集, 用5%的甲醛溶液固定后, 带回实验室依据Utermohl的方法^[19]进行种类鉴定和细胞计数。

其它数据主要来自文献及调查报告^[1,20-21]。

由于大亚湾核电站自1994年上半年开始运行, 本文将数据分为核电站运行前12 a(1982—1994年)和核电站运行后10 a(1994—2004年, 有热排放影响)两部分进行分析对比。考虑到2004年以后的数据在连续性和调查指标上与2004年之前的存在很大差异, 我们主要采用2004年以前的数据。

2 结果

2.1 大亚湾浮游植物群落结构

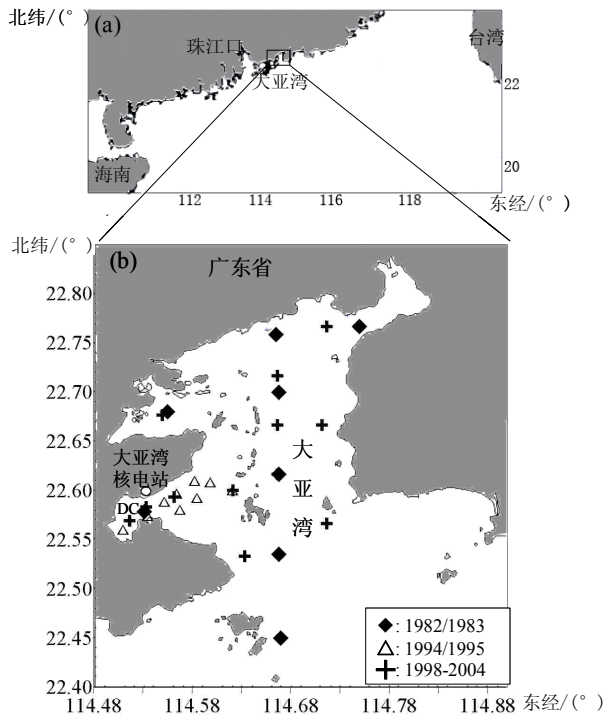
大亚湾的浮游植物群落主要由硅藻组成, 其次是甲藻。与1982—1990年相比, 1994年后浮游植物种类数呈下降趋势(图2)。浮游植物种类数最高值出现在1990年, 为56属206种; 最低值出现在1998

基金项目: 国家自然科学基金项目(40976091, 31061160190); 中国科学院知识创新工程重要方向项目(kzcx2-yw-226); 中国科学院、国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划项目(KZCX2-YW-T001; KZCX2-YW-213); 广东省自然科学基金团队项目(8351030101000002)

作者简介: 郝彦菊(1980年生), 女, 博士研究生, 研究方向为海洋生态与环境。E-mail: yanju_hao@126.com

*通信作者: 唐丹玲, 研究员, 博士。E-mail: lingzistdl@126.com

收稿日期: 2010-07-08



“◆”为 1982 年夏季、秋季和 1983 年春季、冬季调查站位，“△”为 1994 年夏季、秋季和 1995 年春季、冬季调查站位，“+”为 1998 年到 2001 年的调查站位，“○”为大亚湾核电站(DNPS)的位置

图 1 大亚湾位置 (a) 和调查站位分布图 (b)

Fig.1 Location of Daya Bay (a) and the survey stations (b)

年，为 30 属 87 种。在 1982—1990 年时间段和 1994—2003 年时间段之间，硅藻平均减少了 9 个属 44 个种，甲藻平均减少了 2 个属 15 个种。

在大亚湾浮游植物群落优势种中，细胞个体相对较大的藻种所占比重由 1982 年的 91.00% 下降到了 1998 年的 21.40%，如翼根管藻 *Rhizosolenia alata*、翼根管藻纤细变型 *Rhizosolenia alata f. gracillima*、扁面角毛藻 *Chaetoceros compressus*、拟弯角毛藻 *Chaetoceros pseudocurvisetus*、旋链角毛藻 *Chaetoceros curvisetus*、暹罗角毛藻 *Chaetoceros siamense*、透明辐杆藻 *Bacteriastrum hyalinum* 等；

