

海洋浮游植物的热效应

廖一波^{1,2}, 陈全震^{1,2,*}, 曾江宁^{1,2}, 高爱根^{1,2}, 刘晶晶^{1,2}, 江志兵^{1,2}

(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. 农业部海洋与河口渔业重点开放实验室, 上海 200090)

摘要:采用热效应模拟实验方法研究了冬、夏两季温度对象山港海洋浮游植物种类组成、细胞密度的影响, 同时在冬季开展了温度对海水中叶绿素含量的影响研究。温度对浮游植物种类数和细胞密度的影响显著, 影响程度与季节、增温幅度和实验时间有关。当夏季(自然水温为 28℃)实验温度超过 36℃, 冬季(自然水温为 12℃)实验温度超过 34℃时, 浮游植物种类数和细胞密度均急剧减少。温度对浮游植物细胞密度的影响显著, 随着实验温度的升高, 浮游植物细胞密度与温度呈峰值关系。夏季实验当温度升高至 30℃时浮游植物细胞密度最高, 实验至第 7 天时的细胞密度达到最大值为 40.56 cells/dm³; 冬季实验当温度升高至 24℃时的浮游植物细胞密度最高, 实验至第 7 天时的细胞密度达到最大值为 625.8 cells/dm³。温度对冬季实验海水中叶绿素含量的影响显著, 并且冬季海水叶绿素浓度与浮游植物细胞密度呈显著的正相关性($r=0.81, p<0.01$)。实验结合自然海区海水温度的变化进行分析, 并探讨人们普遍关注的热(核)电厂建设与海洋生态效应的问题, 为冬、夏两季温排水对受纳海域的增温对浮游植物的热影响提供科学依据。

关键词:浮游植物; 细胞密度; 叶绿素; 热效应; 象山港

文章编号: 1000-0933(2008)09-4203-10 中图分类号: Q143, Q178.1 文献标识码: A

Thermal effect on the marine phytoplankton in Xiangshan Bay, China

LIAO Yi-Bo^{1,2}, CHEN Quan-Zhen^{1,2,*}, ZENG Jiang-Ning^{1,2}, GAO Ai-Gen^{1,2}, LIU Jing-Jing^{1,2}, JIANG Zhi-Bing^{1,2}

1 Key Laboratory of Marine Ecosystem and Biogeochemistry of SOA, Second Institute of Oceanography SOA, Hangzhou 310012, China

2 Key Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries, Ministry of Agriculture, Shanghai 200090, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4203 ~ 4212.

Abstract: Phytoplankton are a very important component of the coastal marine food chain. Thermal water discharged from power stations has become a serious problem for the coastal environment, but we still know very little about the potential impact of thermal effluents on the marine ecosystem. In this paper, species composition, cell density of phytoplankton and chlorophyll concentration were measured during a series of temperature controlled laboratory experimental incubations in summer (July) and winter (January). The natural sea water for the experiments was collected from Xiangshan Bay (Lat. 29°38'N Long. 121°41'E) near Ningbo City, Zhejiang Province. Phytoplankton samples were preserved with Lugol's iodine (1%) and analysed under the microscope and the chlorophyll concentration was measured according to routine protocol. The results showed that the main phytoplankton group was diatoms, with *Skeletonema costatum* being the dominant species. Diatom species composition was markedly influenced by temperature, which related to the seasons, the range of temperature elevation and experimental time. The species numbers declined rapidly when temperature surpassed 36℃ in

基金项目: 国家科技部社会公益研究专项资金资助项目(2004DIB3J087); 国家农业部海洋与河口渔业重点开放实验室资助项目

收稿日期: 2006-04-17; 修订日期: 2008-06-30

作者简介: 廖一波(1982~), 男, 浙江温岭人, 硕士生, 主要从事海洋生物学研究, E-mail: liaoyb@sohu.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Chenqz6509@126.com

Foundation item: The project was financially supported by Program on Research for Public Good of MOST(No. 2004D IB3J087); Foundation of the Key Laboratory of Marine and Estuarine Fisheries of Chinese Ministry of Agriculture

Received date: 2006-04-17; **Accepted date:** 2008-06-30

Biography: LIAO Yi-Bo, Master candidate, mainly engaged in marine biology. E-mail: liaoyb@sohu.com

summer when the ambient seawater temperature was 28℃, or 34℃ in winter when the seawater temperature was 12℃. Cell density of phytoplankton was also markedly influenced by temperature. In the summer experiment, the maximum cell density (40.56 cells/dm³) appeared at 30℃, and in winter, the maximum cell density (625.8 cells/dm³) appeared at 24℃, both of the maximums were observed in the 7th day of the experiments. The chlorophyll concentration of sea water was influenced by the ambient temperature as well, with the maximum chlorophyll concentration (42.61 μg/dm³) appearing at 24℃ in winter, which was positively correlated with the phytoplankton cell density in the winter experiment ($r = 0.81, p < 0.01$).

