

•研究报告•

台湾海峡离岛工业区海域浮游生物 丰度之长期变化

陈孟仙^{1*} 翁韶莲² 陈姿君¹ 陈镇东¹

1 (“中山大学”海洋科学系, 台湾高雄 80424)

2 (屏東科技大学水产养殖系, 台湾屏东 91201)

摘要: 本研究利用1993–2010年在云林县台西乡沿岸的8个站位所进行的一年四季近岸10 m及离岸20 m水深的浮游生物调查资料及同步的水质资料, 分析了发电厂建成后对浮游生物的影响。本海域18年内浮游生物各类群丰度/密度的各季节平均值, 皆以第四季(10–12月)为最低, 而各个类群的最高平均值出现的季别并不一致。其中浮游动物出现于第一和第二季(1–6月), 浮游植物和虾、蟹幼体在第二季(4–6月), 而鱼卵和仔鱼则是在第一至第三季(1–9月)。自2000年第三季起, 测线5的测站经常有pH值低于7.8的情形。当该海域水体测得pH值低于7.8时, 浮游动物(75 ± 69 ind./m³)、浮游植物($(1.60\pm 2.28)\times 10^3$ cell/L)、虾幼体(2.4 ± 5.8 ind./m³)、蟹幼体(1.9 ± 5.0 ind./m³)及鱼卵(0.88 ± 1.10 ind./m³)和仔鱼(0.16 ± 0.32 ind./m³)的丰度/密度值皆偏低, 仅为历年总平均值的1/2。据此建议将发电厂排入海洋之水体pH值控制在7.8以上, 以降低对浮游生物多样性及丰度的冲击。

关键词: pH值; 浮游生物; 云林海域; 海水酸化; 排烟脱硫

Time series variation of plankton in a remote industrial island, Taiwan Strait, southwestern Taiwan

Meng-Hsien Chen^{1*}, Saou-Lien Wong², Tzu-Chun Chen¹, Chen-Tung Chen¹

1 Department of Oceanography, “Sun Yat-sen University”, Kaohsiung, Taiwan 80424

2 Department of Aquaculture, Pingtung University of Science and Technology, Pingtung, Taiwan 91201

Abstract: Eighteen years of monitoring data at four sections along the coastline of Taisi Township, Yunlin County, between 1993 and 2010 were used to study the effects of power plant on plankton. Sampling was conducted at depths of 10 m and 20 m in each section. Among the four seasons, the fourth quarter (October to December) had the lowest average abundance of plankton over the years. However, the peak abundance of different types of plankton occurred in different seasons. Zooplankton had the highest abundance during the first and second seasons (January to June) while phytoplankton, shrimp larvae and crab larvae had the greatest abundance in the 2nd quarter (April to June) and the peak in fish egg and fish larvae occurred from the 1st to the 3rd quarter (January to September). Cumulative data from 18 years shows that the pH of SEC5 often dipped below 7.8 since the 3rd quarter of 2000. pH value lower than 7.8 were frequently measured in the stations of section 5. Each time the pH value is under 7.8, the quantities of zooplankton (75 ± 69 ind./m³), phytoplankton ($(1.60\pm 2.28)\times 10^3$ cell/L), shrimp larvae (2.4 ± 5.8 ind./m³), crab larvae (1.9 ± 5.0 ind./m³), fish egg (0.88 ± 1.10 ind./m³), and fish larvae (0.16 ± 0.32 ind./m³) showed significant low values (only the half of the total average). Accordingly, we strongly suggest that the warm water effluents discharging from a power plant should maintain the pH above 7.8 in the coastal waters to reduce the negative impact on the marine zooplankton biodiversity and abundance.

Key words: pH; plankton; Yunlin coast; ocean acidification; flue gas desulphurization (FGD)

收稿日期: 2015-10-21; 接受日期: 2016-04-14

基金项目: 台湾工业局离岛式工业区开发基金长期经费支持

*通讯作者 Author for correspondence. E-mail: mhchenvc@gmail.com

浮游生物在水域环境中扮演着初级生产者以及初级或次级消费者的角色, 这些生物在海洋生态系统的能量传递上为不可或缺的一环, 所以浮游植物的丰沛与否, 会影响到以之为食的草食性浮游动物的出现和分布。此外, 浮游动物本身不仅为许多鱼虾类的饵料, 其组成亦包含着鱼虾贝类的浮游幼体。所以由浮游生物丰度的多寡, 亦可查明附近海域生物资源的丰寡。

云林离岛式基础工业区厂区位于云林县麦寮乡和台西乡的西海岸, 北端为浊水溪出水口南岸, 南端现为新虎尾溪出海口。1994年4月麦寮区动工, 7月开始填海造地, 1999年6月至2000年9月发电厂3个机组陆续运转, 火力发电厂所排放的二氧化硫废气则利用排烟脱硫设备转化成硫酸镁, 过程中需导入海水进行中和反应, 因此所排出的水(临近SEC5)会比导入的海水pH值低。

一般海水pH值约为8.1, 而低pH对不同的海洋生物有着不同程度的影响。当pH为7.8时, 即影响海葵双锯鱼(*Amphiprion percula*)仔鱼的嗅觉(Munday et al, 2009; Dixson et al, 2010), 珊瑚藻(Corallinaceae)、长海胆科*Paracentrotus lividus*和皇冠海胆(*Arbacia lixula*)的丰度也明显小于在pH为8.1的正常海水(Hall-Spencer et al, 2008); pH为7.7时, 长海胆科*Heliocidaris erythrogramma*的精子泳速和存活率及胚胎和仔鱼的发育成功率明显较pH为8.1时低(Havenhand et al, 2008)。太平洋磷虾(*Euphausia pacifica*)、长拟真刺水蚤(*Paraeuchaeta elongata*)、莹虾(*Conchoecia* sp.)和秀箭虫(*Sagitta elegans*)会随着暴露时间和pH降低而增加死亡率(Yamada & Ikeda, 1999)。