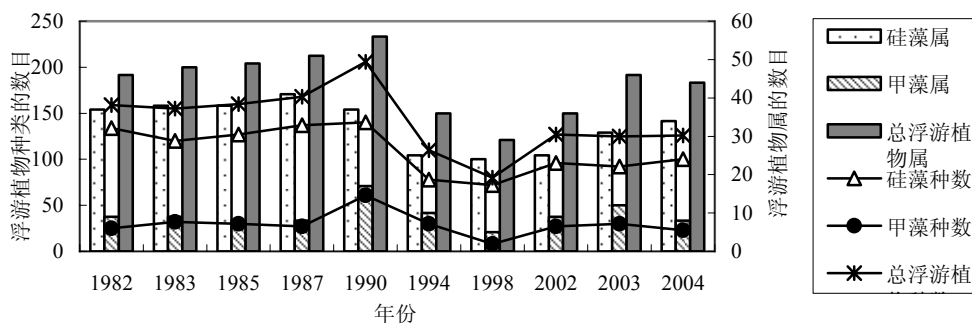


图 2 1982-2004 年大亚湾浮游植物群落组成的变化显示 1994 年后种类数下降

Fig.2 Variations of phytoplankton genera and species in Daya Bay from 1982 to 2004, showing decrease of genera number after 1994

而细胞个体相对较小的藻种所占比重由 1982 年的 2.03% 上升到了 1998 年的 34.05% (图 3)，如尖刺菱形藻 (*Nitzschia pungens*)、中肋骨条藻 *Skeletonema costatum*、窄隙角毛藻 *Chaetoceros affinis*、丹麦细柱藻 *Leptocylindrus danicus* 等。

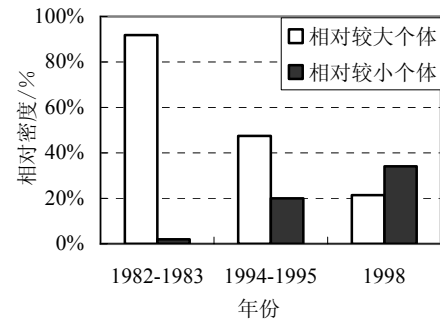


图 3 1982-1998 年间，优势种中相对较大个体在浮游植物群落细胞相对密度的百分比下降，相对较小个体的种所占百分比上升

Fig.3 The decrease of the percentage of relative big dominant species of phytoplankton community and the increase of relative small species during 1982-1998

2.2 大亚湾浮游植物细胞相对密度和 Chl-a 质量浓度

大亚湾网采浮游植物细胞相对密度由 1985 年的 $6.30 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ 下降到了 2004 年的 $6.00 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$ (图 4)。在春、夏、秋、冬四个季节，浮游植物 1994—2004 年的平均细胞相对密度分别比 1985 年下降了 9.87×10^7 、 8.52×10^7 、 1.08×10^7 与 $3.10 \times 10^7 \text{ m}^{-3}$ 。

大亚湾海水中 Chl-a 的质量浓度在 1985-2004 年间呈上升趋势。在 1994 年之前，Chl-a 的最高质量浓度出现在 1992 年的春季，为 $2.66 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；最低值出现在 1993 年的冬季，为 $0.58 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。1994 年后，最高 Chl-a 质量浓度出现在 2002 年的夏季，为 $6.09 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；最低值出现在 2002 年春季，为 $0.83 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ (图 5)。从 1985—1993 年时间段到 1994—2004 年时间段，春、夏、秋、冬四个季节中 Chl-a 的平均质量浓度分别上升了 0.069、1.09、1.14 和 $1.74 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ ，而年平均值由 $1.78 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ 上升至 2.77

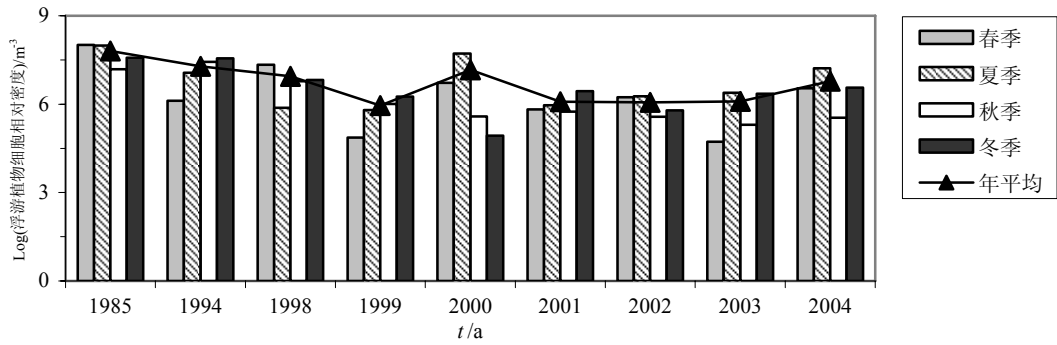


图4 1985-2004年间, 大亚湾浮游植物细胞相对密度的季节变化和年际下降趋势

Fig.4 Seasonal variations and annual decrease of phytoplankton abundance in Daya Bay from 1985a to 2004a