Key Words: phytoplankton; cell density; chlorophyll; thermal effect; Xiangshan Bay

人类工业活动的频繁引起许多生态系统热环境的改变,特别是滨海电厂在发电过程中产生的温排水对受纳海域生态环境的影响^[1],一座 1800~2000 MW 的直流冷却电厂的温排水排放量为 60 m³s⁻¹^[2],在直流冷却发电厂出水口水温将提高大约 8~12℃^[3],Martínez-Arroyo 等^[4]研究发现电厂出水口浮游植物种类、丰度、多样性指数和叶绿素浓度均低于进水口,温排水已成为一种潜在的大范围污染物质越来越受到人们的重视^[5]。海洋浮游植物是海洋生态系统中最主要的初级生产者,也是海洋食物链的重要组成部分^[6],它不仅为鱼类仔稚期、甲壳动物和软体动物提供食物和必需的营养成分,并且可以用来指示海洋水体的质量^[7,8]。在众多海洋环境因子中,温度是影响浮游植物生长繁殖、群落结构、生理生化以及遗传性状的重要因子之一^[4,9~14],因此温排水通过对受纳海域浮游植物的种群结构与丰度的直接影响,从而进一步影响近海海洋生态系统。

我国早期电厂大多建造在江河流域附近,但由于淡水资源的缺乏和为了满足电厂大量冷却水的需求,近年来越来越多的大型热(核)电厂建造在河口或沿海地区,以充分利用海水的冷却作用,然而温排水把热(核)电厂产生的巨大热能传递到附近水域,致使水温升高,从而影响近海海洋生态系统。由于我国热(核)电厂建设起步较晚,缺乏有关温排水对浮游植物种群结构和丰度的影响研究,本文采用室内热效应模拟实验方法研究了冬、夏两季温升对海洋浮游植物种类组成和浮游植物细胞丰度的影响,同时在冬季开展了温升对水体中叶绿素含量的影响研究,旨在为温排水的海洋生态效应研究和滨海热(核)电厂的合理布局提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料来源

实验于 2005 年 7 月份(夏季)和 1 月份(冬季)进行,实验用水于小潮涨潮期间(水体透明度较高)取自象山港中部(Lat. 29°38'N, Long. 121°41'E)(图 1),并用 100 目筛绢滤去浮游动物后待用。实验用水的水质状况见表 1。

表 1 实验用水水质状况
Table 1 Items of water quality used in experiment

项目 Items	夏季 Summer	冬季 Winter
温度 Temperature (℃)	28.0	12.0
盐度 Salinity	27.7	24.9
悬浮物 Suspended particulate matter (mg/dm ³)	6	17.4
pH 值 pH value	8.09	8.20
化学需氧量 Chemical oxygen demand (mg/dm ³)	0.17	0.83
活性磷酸盐 Reactive phosphate (μmol/dm ³)	0.935	1.516
无机氮 Inorganic nitrogen (μmol/dm ³)	44.071	77.000
非离子氨 Unionized ammonia (μmol/dm ³)	0.030	0.019
亚硝酸盐 Nitrite (μmol/dm ³)	1.643	0.357
硝酸盐 Nitrate (μmol/dm ³)	41.929	75.786
铵盐 Ammonia (μmol/dm ³)	0.500	0.857

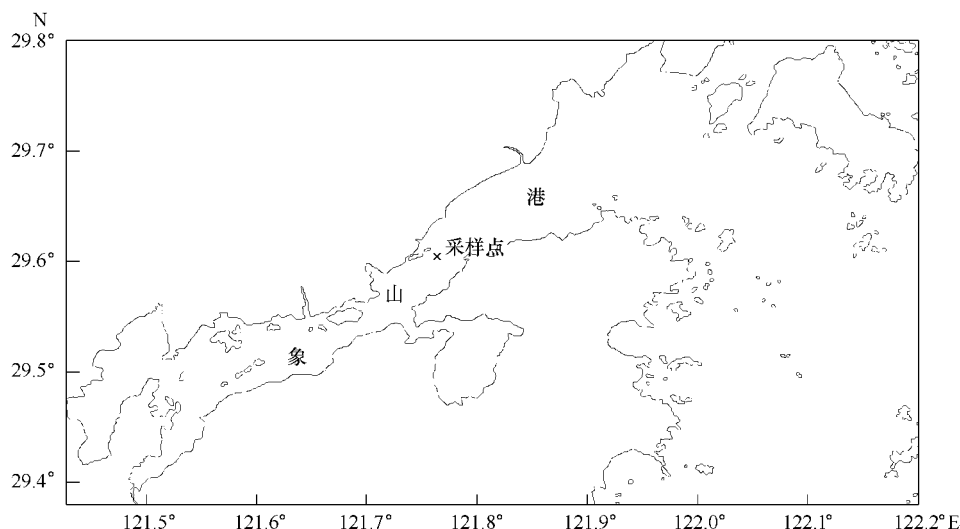


图1 象山港中部海水采样点

Fig. 1 Sampling stations of sea water used in experiment in Xiangshan Bay

1.2 加热方式和光照

实验容器采用干净的 50 cm × 50 cm × 25 cm (62.5 dm³) 水族箱, 实验用水为 50 dm³, 并且设置以自然水温作为实验对照组, 按 2℃ 温差设置温度梯度, 最高温度组为 40℃。以电热棒 (1000W) 对水族箱水体进行加热, WMZK-01 型自动控温仪控制水温, 经精密水银温度计校正, 控温精确度为 ±0.2℃。实验过程中利用充气泵对水族箱海水进行缓慢充气, 保持水族箱内水温分布均匀。当海水升至设置的实验温度后开始计时。光照强度 (日光灯) 为 (1500 ± 100) lx, 光照周期为 12:12, 光照强度用 ZDS-10 型自动量程光照度计 (上海市嘉定学联仪表厂) 测定。