因此本文藉由长期的离岛式基础工业区附近海域浮游生物的数据累积, 提供了在野外沿岸生态环境实际变化下该海域海洋浮游生物的变迁。

1 材料和方法

1.1 调查时间和地点

本调查自1993–2010年在台湾云林县台西乡沿海之SEC5、SEC7、SEC9及SEC11等4条长期监测测线的近岸站位(10 m水深)及离岸站位(20 m水深), 共8个站位进行的一年4个季节的浮游生物调查(图1)。在1999年以前, 全海域的测线还有北边的测线3和南边的测线13和15, 因此在电厂运转前的背景

基线资料有352笔监测数据; 2000–2010年间因逐年南北测线3、13和15的删减, 11年间累积有386笔监测数据, 其中包括53笔pH值低于7.8的监测数据, 在第一、二、三和四季测得的笔数分别为15、9、12和17笔。本报告中的季节区分是第一季为1–3月, 第二季为4–6月, 第三季为7–9月, 第四季为10–12月。

1.2 采样方法

浮游动物以北太平洋标准网(网口直径45 cm, 网长180 cm, 网目330 μm)在近岸测站进行表层拖网一次, 离岸站位则分别进行水平及垂直拖网各一次。网口装置流量计以估算流经网口之实际水量。采得之样品以5%中性福尔马林溶液固定保存携回实验室中, 再以分样器(plankton divider)取得亚样品(subsample), 进行生物量、丰度以及各大类出现百分率的测定。

浮游植物在每一测站以采水器采取表层20 L的海水, 经孔径为55 μm 的滤网过滤, 浓缩至70–100 mL, 并以0.7%的Lugol's溶液固定后, 置于褐色塑料瓶中, 低温避光保存, 直至携回实验室进行物种鉴定, 并计数单位水体中的细胞丰度以及各种浮游植物的数量百分比等。

采集浮游生物的同时, 亦收集当时的表水水样, 现场测量温度, 携回实验室后进行盐度和pH值的分析。

1.3 数据统计分析

将2000年第三季起的各项浮游生物测值依四季, 以*t*-test比较各季于电厂运转前后及pH值于7.8以上或以下时该项浮游生物测值间的差异; 采用Microsoft Excel 2013软件进行图表制作。

2 结果

2.1 浮游动物

历年全海域浮游动物的季平均丰度变化范围为43–4,333 ind./m³, 历年总平均丰度为244 ind./m³, 丰度最高季平均值出现于第一和第二季(1–6月)。在1999年(含)以前, 这二季平均值的范围为441–4,333 ind./m³, 而2000年以后则为166–2,337 ind./m³, 呈现高峰期丰度值下降的趋势。值得注意的是, 在电厂运转一年以后(2000年9月起), 海域现场调查时即有测得pH<7.8的情形。经比较得知, 当pH<7.8时, 即无浮游动物高值的出现(图2a)。同时经区分电厂运