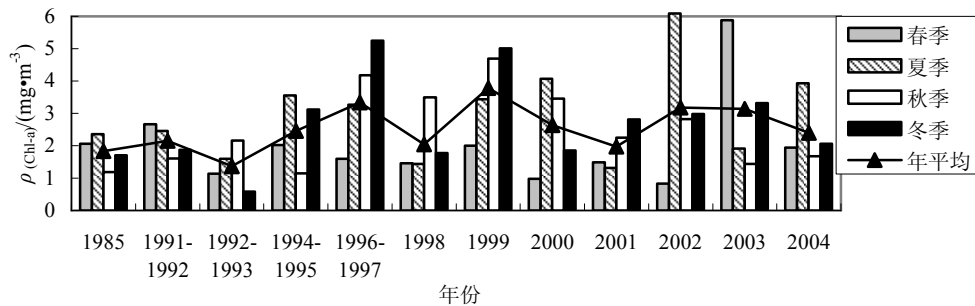


图5 1985-2004年间大亚湾海水中叶绿素 a 含量的季节变化和年际上升趋势

Fig.5 Seasonal variations and annual increase of Chl-a concentration in Daya Bay from 1985 to 2004

mg·m⁻³。

大亚湾较高质量浓度的 Chl-a 随着较高水温通常出现在邻近核电站的海域^[6,22-23], 且水温对藻类生长的促进作用在春秋季节较为显著^[6]。除了水温的影响, 大亚湾浮游植物的生长在春节受 N 限制, 而夏秋季节受 P 限制^[24], 因此近年来较高的氮磷比 (N/P) 和硅磷比 (Si/P) 会带来夏秋季节的高 Chl-a 质量浓度^[1]。

2.3 大亚湾水温及其它环境参数的变化

2.3.1 大亚湾水温上升

在大亚湾核电站运行之前, 大亚湾的年平均气温为在 22 °C; 最冷月为 1 月和 2 月, 月平均气温为 15 °C, 最热月为 7 月和 8 月, 月平均气温为 28 °C; 冬季表层海水温度最低, 平均为 15 °C, 夏季表层海水温度最高, 平均为 30 °C。以往的研究认为, 自大亚湾

核电站运行以来, 大亚湾的年平均水温上升了 0.34 °C, 且水温的最大升幅为 2.30 °C, 出现在夏季。而从 1993 到 1998 年, 大亚湾平均水温上升了 0.77 °C^[25]。

本研究发现, 大亚湾核电站运行前的最低水温出现在 1982 年的冬季, 为 14.83 °C。最高水温出现在 1985 年的夏季, 为 29.41 °C。大亚湾核电站运行之后, 最低水温上升为 15.30 °C (2003 年冬季), 最高水温上升为 31.90 °C (1994 年夏季)。从 1982-1988 年时间段到 1994—2004 年时间段, 春、夏、秋、冬 4 个季节的平均水温均有上升 (图 6)。

在过去的 50 年里 (20 世纪 50 年代中期到 20 世纪 90 年代中期), 由于自然变化和人类活动产生的影响, 全球平均海温上升了 0.31 °C^[26-27]。在中国, 渤海也是与大亚湾类似的一个半封闭型浅水海湾, 在

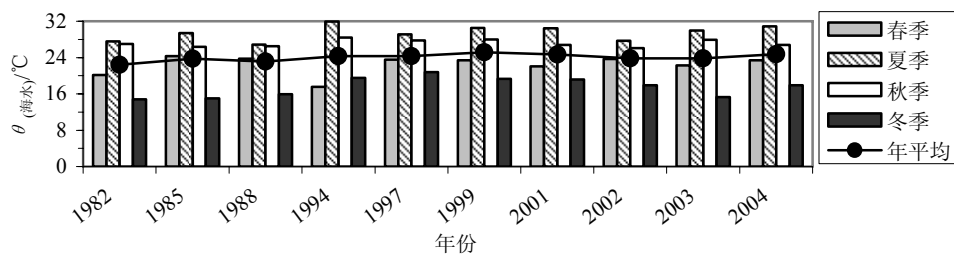


图6 大亚湾水温在 1982-2004 年间的季节变化和年平均值的上升趋势

Fig.6 Seasonal variations and annual increase of water temperature in Daya Bay from 1982 to 2004

1960—1997年间,表层海水温度以每年 $0.011\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的速率上升^[28]。而受核电站热排放影响的大亚湾,现场调查数据显示,1970—2005年间,其表层海水水温明显上升,并且其线性回归的斜率从1985—1993年间的 0.05 上升到了1994—2005年间的 0.09 ^[29]。卫星遥感的数据也显示,1985—2005年间,随着大亚湾核电站热排放的影响,其上升速率在1994年后明显加快^[29]。大亚湾水温的上升趋势,在大亚湾核电站运行前的1985—1993年间,可看作是对全球升温的响应;而在1994—2005年间的快速升温过程,则主要来自核电站热排放的影响。