1.2 浮游植物种类组成与细胞密度

每隔 1d 取每组实验温度水样 500 cm³, 样品用 1% 鲁哥氏液 (Lugol's solution) 固定, 样品经浓缩后用 0.1 cm³ 浮游植物计数框于显微镜 (Olympus BH-2) 下进行物种鉴定和细胞计数, 每个温度梯度组取 2 次样计数, 取平均值, 实验操作依照《海洋调查规范》^[15] 的方法进行。

1.3 叶绿素浓度

海水中叶绿素浓度测定采用分光光度法。每隔 1d 取每组实验温度水样 1 dm³, 以 Wateman GC/F 滤膜进行减压过滤, 抽滤压力小于 50 kPa, 为控制叶绿素降解作用, 过滤前, 先加入 5 cm³ 浓度为 10 g/dm³ 的 MgCO₃ 悬浊液, 将截留浮游植物的滤膜置于萃尿管内, 加 10 cm³ 体积分数为 90% 的丙酮溶液低温黑暗萃取 30 min, 提取期间振荡样品 3 ~ 4 次以充分萃取。提取液于 4000 r/min 条件下离心 10min 后取上清液, 并用 90% 丙酮定容为 10 ml, 所得样品经离心后用普析 T6 新世纪紫外可见分光光度计在 750、664、647 nm 和 630 nm 波段处进行测量。测定海水中的总叶绿素浓度, 依照《海洋调查规范》^[15] 的方法及有关计算公式:

$$\rho(\text{Chl}) = \rho(\text{Chl a}) + \rho(\text{Chl b}) + \rho(\text{Chl c})$$

式中, $\rho(\text{Chl})$ 为海水中叶绿素总浓度 (μg/dm³); $\rho(\text{Chl a})$ 为海水中叶绿素 a 的浓度 (μg/dm³); $\rho(\text{Chl b})$ 为海水中叶绿素 b 的浓度 (μg/dm³); $\rho(\text{Chl c})$ 为海水中叶绿素 c 的浓度 (μg/dm³)。

2 结果

2.1 温度对浮游植物种类组成的影响

冬、夏两季自然海水水样中共观察到浮游植物 20 种 (表 2), 其中硅藻 18 种, 甲藻 2 种, 硅藻为浮游植物中的主要类群, 中肋骨条藻 (*Skeletonema costatum*) 为优势种。在夏季实验中共观察到浮游植物 16 种, 其中硅藻 14 种, 占浮游植物种类数的 87.5%, 甲藻 2 种, 占浮游植物种类数的 12.5%; 在冬季实验中共观察到浮游

植物 12 种,全部是硅藻。

表 2 自然海水水样中浮游植物的种类组成

Table 2 Species composition of phytoplankton in the natural seawater sample

种名 Species *	夏季 Summer	冬季 Winter
中肋骨条藻 <i>Skeletonema costatum</i> (Grev.) Cleve	+	+
具槽直链藻 <i>Melosira sulcata</i> (Ehr.) Kuetz.		+
念珠直链藻 <i>Melosira moniliformis</i> (O. F. Mull.) Ag.		+
拟货币直链藻 <i>Melosira nummuloides</i> (Dillw.) Ag.		+
丹麦细柱藻 <i>Leptocylindrus danicus</i> Cleve		+
琼氏圆筛藻 <i>Coscinodiscus jonesianus</i> (Grev.) Ostenf.	+	+
辐射圆筛藻 <i>Coscinodiscus radiatus</i> Ehr.	+	+
布氏双尾藻 <i>Ditylum brightwelli</i> (West) Grun.	+	+
奇异菱形藻 <i>Nitzschia paradoxa</i> (Grev.) Grun.	+	
尖刺拟菱形藻 <i>Pseudo-Nitzschia pungens</i> Grun.	+	+
长菱形藻 <i>Nitzschia longissima</i> (Breb.) Ralfs	+	+
舟形藻 <i>Navicula</i> sp.	+	+
舟形斜纹藻 <i>Pleurosigma naviculaceum</i> Breb.	+	
窄隙角毛藻 <i>Chaetoceros affinis</i> Lauder	+	+
旋链角毛藻 <i>Chaetoceros curvisetus</i> Cleve	+	
日本星杆藻 <i>Asterionella japonica</i> Cleve	+	
肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> (Nitz.) Ehr.	+	
短楔形藻 <i>Licmophora abbreviata</i> Agardh	+	
纺锤角藻 <i>Ceratium fusus</i> (Ehr.) Dujardin	+	
叉角藻 <i>Ceratium furca</i> (Ehr.) Clap. et Lach	+	

* 下同 the same below

温度对夏季和冬季浮游植物种类组成的影响分别见图 2,3(起始数据和第 3,7 天浮游植物种类组成数据表 6,表 7)。实验结果表明,温度对浮游植物的种类组成影响显著,影响的程度与季节、增温幅度和实验时间有关。在夏季实验中,随着温度的升高,实验时间的延长,浮游植物种类数逐渐减少。例如,自然海水水样中共观察到浮游植物 16 种。当实验至第 7 天时,28℃ 实验对照组中有 12 种浮游植物;而 38℃ 实验组中只有中肋骨条藻,琼氏圆筛藻和辐射圆筛藻等 3 种浮游植物;40℃ 实验组中只有中肋骨条藻 1 种浮游植物。