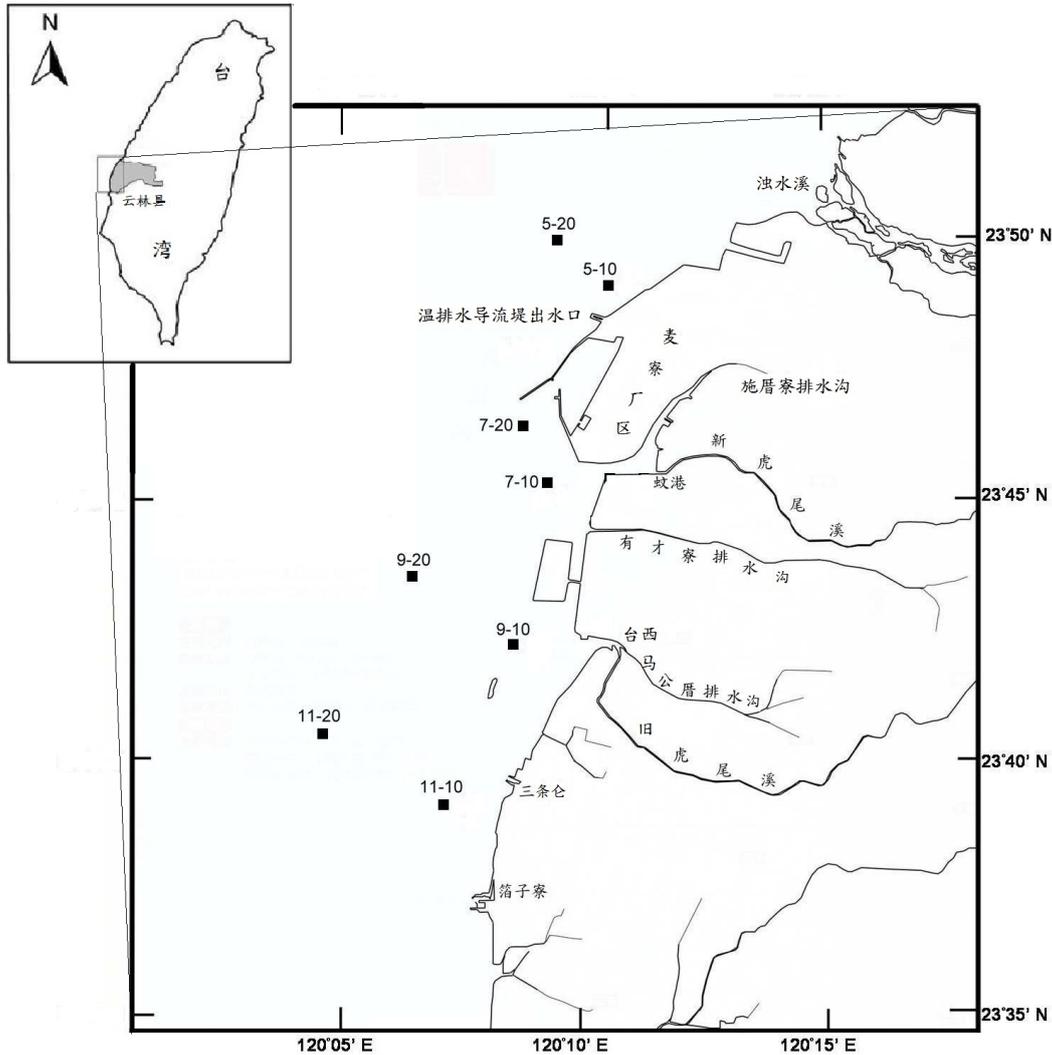


图1 台湾离岛工业区海域现场调查范围及测站位置图。各测线的-10和-20分别表示近岸10 m水深和离岸20 m水深处的采样站点。

Fig. 1 Map of sampling sites in the remote industrial island of Taiwan Strait. The sampling sections marked with -10 and -20 mean the sampling station at water depth of 10 m and 20 m, respectively.

转前后, 比较其间的季节差异, 得知2000年以后, 无论是丰度最高的第一和第二季的季平均丰度值(分别为715和772 ind./m³)低于1993–1999年的1,228和1,019 ind./m³, 第三和第四季的非高峰期季平均值(383和239 ind./m³)也低于运转前之测值(500和340 ind./m³) (图3a)。