2.3.2 水环境参数变化幅度增大

大亚湾的海水盐度在1982—2004年间呈不规则的波动状态。在1994年前,盐度的波动范围为 $31.11\text{‰}\sim 32.78\text{‰}$;在1994年后,盐度为 $29.70\text{‰}\sim 33.17\text{‰}$,其波动范围较1994年前显著增大。溶解氧(DO)在1994年前的波动范围在 $7.09\sim 7.46\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,1994年后为 $6.62\sim 8.48\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而化学耗氧量(COD)在1989—1999年间由 $1.125\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $0.49\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,又在2001—2003

年间由 $1.23\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到 $0.62\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

大亚湾海水中的TIN平均值从1985年的 $1.53\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升到了2004年的 $5.40\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图7a),而 $\text{PO}_4\text{-P}$ 和 $\text{SiO}_3\text{-Si}$ 分别由1985年的 $1.12\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $39.50\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 下降到了2004年的 $0.11\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $12.82\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ (图7b、c)。从1985年到2004年,N/P比值呈上升趋势(图7b)。尽管Si/P比值在2002年后呈下降趋势,但在1985—2004年间大致趋势仍是上升的(图7c)。

对大亚湾西南部1982—2002年营养盐结构的长期变化分析发现,该海域大部分地区处于贫营养盐状态,养殖水域为中度营养盐水平;营养盐的浓度在东北部较高,西南部较低,在底层海水中较高,表层海水中较低;营养盐的空间分布较为稳定。自1997年以来,大鹏澳海域TIN的含量要高于大亚湾的其它区域,而大鹏澳内P的含量要低于其它海域^[30]。从时间变化来看,TIN呈上升趋势;P在上世纪80年代到90年代之间呈下降趋势,且在2000年后略有上升;而Si没有规律性的上升或下降趋势,只是其浓度的年际波动较大。

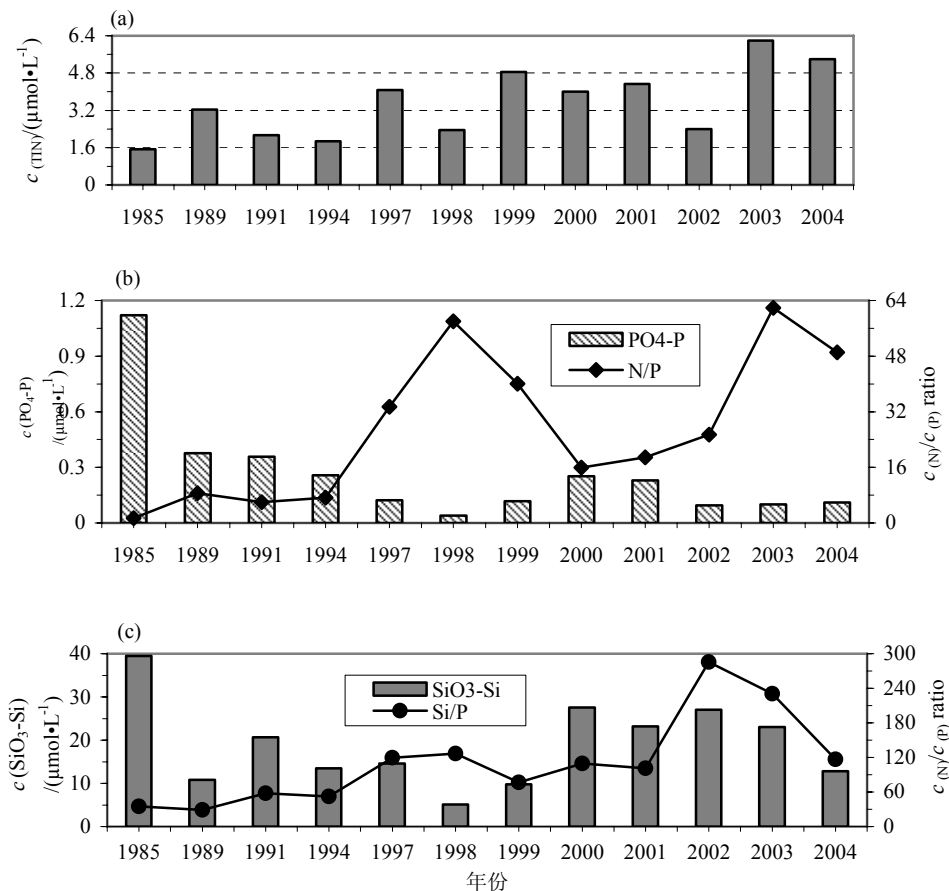


图7 大亚湾营养盐在1985—2004年间的变化情况 [(a)总无机氮;(b)磷酸盐与氮磷比;(c)硅酸盐与硅磷比]