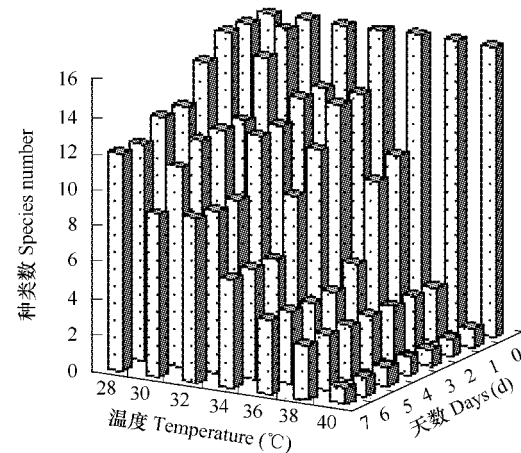


图 2 温度对夏季浮游植物种类组成的影响

Fig. 2 Effects of temperature on phytoplankton composition in summer experiment

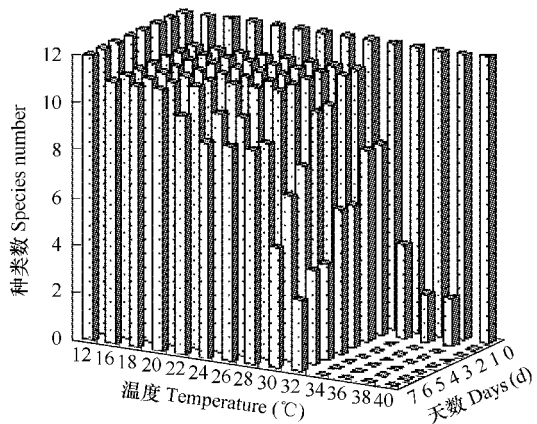


图 3 温度对冬季浮游植物种类组成的影响

Fig. 3 Effects of temperature on phytoplankton composition in winter experiment

在冬季实验中,自然海水水样中共观察到浮游植物 12 种,当实验温升低于 30℃ 时,浮游植物的种类组成

并没有显著变化,但是当实验温升超过 32℃ 时,浮游植物种类明显减少。当实验至第 7 天时,12℃ 实验对照组中有 12 种浮游植物;16、18℃ 和 20℃ 实验组中仍有 11 种浮游植物;22℃ 实验组中有 10 种浮游植物;而 30℃ 实验组中只有 5 种浮游植物;32℃ 实验组中只有中肋骨条藻,辐射圆筛藻和长菱形藻等 3 种浮游植物;34、36、38℃ 和 40℃ 实验组中浮游植物几乎全部死亡。

2.2 温度对浮游植物细胞密度的影响

夏季实验中温度对浮游植物细胞密度的影响结果见表 3。实验结果表明,随着实验温度的升高,浮游植物细胞密度与温度呈峰值关系。在不同的实验温度梯度中,30℃ 实验组的浮游植物细胞密度在相同的实验时间(1~7 d)内均最高,实验至第 7 天时的细胞密度为 40.56 cells/dm³。28、30、32、34℃ 和 36℃ 实验组,随着实验时间的延长,浮游植物表现为增长趋势,并且浮游植物的增长速率为 30℃ > 28℃ > 32℃ > 34℃ > 36℃。38℃ 和 40℃ 实验组,随着实验时间的延长,浮游植物生长繁殖受到抑制,细胞密度逐渐下降,而且下降幅度随着温度升高而加剧,实验至第 7 天时,38℃ 实验组的浮游植物细胞密度从起始密度为 8.6 × 10³ cells/dm³ 减少到 8.19 × 10³ cells/dm³,而 40℃ 实验组实验至第 7 天时的浮游植物全部死亡。

表 3 夏季温度对浮游植物细胞密度的影响

Table 3 Effects of temperature on phytoplankton cell density in summer experiment

温度(℃) Temperature	浮游植物细胞密度 Phytoplankton cell density (×10 ³ cells/dm ³)							
	0d	1d	2d	3d	4d	5d	6d	7d
28 (对照组 CK)	8.6	10.88	15.06	18.03	19.85	23.49	25.82	30.40
30	8.6	10.98	16.24	20.09	23.12	28.45	32.89	40.56
32	8.6	10.59	14.73	17.58	18.94	22.17	23.38	25.94
34	8.6	10.41	13.74	16.11	16.92	19.12	19.87	21.66
36	8.6	10.23	13.25	15.11	15.78	17.93	18.41	19.87
38	8.6	6.74	8.15	8.37	8.14	8.52	8.05	8.19
40	8.6	1.49	1.18	1.07	0.57	0.21	0.05	0

夏季实验中温度对浮游植物细胞密度的影响结果见表 4。实验结果表明,随着实验温度的升高,浮游植物细胞密度与温度呈峰值关系。24℃ 实验组的浮游植物细胞密度在相同的实验时间(1~7 d)内均最高。

表 4 冬季温度对浮游植物细胞密度的影响

Table 4 Effects of temperature on phytoplankton cell density in winter experiment