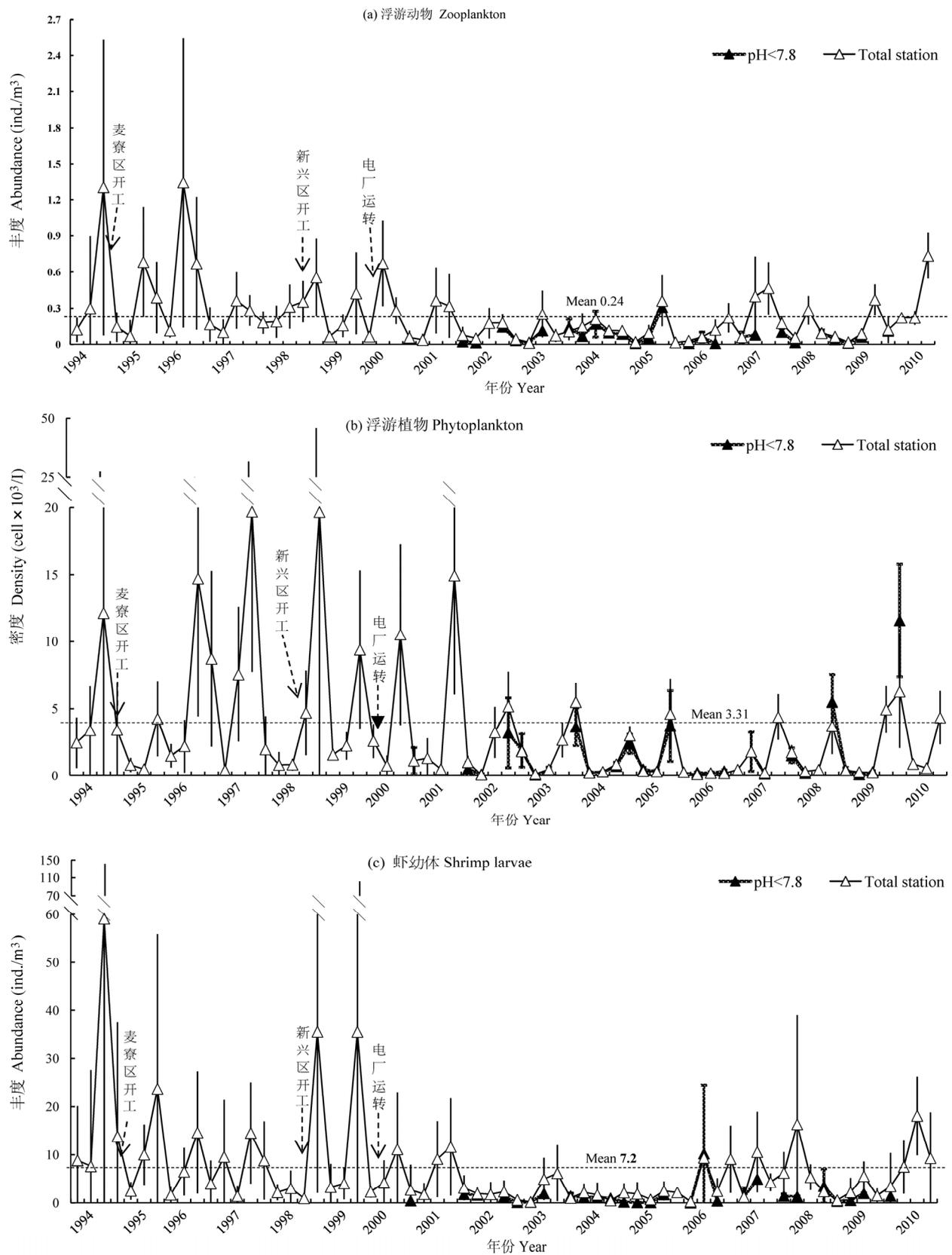
2.2 浮游植物

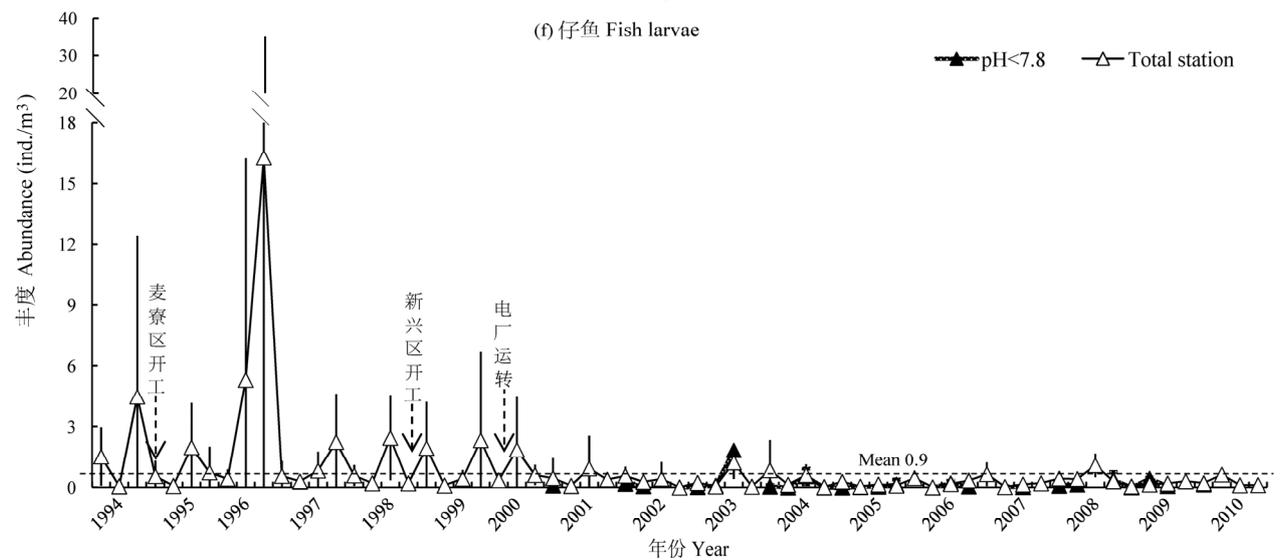
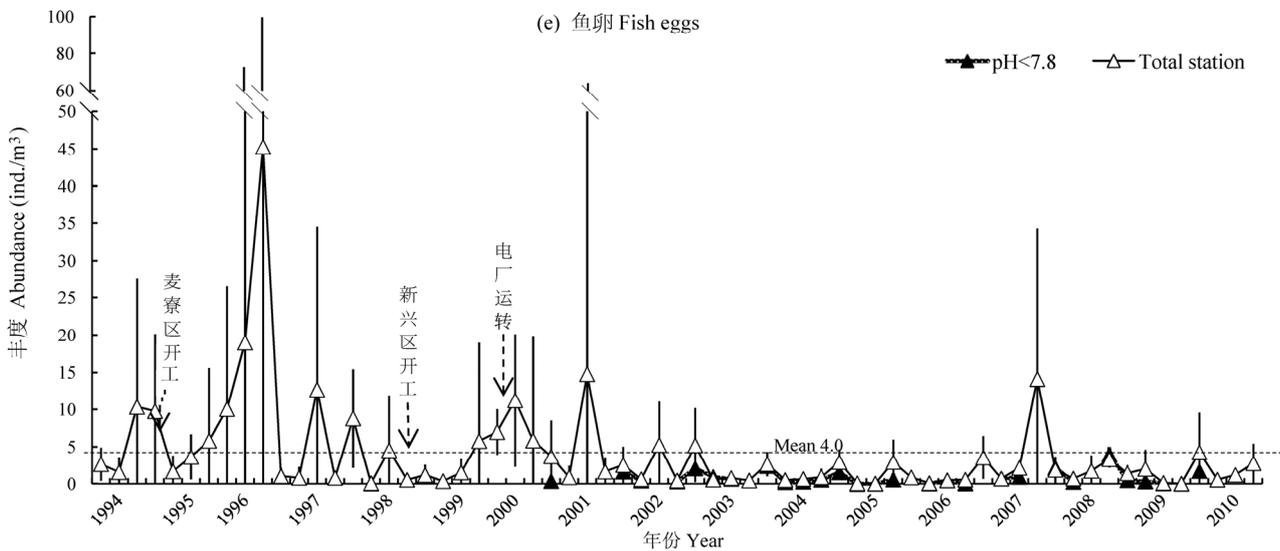
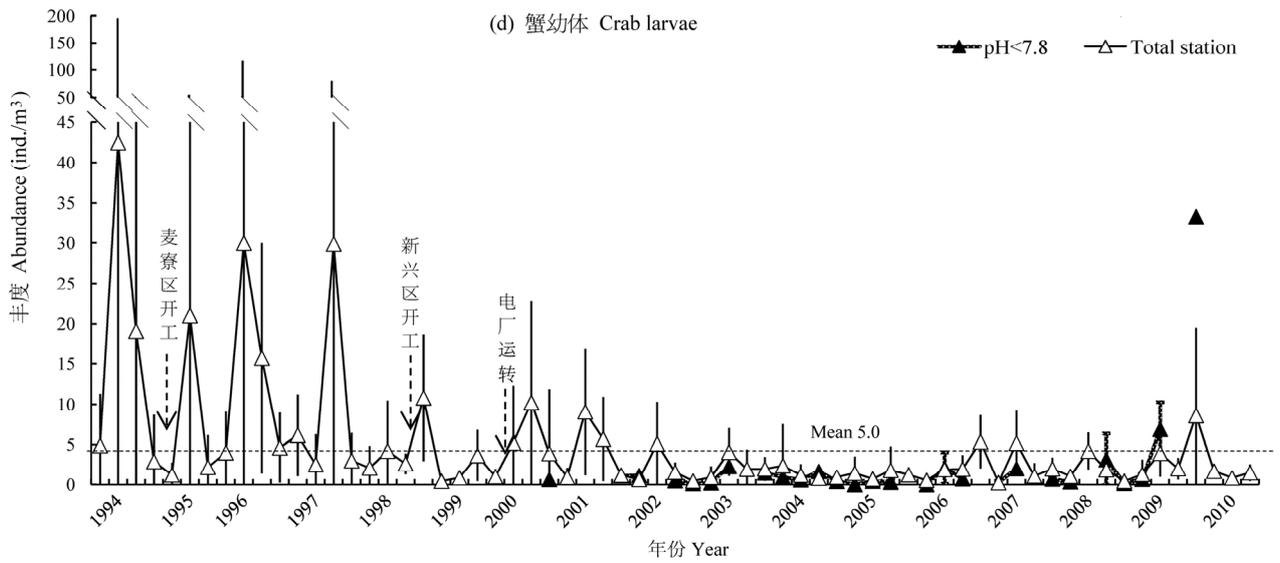
历年全海域浮游植物的季平均密度变化范围为 0.06×10^3 – 20.15×10^3 cells/L, 历年的总平均密度为 3.31×10^3 cells/L, 密度较高的季节为第二季(4–6月), 第一和第四季为低密度期。在时间序列的变化趋势上, 自2002年以后密度高峰值即明显偏