Fig.7 Variations of nutrients in Daya Bay from 1985 to 2004 [(a) TIN; (b) $\text{PO}_4\text{-P}$ and molar N/P ratio; (c) $\text{SiO}_3\text{-Si}$ and molar Si/P ratio]

表1 大亚湾1994年前和1994年后各研究参数的变化范围
Table 1 The variable ranges of studied parameters before 1994 and after 1994 in Daya Bay

	水温/ $^{\circ}\text{C}$	盐度/ ‰	DO/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	COD/($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	Molar N/P	Molar Si/P	网采浮游植物 种类数目	网采浮游植物细胞相 对密度/($\text{cells}\cdot\text{m}^{-3}$)	$\rho(\text{Chl-a})/$ ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$)
1994年前	14.83~29.41	31.11~32.78	7.09~7.46	0.95~1.125	1.38~8.56	28.78~57.71	159~206	$1.53\times 10^7\sim 1.03\times 10^8$	0.58~2.66
1994年后	15.30~31.90	29.70~33.17	6.62~8.48	0.49~1.23	7.29~61.90	52.42~285.82	110~126	$5.3\times 10^4\sim 5.25\times 10^7$	0.83~6.09

3 讨论

3.1 核电站运行后各参数的变化幅度增加

许多研究表明,海湾浮游植物群落结构的变化主要受到陆源排污和富营养化^[1,2,16-17]影响,也可能受到海洋水文环境的影响^[31]。在大亚湾,来自核电站的高温冷却水会加剧水体层化现象和水文动力学条件的变化,最重要的是水温的升高可能会对某些藻类有明显影响^[10,14,24,30,32]。例如1994年后,大亚湾浮游植物群落的暖水性种类有所增加,甲藻所占比重也在上升(图2)。

本研究显示,与1994年前相比,1994年后随着温度的升高,大亚湾海水的盐度、DO、COD、N/P、Si/P等参数的变化范围相应增大,Chl-a质量浓度上升,而浮游植物群落的多样性和丰度都在下降(表1)。值得注意的是,各环境参数在1994年后的变化范围皆大于1994年前的变化范围,可能与1994年以后水温的升高有关。

3.2 水温和浮游植物变化量的分析

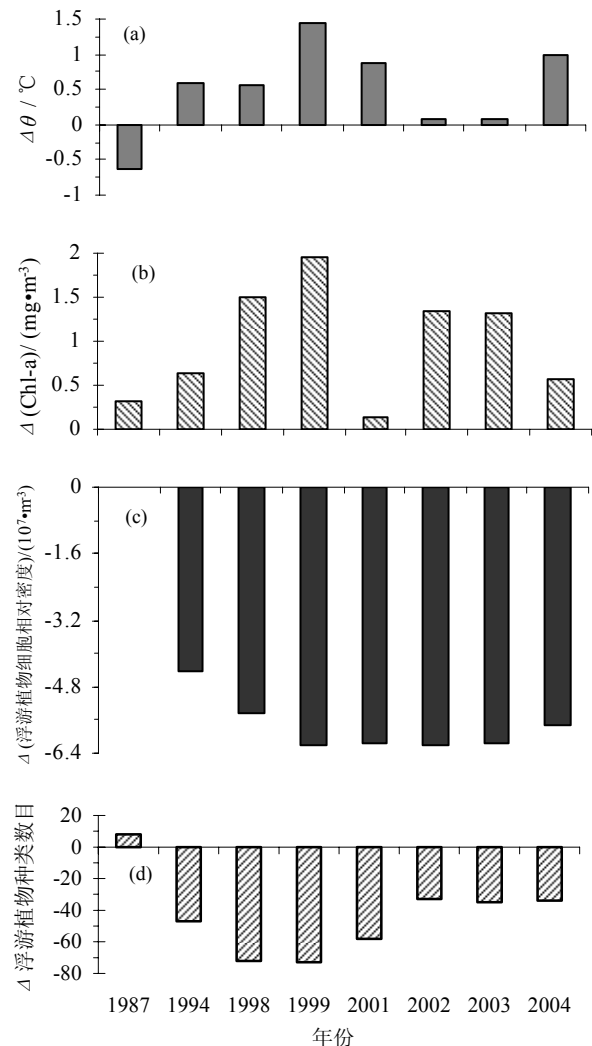
为进一步研究Chl-a和浮游植物与水温变化的关系,本文对1987—2004年各调查参数相对于1985年的变化量进行了比较。其中,水温相对于1985年的变化量为 $\Delta\theta$ 、Chl-a相对于1985年的变化量为 $\Delta\text{Chl-a}$ 、浮游植物细胞相对密度相对于1985年的变化量为 Δ 浮游植物细胞相对密度,浮游植物种类相对于1985年的变化量为 Δ 浮游植物种类数目。