温度(℃) Temperature	浮游植物细胞密度 Phytoplankton cell density (×10 ³ cells/dm ³)							
	0d	1d	2d	3d	4d	5d	6d	7d
12 (对照组 CK)	48.43	93.2	97.28	98	104.32	104.19	108.2	123.3
16	48.43	107.91	113.72	113.12	120.58	122.36	131.35	146.7
18	48.43	109.78	112.07	113.34	120.04	129.69	138.15	146.48
20	48.43	115.91	112.8	117.52	121.58	136.38	180.11	242.4
22	48.43	155.72	134.36	123.56	134.62	185.83	263.2	399.88
24	48.43	170.49	144.75	137.92	150.16	219.725	391.89	625.8
26	48.43	139.29	115.74	118.13	124.06	162.43	226.23	324.13
28	48.43	83.57	76.24	67.23	61.89	60.24	60.79	59.59
30	48.43	72.47	55.88	50.42	44.57	37.92	34.99	32.97
32	48.43	17.55	12.88	4.04	5.28	1.8	3.06	2.36
34	48.43	4.32	0	0	0	0	0	0
36	48.43	1.14	0	0	0	0	0	0
38	48.43	2.16	0	0	0	0	0	0
40	48.43	0	0	0	0	0	0	0

12℃、16℃和18℃实验组,随实验时间的延长,浮游植物表现为稳定的增长趋势,并且浮游植物的增长速率分别为18℃ > 16℃ > 12℃。20、22、24℃和26℃实验组,随着实验时间的延长,浮游植物细胞密度总体表现为上升趋势,但是实验至2 d ~ 3 d时浮游植物细胞密度有个减少的过程,随后浮游植物均继续增长,并且浮游植物增长速率为24℃ > 22℃ > 26℃ > 20℃。28 ~ 40℃实验组,随着实验温度的升高,浮游植物细胞密度总体表现为降低的趋势,而且浮游植物细胞密度减少速率随着温度升高而加快。28℃和30℃实验组,实验至第2天时,浮游植物细胞密度达到最大值,随后逐渐降低;32℃实验组,实验至第7天时,浮游植物细胞密度从起始密度为 $48.43 \times 10^3 \text{ cells/dm}^3$ 减少到 $2.36 \times 10^3 \text{ cells/dm}^3$,34、36℃和38℃实验组,实验至第2天时浮游植物全部死亡;40℃实验组,实验至第1天时浮游植物就已全部死亡。

2.1 温度对冬季海水中叶绿素浓度的影响

冬季实验中温度对海水叶绿素浓度的影响结果见表5。实验结果表明,随着实验温度的升高,叶绿素浓度与温度呈峰值关系。24℃实验组海水叶绿素浓度在相同的实验时间(1 ~ 7 d)内均最高。实验至第7天时的叶绿素浓度达到 $42.61 \mu\text{g/dm}^3$ 。12℃和16℃实验组,随实验时间的延长,叶绿素浓度表现为上升趋势,并且增长速率为16℃ > 12℃。18 ~ 26℃实验组,随着实验时间的延长,海水叶绿素浓度总体表现为上升趋势,但是当实验至第2天时,叶绿素浓度有个降低的过程,随后继续增加,而且增长速率为24℃ > 22℃ > 26℃ > 20℃ > 18℃。28 ~ 40℃实验组,随着实验温度的上升,叶绿素浓度总体呈下降趋势,而且下降速率随着温度升高而加快。28℃和30℃实验组,实验至第2天时,海水中叶绿素浓度达到最大值,分别为 $26.26 \mu\text{g/dm}^3$ 和 $22.42 \mu\text{g/dm}^3$,随后叶绿素浓度逐渐降低,实验至第7天时的叶绿素浓度分别为 $21.34 \mu\text{g/dm}^3$ 和 $16.25 \mu\text{g/dm}^3$ 。36℃和38℃实验组,实验至第6天时;40℃实验组,实验至第2天时海水中叶绿素浓度就已经低于分光光度法的检测限。

叶绿素是自养植物细胞中很重要的色素,是植物进行光合作用时吸收和传递光能的主要物质。而浮游植物是海洋自养植物中的主要类群,其叶绿素含量在海水叶绿素含量中的占主导作用。不同温度和实验时间下,冬季海水中叶绿素浓度(表5)和浮游植物细胞密度(表4)的所有数据进行相关性分析,结果表明,冬季实验中,海水叶绿素浓度与浮游植物细胞密度呈显著的正相关性($r = 0.81, p < 0.01$)。

表5 温度对冬季叶绿素含量的影响
Table 5 Effects of temperature on chlorophyll concentration in winter experiment

温度(℃) Temperature	叶绿素含量 Chlorophyll concentration ($\mu\text{g/dm}^3$)							
	0d	1d	2d	3d	4d	5d	6d	7d
12 (CK)	18.68	21.49	22.12	22.28	22.34	22.62	23.15	24.57
16	18.68	23.09	23.27	23.97	24.08	24.45	25.16	26.26
18	18.68	25.79	24.27	24.32	24.77	25.02	26.67	29.10
20	18.68	27.32	25.71	26.28	26.94	28.42	29.20	31.90
22	18.68	29.70	27.76	28.09	29.55	30.49	32.37	35.68
24	18.68	33.18	30.38	30.72	31.97	33.40	36.62	42.61
26	18.68	31.77	28.78	28.95	29.85	30.76	31.85	32.83
28	18.68	26.26	25.55	23.40	22.92	22.09	22.23	21.34
30	18.68	22.42	20.65	16.55	15.78	15.52	14.66	16.25
32	18.68	12.45	7.36	4.01	4.10	2.60	1.98	2.00
34	18.68	11.39	5.08	3.35	2.76	2.41	0.57	0.06
36	18.68	4.59	2.74	1.87	2.10	0.91	—	—
38	18.68	2.31	2.16	1.80	1.64	0.51	—	—
40	18.68	0.64	—	—	—	—	—	—