低。在1993–1999年间的季平均值范围为 0.35×10^3 – 20.15×10^3 cells/L, 而2000–2010年的季平均密度则为 0.06×10^3 – 16.36×10^3 cells/L。第二季高峰期的季平均密度值在电厂运转前为 10.49×10^3 cells/L, 而运转后则下滑至 5.32×10^3 cells/L, 但于2010年后有略为增加之迹象(图2b)。在电厂运转前后其浮游植物的密度于第一、二、四季和全年皆呈现显著的差异($P < 0.05$), 电厂运转后明显较低, 第三季浮游植物之季平均值亦为电厂运转后较低(图3b)。

2.3 虾幼体

历年虾幼体(shrimp larvae)全海域的季丰度变化范围为0.93–170.2 ind./m³, 历年全海域总平均丰





度为7.2 ind./m³, 第二季(4–6月)为丰度的高峰期。在1993–1999年的季平均值范围为2.2–170.2 ind./m³, 而2000–2010年的季平均丰度范围则为0.93–99.8 ind./m³。近10年第二季高峰期的季平均丰度由48.2 ind./m³明显下降为16.5 ind./m³($P<0.05$), 同时当pH<7.8时, 几乎无虾幼体的高值出现(图2c)。此外, 电厂运转前是以第二季平均值为高峰期, 运转后则由第一季所取代, 但其测值(20.8 ind./m³)仍远低于运转前第二季之平均值(48.2 ind./m³), 显示虾幼体的高峰期不仅总平均值下降, 且出现的高峰季别亦改变。除第二季外, 虾幼体在第三季的季平均值为电厂运转前(34 ind./m³)大于运转后(16 ind./m³), 而第一和四季则为运转后较高, 全年也是运转前大于运转后(图3c)。

2.4 蟹幼体

历年蟹幼体在全海域的季节丰度变化范围为0.6–59.5 ind./m³, 历年全海域总平均丰度为5.0 ind./m³, 高峰期大多出现在第一季及第二季, 并在2002年之后几乎无明显的高峰期。在1993–1999年的季节平均丰度范围为1.4–59.5 ind./m³, 而2000–2010年则为0.6–33.8 ind./m³(图2d)。其中第一和第二季(16和19 ind./m³)的季平均值, 在电厂运转前大于电厂运转后(7和9 ind./m³), 其他两季虽不明显, 但季平均也为运转后较低。值得注意的是, 全年不分季节时则呈现在电厂运转前(12.6 ind./m³)显著大于电厂运转后(6.4 ind./m³)的情形($P<0.01$) (图3d)。

2.5 鱼卵

历年鱼卵全海域的季丰度变化范围为0.01–32.4 ind./m³, 历年全海域的总平均丰度为4.0 ind./m³。第一至第三季(1–9月)的丰度较高。在1993–1999年的季节平均丰度范围为0.01–32.4 ind./m³, 而2000–2010年则为0.02–13.2 ind./m³, 且几乎无明显高峰期。当pH<7.8时, 更无高值出现(图2e)。比较电厂运转前后的差异, 可发现第一季的季

节平均值在电厂运转前为9.1 ind./m³, 显著高于电厂运转后的2.9 ind./m³ ($P<0.05$), 不分季别的全年测值亦然(分别为7.0和3.1 ind./m³) ($P<0.01$) (图3e)。

2.6 仔鱼

历年全海域仔鱼的季节丰度变化范围为0.03–18.0 ind./m³, 历年全海域总平均丰度为0.9 ind./m³, 仔鱼在第一至第三季的丰度较高, 呈现与鱼卵相同的结果。1993–1999年的季节平均丰度范围为0.09–18.0 ind./m³, 而2000年之后则为0.03–4.0 ind./m³。近10年高峰值的出现频率和测值均较过去为少, 与前述之其他生物测值的趋势雷同, 亦无明显高峰期。然更有甚者, 与其他浮游生物丰度趋势相异的是, 仔鱼的丰度值在近年来仍毫无增加之迹象(图2f)。比较四季的仔鱼平均值在电厂运转前后的差异, 呈现第一至第三季为电厂运转前(4.2、4.6和2.8 ind./m³)大于运转后(1.4、0.8和1.6 ind./m³), 且第二和第三季有显著差异($P<0.05$), 而第四季则反之, 但并不显著, 全年呈现电厂运转前显著大于运转后(分别为3.3和1.2 ind./m³) ($P<0.01$) (图3f)。