结果显示, $\Delta\theta$ 在1987年为负值,而从大亚湾核电站运行后的1994年开始均为正值(图8a),且变化范围为 $0.08\text{ }^{\circ}\text{C}$ (2002年)~ $1.43\text{ }^{\circ}\text{C}$ (1999年)。 $\Delta\text{Chl-a}$ 均为正值,且从1994年后的值大都高于1987年,仅在2001年出现一个最小值(图8b)。与此相反, Δ 浮游植物细胞相对密度和 Δ 浮游植物种类数目在1994年后均为负值(图8c、d)。

高Chl-a质量浓度的水体出现在更靠近核电站的海域^[6,22,23],表明水温的升高可以在一定程度上增加海水中的初级生产量。本研究也显示, $\Delta\theta$ 和 $\Delta\text{Chl-a}$ 在1994年后都为正值(图8a、b)。大亚湾的平均水温在1982—2004年间的上升速率为 $0.122\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{a}^{-1}$;由于2004年的Chl-a质量浓度要低于1994年,在1985—2003年间Chl-a质量浓度的上升速率为 $0.069\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$,而在1994—2003年间Chl-a质量浓度的上升速率为 $0.076\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$,明显高于

1985—2003年间的上升速率,说明1994年后水温的上升加速了Chl-a质量浓度的上升。

1985—2004年间,网采浮游植物年平均细胞相对密度的下降速率为 $2.85\times 10^6\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$,种类数的下降速率为 $1.6\text{ 种}\cdot\text{a}^{-1}$ 。而在大亚湾核电站运行后,1994—2004年间,网采浮游植物年平均细胞相对密度的下降速率为 $2.13\times 10^7\text{ cells}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{a}^{-1}$,为1985—2004年间速率的10倍左右。与 $\Delta\theta$ 和 $\Delta\text{Chl-a}$ 在1994年后为正



(a): 水温变化量: $\Delta\theta$; (b): Chl-a 变化量: $\Delta\text{Chl-a}$; (c): 浮游植物细胞相对密度变化量: Δ 浮游植物细胞相对密度; (d): 浮游植物种类变化量: Δ 浮游植物种类数目

图8 1987—2004年间大亚湾各研究参数相对于1985年的变化量
Fig. 8 Variations of delta in the years from 1987 to 2004 compared to 1985 in Daya Bay

值显示的上升趋势相反, 浮游植物的 Δ 浮游植物细胞相对密度和 Δ 浮游植物种类数目在 1994 年后都为负值, 也显示了其下降趋势(图 8c、d)。基于此, 本研究认为是水温的上升导致了叶绿素 a 含量上升、浮游植物丰度和多样性的下降。

4 结论

1994 年以后, 大亚湾海水中 Chl-a 的平均质量浓度以每年 $0.076 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的速率上升; 网采浮游植物种类以平均每年 1.6 种的速率下降; 网采浮游植物细胞相对密度以平均每年 $2.13\times 10^7 \text{ m}^{-3}$ 的速率下降; 与 1982 年相比, 1998 年的浮游植物群落优势种中细胞个体相对较大的种类的细胞相对密度在整个浮游植物群落细胞相对密度中所占的比重下降了 69.60%, 而相对细胞个体相对较小的种类的细胞相对密度所占比重上升了 32.02%。1994 年核电站运行后, 大亚湾的盐度、DO、COD 和营养盐的变化幅度增大。

核电站的热排放导致大亚湾水温的升高, 可能使大亚湾其他水环境因子的变化幅度及其生态效应增大。水温的升高是大亚湾生态环境, 尤其是浮游植物群落结构变化的主导因子。

参考文献:

- [1] WANG Youshao, LOU Zhiping, SUN Cuici, et al. Ecological environment changes in Daya Bay, China, from 1982 to 2004 [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, 56:1871-1879.
- [2] SONG Xingyu, HUANG Liangmin, ZHANG Jianlin, et al. Harmful algal blooms (HABs) in Daya Bay, China: An in situ study of primary production and environmental impacts [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, 58: 1310-1318.
- [3] 周名江, 朱明远, 张经. 中国赤潮的发生趋势和研究进展[J]. *生命科学*, 2001, 13(2): 54-59.
ZHOU Mingjiang, ZHU Mingyuan, ZHANG Jing. Occurrence trend of harmful algal blooms and advances in the related research in China [J]. *Chinese Bulletin of Life Science*, 2001, 13(2): 54-59.
- [4] WANG Sufen, TANG Danling, HE Fangliang, FUKUYO Y, AZANZA R. Occurrences of Harmful algal blooms (HABs) associated with ocean environments in the South China Sea[J]. *Hydrobiologia*, 2008, 596:79-93.
- [5] HORVATH R S, BRENT M M. Thermal pollution and the aquatic microbial community: Possible consequences [J]. *Environmental Pollution*, 1972, 3 (2): 143-146.
- [6] TANG Danling, KESTER D R, WANG Zhaoding, et al. AVHRR satellite remote sensing and shipboard measurements of the thermal plume from the Daya Bay, nuclear power station, China [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 84 (4): 506-515.
- [7] SANFORD E, BERMUDEZ D, BERTNESS M, et al. Flow, food supply and accord barnacle population dynamics [J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1994, 104: 49-62.
- [8] AHN Y H, SHANMUGAM P, LEE J H, et al. Application of satellite infrared data for mapping of thermal plume contamination in coastal ecosystem of Korea [J]. *Marine Environmental Research*, 2006, 61: 186-201.
- [9] SARAVANAN P, PRIYA A M, SUNDARAKRISHNAN B, et al. Effects of thermal discharge from a nuclear power plant on culturable bacteria at a tropical coastal location in India [J]. *Journal of Thermal Biology*, 2008, in press.
- [10] SONG Xingyu, HUANG Liangmin, ZHANG Jianlin, et al. Variation of phytoplankton biomass and primary production in Daya Bay during spring and summer [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2004, 49: 1036-1044.
- [11] 王友绍, 王肇鼎, 黄良民. 近 20 年来大亚湾生态环境的变化及其发展趋势[J]. *热带海洋学报*, 2004, 23(5): 85-95.
WANG Youshao, WANG Zhaoding, HUANG Liangmin. Environmental changes and trends in Daya Bay in recent 20 years [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2004, 23, 85-95.
- [12] 周贤沛, 林永水, 王肇鼎. 大亚湾水域浮游植物群落特征的统计分析[J]. *热带海洋*, 1998, 17(3): 57-64.
ZHOU Peixian, LIN Yongshui, WANG Zhaoding. A statistical analysis on phytoplankton community features in waters of Daya Bay [J]. *Tropic Oceanology*, 1998, 17: 57-64.
- [13] WANG Zhaohui, QI Yuzao, CHEN Jufeng, et al. Phytoplankton abundance, community structure and nutrients in cultural areas of Daya Bay, South China Sea [J]. *Journal of Marine Systems*, 2006, 62: 85-94.
- [14] 孙翠慈, 王友绍, 孙松, 等. 大亚湾浮游植物群落特征[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 3948-3958.
SUN Cuici, WANG Youshao, SUN Song, et al. Dynamic analysis of phytoplankton community characteristics in Daya Bay, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 3948-3958.
- [15] ZHOU Junliang, MASKAOUI K. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in water and surface sediments from Daya Bay, China [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 21 (2): 269-281.
- [16] WU Meilin, WANG Youshao. Using chemometrics to evaluate anthropogenic effects in Daya Bay, China [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 72: 732-742.
- [17] WANG Zhaohui, ZHAO Jiangang, ZHANG Yujuan, et al. Phytoplankton community structure and environmental parameters in aquaculture areas of Daya Bay, South China Sea [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21:1268-1275.
- [18] 国家海洋局. GB 12763.7-1991, GB 17378.1-1998 海洋监测规范[S]. 北京: 海洋出版社, 1991.
SOC. GB 12763.7-1991, GB 17378.1-1998 The Criterion of Marine Monitoring. State Oceanic China [S]. Beijing: Oceanographical Press, 1991.
- [19] UTERMOHL H. Toward the improvement of the quantitative phytoplankton method [J]. *Mitteilungen-Internationale Vereinigung fur Limnologie*, 1958, 9: 1-38.
- [20] 潘金培, 蔡国雄. 中国科学院南海海洋研究所大亚湾海洋生物综合实验站研究年报 (I) [C]. 北京: 科学出版社, 1996.
PAN Jinpei, CAI Guoxiong. Annual Research Reports of Marine Biology Research Station at Daya Bay, South China Sea Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences (I) [C]. Beijing: Science publishing company, 1996.
- [21] 潘金培, 王肇鼎, 吴信忠. 中国科学院南海海洋研究所大亚湾海洋生物综合实验站研究年报 (II) [C]. 北京: 科学出版社, 1998.
PAN Jinpei, WWANG Zhaoding, WU Xinzong. Annual Research Reports of Marine Biology Research Station at Daya Bay, South China Sea Institute of Oceanology, the Chinese Academy of Sciences (II) [C]. Beijing: Science publishing company, 1998.