3 讨论

3.1 温度对浮游植物种类组成的影响

温度是影响浮游植物种类组成的重要环境因素,浮游植物种类组成的变化体现了温升对浮游植物种群演替的影响。实验结果表明,温度对浮游植物种类组成的影响显著,影响的程度与季节、增温幅度和实验时间有关。在夏季,琼氏圆筛藻和辐射圆筛藻所能耐受的最高温度为 38℃,而在冬季,这两种浮游植物所能耐受的最高温度仅为 34℃,并且实验第 2 天就全部死亡;又如窄隙角毛藻,在夏季所能耐受的最高温度为 36℃,实验第 3 天全部死亡,在冬季所能耐受的最高温度仅为 32℃,而且实验第 3 天就全部死亡,说明不同季节条件下,同一种浮游植物的高温耐受能力存在差异,并且夏季浮游植物的高温耐受能力强于冬季,这种现象与虾类的有关热效应文献报道一致^[16~18]。

表 6 温度对夏季浮游植物种类组成的影响

Table 6 Effects of temperature on phytoplankton composition in summer experiment

种类 Species	28℃ (对照组 CK)			30℃			32℃			34℃			36℃			38℃			40℃		
	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d
中肋骨条藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
琼氏圆筛藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
辐射圆筛藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		
窄隙角毛藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+			+			+		
旋链角毛藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+			+			+		
舟形藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+			+		
舟形斜纹藻	+	+		+			+			+			+			+			+		
长菱形藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+		
奇异菱形藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+			+			+		
尖刺菱形藻	+	+	+	+	+		+	+		+			+			+			+		
布氏双尾藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+			+		
肘状针杆藻	+	+		+			+			+			+			+			+		
日本星杆藻	+	+	+	+	+		+	+		+	+		+			+			+		
短楔形藻	+	+	+	+			+			+			+			+			+		
梭角藻	+	+		+	+		+	+		+	+		+	+		+			+		
叉分角藻	+			+			+			+			+			+			+		

表 7 温度对冬季浮游植物种类组成的影响

Table 7 Effects of temperature on phytoplankton composition in winter experiment

种类 Species	12℃ (对照组 CK)			16℃			18℃			20℃			22℃			24℃			26℃		
	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d	0d	3d	7d
中肋骨条藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
念珠直链藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
拟货币直链藻	+	+	+	+			+			+			+			+			+		
具槽直链藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+		+	+	
丹麦细柱藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	+	
琼氏圆筛藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
辐射圆筛藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
窄隙角毛藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
舟形藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
长菱形藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
尖刺菱形藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
布氏双尾藻	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

在夏季,当实验至第7天时,28℃实验组中有12种浮游植物;30℃和32℃实验组中有9种浮游植物;而38℃实验组中只有3种浮游植物;40℃实验组中只有中肋骨条藻1种浮游植物。在冬季当实验至第7天时,12℃实验组中有12种浮游植物;16、18℃和20℃实验组中有11种浮游植物;而30℃实验组中只有5种浮游植物;32℃实验组中只剩3种浮游植物;34、36、38℃和40℃实验组中浮游植物均全部死亡,说明在同一季节中,随着增温幅度的加大,浮游植物种类数逐渐减少,这主要是由于某些浮游植物无法耐受升高的温度,生长繁殖受到抑制,甚至导致死亡。

另外,相同的季节和实验温度条件下,随着实验时间的延长,浮游植物种类数也会逐渐减少。如夏季32℃实验组中,实验至第7天时浮游植物的种类数由自然水样中的16种减少至9种,冬季32℃实验组中,实验至第7天时浮游植物种类数由自然水样中的12种减少至3种。

3.2 温度对浮游植物细胞密度的影响

温度对浮游植物细胞密度具有显著的影响,鲁光四等^[19]研究发现温度与藻类细胞总数之间存在十分明显的相关性,并且证明了该相关性因不同季节而呈明显差异。实验结果表明,随着实验温度的升高,浮游植物细胞密度与温度呈峰值关系。在充足的光照条件下,弱增温对浮游植物生长繁殖起促进作用^[20],本实验中当夏季 $\Delta T \leq 8^\circ\text{C}$,冬季 $\Delta T \leq 14^\circ\text{C}$ 时,浮游植物细胞密度总体随着实验时间延长而呈现增长趋势,说明浮游植物种类数逐渐增加,然而随着实验温度的升高,浮游植物生长速率与温度呈现峰值关系,夏季30℃实验组,冬季24℃实验组,浮游植物生长速率达到最大值,这一研究规律与邓光等^[21]对锥状斯氏藻和塔玛亚历山大藻,张宝玉等^[22]对雨生红球藻,Ono等^[23]对赤潮异弯藻 *Heterosigma akashiwo* 的研究结果一致。在冬季实验中,20~26℃实验组,随着实验时间的延长,浮游植物细胞密度总体表现为上升趋势,但是实验至2~3 d时浮游植物细胞密度有减少的趋势,随后浮游植物均继续增长繁殖,而且浮游植物生长速率为 $24^\circ\text{C} > 22^\circ\text{C} > 26^\circ\text{C} > 20^\circ\text{C}$,这主要是由于温度的升高,浮游植物种类演替的结果,实验初期由于某些浮游植物不适应温度的升高而种类数逐渐减少,从而使得浮游植物细胞密度总量的减少,然而随着实验时间的延长,新的浮游植物优势种类逐渐形成,并且迅速生长繁殖,因此浮游植物细胞密度总数逐渐增加。Wilde和Tilly^[10]研究发现温度对藻类优势种丰度影响显著,当温度升高超过12.5℃时,红藻逐渐消失,并且当温度超过30℃时,蓝绿藻逐渐占据优势,而且对某些藻类起抑制作用。