2.7 水体pH值高于或低于7.8之测值比较

由历年浮游生物测值的变化趋势图得知, 在电厂运转1年后, 台西沿岸测站陆续有水样pH<7.8的情形, 从此以后浮游生物之测值高峰皆未出现并明显偏低(图2)。又根据前述结果得知, 各项浮游生物测值于电厂运转后较运转前为低(图3)。为进一步排除电厂运转前后可能有其他中小尺度环境因子的交互影响所导致之误差, 故取电厂运转1年后, 由同一天现场测得pH<7.8时之其他测站测值做交叉比对, 并以t-test统计分析, 以探讨其间的差异显著性。结果显示浮游动物在第一季和第二季的丰度值(78和161 ind./m³), 在水体pH<7.8的测站显著小于水体pH≥7.8的测站(311和287 ind./m³) ($P<0.01$ 和0.05), 且全年不分季节差异极显著($P<0.001$) (图4a)。浮游植物大多无显著差异, 但在第四季却出现pH<7.8有显著较高的丰度($P<0.05$) (图4b)。虾幼体

←

图2 1993–2010年云林县台西乡附近海域历次采样之浮游生物的丰度/密度变化。(a)浮游动物; (b)浮游植物; (c)虾幼体; (d)蟹幼体; (e)鱼卵; (f)仔鱼。空心三角形为季平均值, 实心三角形则为测站之水样pH<7.8之平均值, 垂直线为标准差, 虚线为历年全海域总平均值。

Fig. 2 The monitoring data of abundance/density of plankton between 1993 and 2010 in the Taisi County, Yunlin, southwestern Taiwan. (a) Zooplankton; (b) Phytoplankton; (c) Shrimp larvae; (d) Crab larvae; (e) Fish eggs; (f) Fish larvae. The hollow triangles show the mean of total station, whereas the solid triangles are the mean abundance/density with pH<7.8, the vertical lines indicate the standard deviation, and the horizontal dotted lines are the overall total mean.