- [22] YU Jing, TANG Danling, OH I S, et al. Response of Harmful Algal Blooms to Environmental Changes in Daya Bay, China [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2007, 18 (5): 1011 – 1027.
- [23] YU Jing, TANG Danling, WANG Sufen, et al. Changes of water temperature and harmful algal bloom in Daya Bay in the northern South China Sea [J]. *Marine Science Bulletin*, 9 (2): 26-33.
- [24] 韦桂峰. 广东大亚湾西南部海域营养盐结构的长期变化[J]. *生态科学*, 2005, 24(1): 1-5.
WEI Guifeng. The long term variation of the nutrient structure in southwest Daya Bay [J]. *Ecologic Science*, 2005, 24(1): 1-5.
- [25] 彭云辉, 陈浩如, 王肇鼎, 等. 大亚湾核电站运转前和运转后邻近海域水质状况评价[J]. *海洋通报*, 2001, 20(3): 161-165.
PENG Yunhui, CHEN Haoru, WANG Zhaoding, et al. The primary production and potential fishery production in the sea area around the Daya Bay Nuclear Power Station before and after the operation of DBNPS [J]. *Journal of Fisheries of China*, 2001, 25(3): 161-165.
- [26] LEVITUS S, ANTONOV J I, BOYER T P, et al. Warming of the world ocean [J]. *Science*, 2000, 287: 2225-2229.
- [27] NEREM R S, LEULIETTE E, CAZENAVE A. Present-day sea-level change: A review [J]. *Geoscience*, 2006, 338: 1077-1083.
- [28] LIN Chuanlan, SU Jilan, XU Bingrong, et al. Long-term variations of temperature and salinity of the Bohai Sea and their influence on its ecosystem [J]. *Program of Oceanography*, 2001, 49: 7-19.
- [29] YU Jing, TANG Danling, YAO Lijun, et al. Long-term water temperature variations in Daya Bay, China using satellite and in situ observations [J]. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2010, 21(2), in press.
- [30] 刘胜, 黄晖, 黄良民, 等. 大亚湾核电站对海湾浮游植物群落的生态效应[J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(2): 9-25.
LIU Sheng, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al. Ecological response of phytoplankton to the operation of Daya Bay nuclear power station [J]. *Marine Environment Science*, 2006, 25(2): 9-25.
- [31] LIU Chunli, TANG Danling, WANG Sufen, et al. Variations in dominant algal species of blooms during 1993-2007 in the western South China Sea [J]. *African Journal of Marine Science*, 2009, 31(3): 373-380.
- [32] 丘耀文, 王肇鼎, 朱良生. 大亚湾海域营养盐与叶绿素含量变化趋势及其对生态环境的影响[J]. *台湾海峡*, 2005, 24(2): 131-139.
QIU Yaowen, WANG Zhaoding, ZHU Liangsheng. Variation trend of nutrient and chlorophyll contents and their effects on ecological environment in Daya Bay [J]. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 2005, 24(2): 131-139.

Changes in phytoplankton community structure in response to water temperature increases in Daya Bay, China

HAO Yanju^{1, 2, 3}, TANG Danling^{1, 2, 3*}

1. South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510301, China;

2. Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Science, Yantai 264003, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

* **Corresponding author address:** Dr. DanLing Tang, LED, Research Center for Remote Sensing on Marine Ecology and Environment, South China Sea Institute of Oceanology, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China; E-mail: lingzistdl@126.com, <http://lingzis.51.net>. Tel/Fax: 86 20 89023203

Abstract: The Daya Bay Nuclear Power Station (DNPS) has been operating since 1994. This study investigated changes of net-phytoplankton, Chl-a, water temperature, salinity, DO, COD, and nutrients in Daya Bay over two decades. The results showed that the net-phytoplankton abundances decreased by $2.13 \times 10^7 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ during 1994-2004, nearly an order of magnitude greater than during 1985 to 2004 when net-phytoplankton decreased by $2.85 \times 10^6 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$. The species diversity of net-collected phytoplankton decreased to only 16 species after 1994. The concentration of Chl-a increased by $0.069 \text{ mg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ from 1985 to 2003, but the increase was much higher ($0.076 \text{ mg} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) during 1994-2004. When 1982 is compared with 1994, the percentage of relative large cell species decreased, whereas the percentage of relatively small cell species increased by 1998. The water temperature increased after 1994 due to the thermal discharge from the DNPS. The variations of salinity, DO, COD and nutrients got greater ranges after 1994. The results suggest that the increase of water temperature is an important environmental driver changing phytoplankton assemblages in Daya Bay.

Key words: phytoplankton; community structure; chl-a; water temperature; thermal discharge; Daya Bay