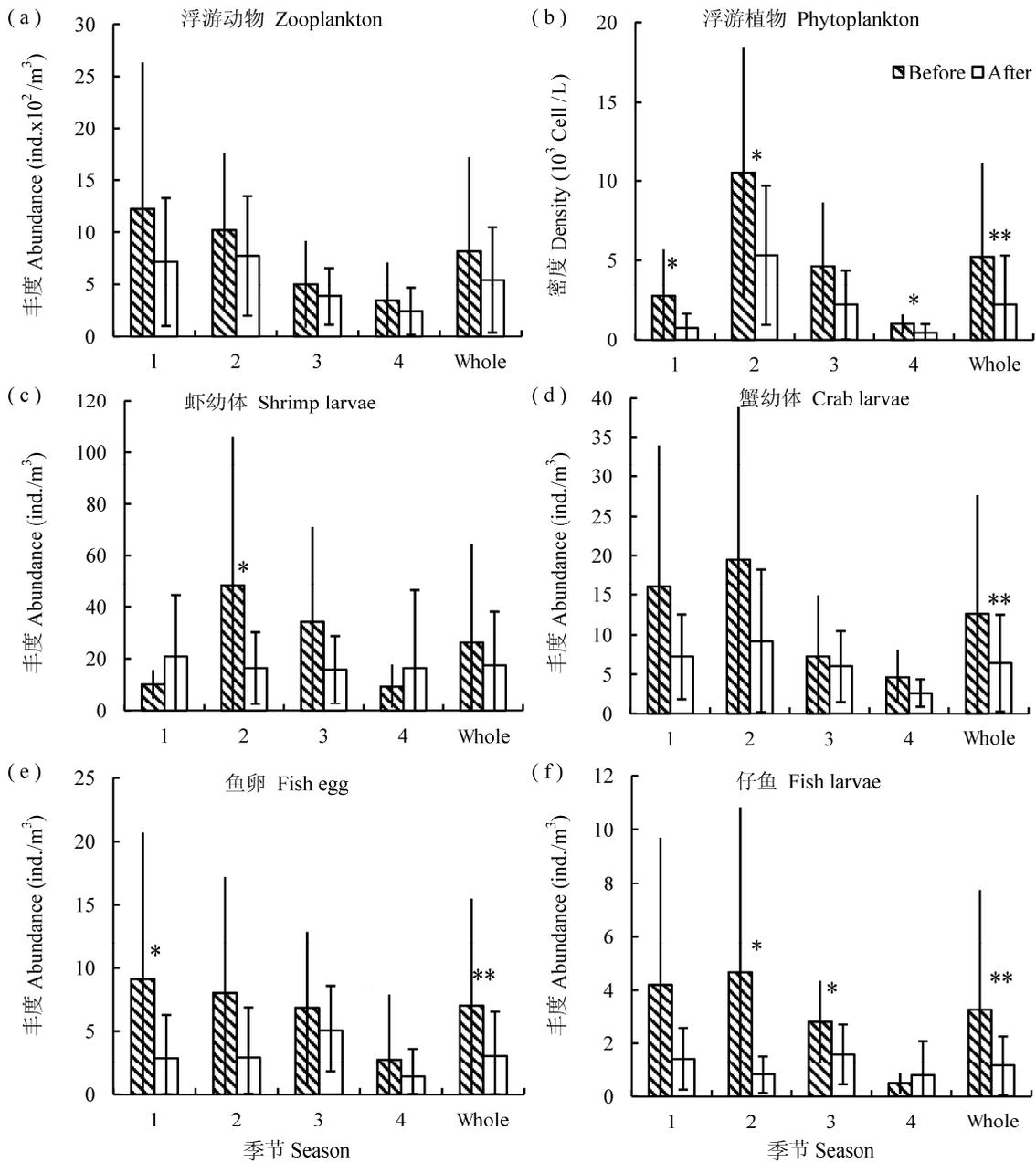


图3 1993–2010年云林县台西乡沿岸的(a)浮游动物、(b)浮游植物、(c)虾幼体、(d)蟹幼体、(e)鱼卵和(f)仔鱼丰度测值于电厂运转前后一年四季和全年之比较。Before: 1993至1999年电厂运转前($n = 7$ 季); After: 2000年至2010年电厂运转后($n = 12$ 季)。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

Fig. 3 Comparison with the seasonal and whole-year monitoring data between 1993 and 2010 in the Taisi County, Yunlin, South-western Taiwan. (a) Abundance of zooplankton; (b) Density of phytoplankton; (c) Abundance of shrimp larvae; (d) Abundance of crab larvae; (e) Abundance of fish eggs; (f) Abundance of fish larvae. "Before" ($n = 7$) means the data collected before the operation of the power plant between 1993 and 1999. "After" ($n = 12$) means the data were collected after the operation of the power plant. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

则是第三季和全年皆呈现显著较低的情形($P < 0.05$) (图4c)。蟹幼体发现只有第四季呈现显著的差异($P < 0.05$), 其他虽大多仍以 $\text{pH} \geq 7.8$ 时有较高的测值, 但差异不显著(图4d)。鱼卵的各季仍呈现 pH

≥ 7.8 时有较高值, 但并没有显著与 $\text{pH} < 7.8$ 之测站测值区分(图4e)。仔鱼则在第三季(分别为0.47和0.06 ind./ m^3)以及全年(分别为1.26和0.16 ind./ m^3)呈现显著差异($P < 0.05$), 而其他季节差异则不显著

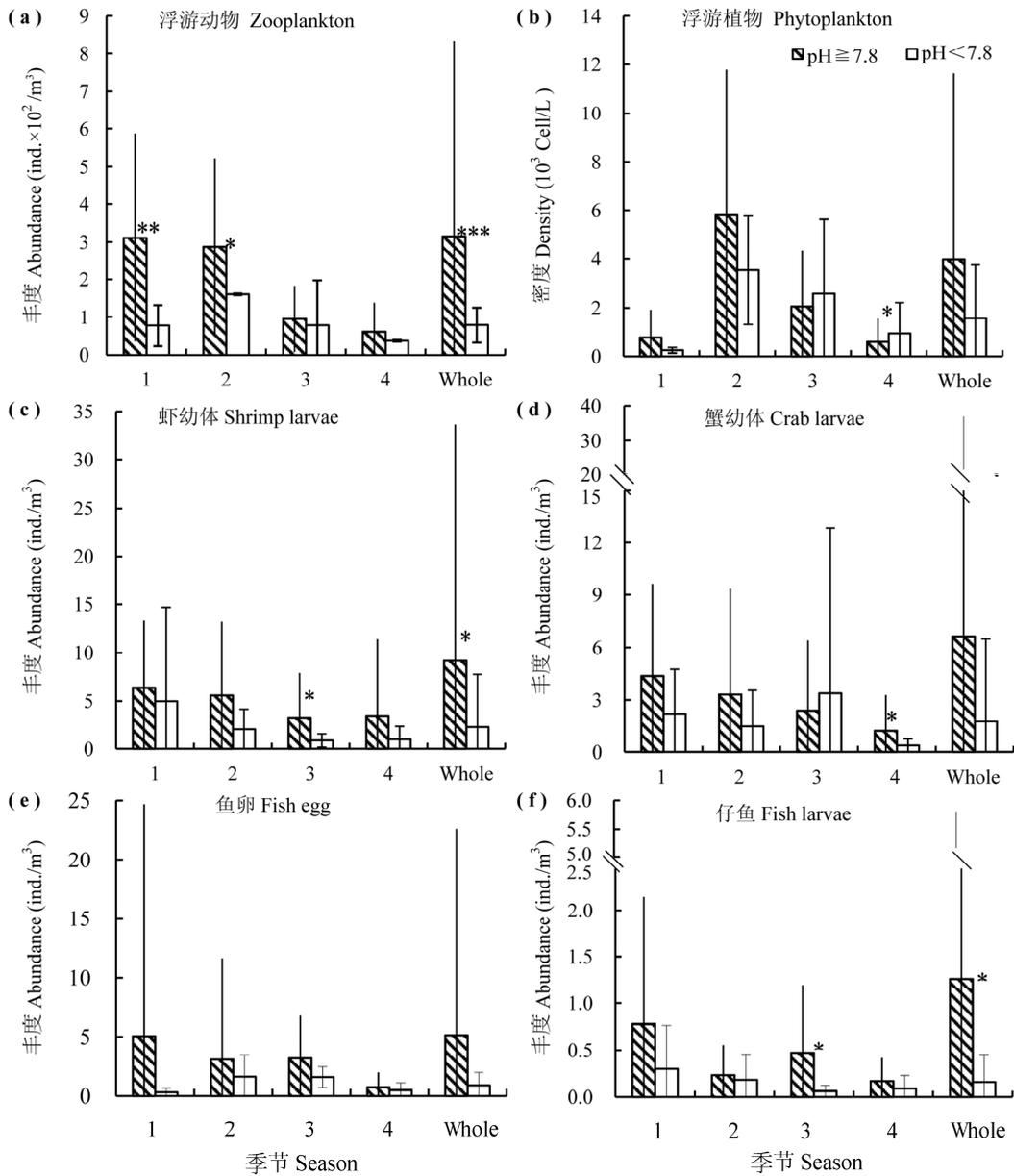


图4 2001年第三季至2010年第二季云林县台西乡沿岸的(a)浮游动物、(b)浮游植物、(c)虾幼体、(d)蟹幼体、(e)鱼卵和(f)仔鱼于水体pH高于或低于7.8时的丰度平均值。* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

Fig. 4 Comparison with the monitoring data of the pH>7.8 (blank bar) and pH<7.8 (shaded bar) from the third quarter 2001 to second quarter 2010 in the Taisi County, Yunlin, Southwestern Taiwan. (a) Abundance of zooplankton; (b) Density of phytoplankton; (c) Abundance of shrimp larvae; (d) Abundance of crab larvae; (e) Abundance of fish eggs; (f) Abundance of fish larvae. * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$.

($P < 0.05$) (图4f)。

3 讨论

从结果得知, 台西海域的浮游生物的丰度在10年(2000–2010年)中逐渐降低。全海域的浮游动物、虾幼体、蟹幼体、鱼卵和仔鱼高峰期的丰度大约

减少一半。2000年第三季之后, 海域水质有pH<7.8的测值, 经过进一步的分析比较, 同一次采样中水体pH高于与低于7.8时的浮游生物测值存在差异, 也显示全海域的浮游动物、虾幼体及仔鱼在水体pH<7.8时, 皆呈现显著的低值, 约是对照pH≥7.8测站的1/4。为了符合环境安全标准, 离岛工业区所

使用的排烟脱硫过程会利用海水中大量的可溶性碳酸盐与燃煤过程中所产生的硫进行中和反应,因此所排出的水会比导入的海水偏酸,待经过曝气及大量的海水混合后以达海域水质标准($\text{pH}>7.5$)。经本研究调查的结果,得知水体 $\text{pH}<7.8$ 时,即对海域中的各项浮游生物的丰度测值有显著的影响。因此,海域水质 pH 标准是否符合海洋生态保护之需,及海洋资源可持续发展的目标,是值得深入探讨的。

电厂运转后利用排烟脱硫的方式降低了空气酸化污染,却使海域 pH 值的下降成为必然的结果。以往许多针对排烟脱硫的技术报告中,对海域影响的说明都偏向保守,诸如对电厂短距离外的浮游生物丰度影响小(楚宪峰等, 2008)、4次监测计划中仅1次浮游植物不在正常范围内、底泥中的生物量虽有减少但需进一步调查(宋晓东, 2000)等等。深究其中原因,发现上述这些技术报告的调查时间都是在电厂设立运转之初的前3年内进行的,所呈现的现象为短期效应。由于海洋庞大的水体具有很大的稀释效应,短时间的点污染排放,只些微地影响少数的海洋生物,故不易在短期的调查中监测得知。然而,经由长期的监测调查,所有些微的变化会层层累积,其结果便最终反映在海洋浮游生物的丰度变化上。国外有研究指出,当 $\text{pH}<7.8$ 时,海葵双锯鱼的稚鱼会因无法分辨天敌的气味(Dixon et al, 2010)而增加了被捕食的压力,这虽然不会造成即时的危害,但增加了种群减少的可能。因此海域质量标准的提高,或是加强排水过程的控管,以减少对海洋生物的影响,都是未来应该加强努力改善的方向。

致谢: 本文得以完成感谢历年来本研究团队的全体学生、研究助理及船家在野外工作、样品分析等等多方协助,同时亦感谢台湾成功大学水工试验所和中兴顾问公司的行政协助。

参考文献

- Chu XF, Tian JR, Ma LK, Shi GL (2008) Impact of warm effluent from seawater flue gas desulphurization system on sea area environment. *China Water & Wastewater*, 24(14), 102–105. (in Chinese with English abstract) [楚宪峰, 田建茹, 马立科, 时国梁 (2008) 烟气海水脱硫温排水对海域环境的影响. *中国给水排水*, 24(14), 102–105.]
- Dixon DL, Munday PL, Jones GP (2010) Ocean acidification disrupts the innate ability of fish to detect predator olfactory cues. *Ecology Letters*, 13, 68–75.
- Hall-Spencer JM, Rodolfo-Metalpa R, Martin S, Ransome E, Fine M, Turner SM, Rowley SJ, Tedesco D, Buia MC (2008) Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*, 454, 96–99.
- Havenhand JN, Buttler FR, Thorndyke MC, Williamson JE (2008) Near-future levels of ocean acidification reduce fertilization success in a sea urchin. *Current Biology*, 18, 651–652.
- Munday PL, Dixon DL, Donelson JM, Jones GP, Pratchett MS, Devitsina GV, Doving KB (2009) Ocean acidification impairs olfactory discrimination and homing ability of a marine fish. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA*, 106, 1848–1852.
- Song XD (2000) On the influence of FLAKE-HYDRO FGD technology upon marine environment. *Journal of Shandong College of Electric Power*, 3(3), 44–48. (in Chinese with English abstract) [宋晓东 (2000) 浅谈烟气海水脱硫工艺排水对海洋环境的影响. *山东电力高等专科学校学报*, 3(3), 44–48.]
- Yamada Y, Ikeda T (1999) Acute toxicity of lowered pH to some oceanic zooplankton. *Plankton Biology and Ecology*, 46, 62–67.

(责任编辑: 孙军 责任编辑: 时意专)