当夏季 $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$,冬季 $\Delta T \geq 18^\circ\text{C}$ 时,随着实验温度的升高,浮游植物细胞密度逐渐减少,说明浮游植物种类数随着温度的升高而逐渐减少。造成这个现象的主要原因可能是随着温度的升高,浮游植物光合作用受到抑制而无法进行正常的新陈代谢和生长繁殖。Rajadurai等^[24]研究发现2种硅藻(锥胞角刺藻 *Chaetoceros wighami* 和咖啡双眉藻 *Amphora coffeaeformis*)的生长速率随着温度的升高(28~40℃)而逐渐降低。Coles和Jones^[25]研究认为浮游植物生长速率与最大光合速率呈正相关性,Davison^[26]研究证明浮游植物的光合速率受温度制约,Morris和Glover^[27]研究发现超过一定温度范围时海洋藻类的光合速率下降,二氧化碳吸收力受到抑制,Martínez-Arroyo等^[4]研究墨西哥湾电厂温排水排放附近高温区的浮游植物光合速率有不同程度的降低,并且光照需求较高($> 500 \mu\text{E m}^{-2} \text{s}^{-1}$)。Coles和Jones^[25]研究当温度超过20℃时硅藻(浮生直链藻属 *Aulacoseira granulata*)的光合速率降低,然而对蓝藻(铜锈微囊藻 *Microcystis aeruginosa* Kutz.、微小平裂藻 *Merismopedia tenuissima* Lemm. 和颤藻 *Oscillatoria* sp.)的研究却发现其光合速率随着温度的升高而增加,可见温度对浮游植物的光合作用影响因浮游植物种类而异。

3.3 温度对水体叶绿素浓度影响

河口和沿海生态系统中,浮游植物群落由许多不同种类的藻类组成,而浮游植物的分布由各种不同的环境因素和生物学因素共同决定的^[28],浮游植物的叶绿素浓度虽然不能体现浮游植物群落的种类组成,但是通常可以表现出浮游植物群落中生物量的大小,实验结果表明,冬季海水叶绿素浓度与浮游植物细胞密度呈显著的正相关性($r = 0.81, p < 0.01$)。

温度对浮游植物的叶绿素浓度影响显著,随着实验温度的升高,叶绿素浓度与温度呈峰值关系,该结果与

Boylen 和 Brock^[29] 报道的结果相一致,而 Coles 和 Jones^[25] 对 4 种浮游植物包括蓝藻(铜锈微囊藻 *M. aeruginosa* Kutz.、微小平裂藻 *M. tenuissima* Lemm. 和颤藻 *Oscillatoria* sp.) 和硅藻(浮生直链藻属 *A. granulata*) 的研究发现叶绿素 a 浓度随着温度(10℃ ~ 30℃) 的升高而增加,并没有出现随着随着温度升高叶绿素 a 浓度降低现象,这可能是由于不同浮游植物的适温性存在差异。当夏季 $\Delta T \leq 8^\circ\text{C}$, 冬季 $\Delta T \leq 14^\circ\text{C}$ 时,海水中叶绿素浓度总体呈现增长趋势,说明浮游植物群落生物量逐渐增加,但是随着实验温度的升高,叶绿素浓度的增长速率与温度呈现峰值关系,夏季 30℃ 实验组,冬季 24℃ 时实验组,叶绿素浓度的增长速率达到最大值。当夏季 $\Delta T \geq 10^\circ\text{C}$, 冬季 $\Delta T \geq 18^\circ\text{C}$ 时,随着实验温度的升高,海水中叶绿素浓度逐渐降低,说明浮游植物群落生物量随着温度的升高而逐渐减少,Pane 等^[9] 利用热重(量)分析法(thermogravimetry, TG) 和微分热分析法(differential thermal analysis, DTA) 对绿藻 *Tetraselmis suecica* 进行研究,证明了高温使藻类叶绿素 a 浓度和蛋白质含量的降低。

References:

- [1] Tsuchida S. The relationship between upper temperature tolerance and final preferendum of Japanese marine fish. J. Therm. Biol., 1995, 20 (1-2): 35—41.
- [2] Bamber R N, Seaby R M H. The effects of power station entrainment passage on three species of marine planktonic crustacean, *Acartia tonsa* (Copepoda), *Crangon crangon* (Decapoda) and *Homarus gammarus* (Decapoda). Marine Environmental Research, 2004, 57(4): 281—294.
- [3] Bamber R N. The influence of rising background temperature on the effects of marine thermal effluents. J. Therm. Biol., 1995, 20 (1-2): 105—110.
- [4] Martínez-Arroyo A, Abundes S, González M E, et al. On the influence of hot-water discharges on phytoplankton communities from a coastal zone of the gulf of Mexico. Water, Air, and Soil Pollution, 2000, 119(1-4): 209—230.
- [5] Langford T E L, Ecological Effects of Thermal Discharges, Elsevier Applied, Science London, 1990. 468.
- [6] Poornima E H, Rajadurai M, Raob T S, Impact of thermal discharge from a tropical coastal power plant on phytoplankton. J. Therm. Biol., 2005, 30(4): 307—316.
- [7] Guseva V P, Chebotina M Ya. Changes in Plankton Abundance, Biomass, and Chemical Composition under the Influence of the Cooling System of the Beloyarsk Nuclear Power Plant. Ekologiya, 2000, 31(1): 28—35.
- [8] Díaz-Pardo E, Vázquez G, López-López E. The phytoplankton community as a bioindicator of health conditions of Atezca Lake, Mexico. Aquatic Ecosystem Health and Management, 1998, 1(3-4): 257—266.
- [9] Pane L, Franceschi E, De Nuccio L. Applications of thermal analysis on the marine phytoplankton, *Tetraselmis suecica*. J. Therm. Anal. Cal., 2001, 66(1): 145—154.
- [10] Wilde E W, Tilly L J. Structural characteristics of algal communities in thermally altered artificial streams. 1981, 76 (1-2): 57—63.
- [11] de Castro Araújo S, Garcia V M T. Growth and biochemical composition of the diatom *Chaetoceros* cf. *wighamii* brightwell under different temperature, salinity and carbon dioxide levels. I. Protein, carbohydrates and lipids. Aquaculture, 2005, 246 (1-4): 405—412.
- [12] Yang D F, Gao Z H, Chen Y, et al. Influence of seawater temperature on phytoplankton growth in Jiaozhou Bay, China. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2004, 22(2): 166—175.
- [13] Rousch J M, Bingham S E, Sommerfeld M R. Protein expression during heat stress in thermo-intolerant and thermo-tolerant diatoms. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 2004, 306(2): 231—243.
- [14] Kinoshita S, Kaneko G, Lee J H, et al. A novel heat stress-responsive gene in the marine diatom *Chaetoceros compressum* encoding two types of transcripts, a trypsin-like protease and its related protein, by alternative RNA splicing. Eur. J. Biochem., 2001, 268(17): 4599—4609.
- [15] National Technology Administration of China. Marine Biology Investigation. Criterion of Marine Investigation. Beijing: China Standard Press, 1992.
- [16] Díaz Herrera F, Sierra Uribe E, Bückle Ramirez L F, et al. Critical thermal maxima and minima of *Macrobrachium rosenbergii* (Decapoda: Palaemonidae). J. Therm. Biol., 1998, 23(6): 381—385.
- [17] Hernández Rodríguez M, Bückle Ramirez L F, Díaz Herrera F. Critical thermal maxima of *Macrobrachium Tenellum*. J. Therm. Biol., 1996, 21 (2): 139—143.
- [18] Cai Z P, Chen H R. Thermal effects of temperature on two commercially important shrimp species in Daya Bay. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25 (5): 1115—1122.
- [19] Lu G S, Li P H, Tan Z S, et al. Analysis of Eutrophication Trend for Douhe Reservoir and Remediation Countermeasures. China Institute of Water

Resources and Hydropower Research, 2001, (3): 22–25.

- [20] Olli K. Diel vertical migration of phytoplankton and heterotrophic flagellates in the Gulf of Riga. *Journal of Marine Systems*, 1999, 23(1-3): 145–163.
- [21] Deng G, Li Y G, Hu H J, *et al.* Effects of temperature, light and pH on photosynthesis, and of light-dark cycle on growth rate and biomass of *Scrippsiella trochoidea* and *Alexandrium tamarense*. *Journal of Wuhan Botanical Research*, 2004, 22(2): 129–135.
- [22] Zhang B Y, Li Y G, Li Z K, *et al.* Effects of temperature, light intensity and pH on photosynthesis and growth rate of *Haematococcus pluvialis*. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2003, 34(5): 558–565.
- [23] Ono K, Khan S, Onoue Y. Effects of temperature and light intensity on the growth and toxicity of *Heterosigma akashiwo* (Raphidophyceae). *Aquaculture Research*, 2000, 31(5): 427–433.
- [24] Rajadurai M, Poornima E H, Narasimhan S V, *et al.* Phytoplankton growth under temperature stress: Laboratory studies using two diatoms from a tropical coastal power station site. *Journal of Thermal Biology*, 2005, 30(4): 299–305.
- [25] Coles J F, Jones R C. Effect of temperature on photosynthesis-light response and growth of four phytoplankton species isolated from a tidal freshwater river. *J. Phycol.*, 2000, 36(1): 7–16.
- [26] Davison I R. Environmental effects on algal photosynthesis: Temperature. *Journal of Phycol.*, 1991, 27(1): 2–8.
- [27] Morris I, Glover H E. Questions on the mechanism of temperature adaptation in marine phytoplankton. *Marine Biology*, 1974, 24(2): 147–154.
- [28] Adolf J E, Yeager C L, Miller W D, *et al.* Environmental forcing of phytoplankton floral composition, biomass, and primary productivity in Chesapeake Bay, USA. *Estuarine coastal and Shelf Science*, 2006, 67(1-2): 108–122.
- [29] Boylen C W, Brock T D. Effects of thermal additions from the Yellowstone geyser basins on the benthic algae of the Firehole river. *Ecology*, 1973, 54(6): 1282–1291.

参考文献:

- [15] 国家技术监督局. 海洋生物调查, 海洋调查规范. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [18] 蔡泽平, 陈浩如. 大亚湾两种重要经济虾类热效应. *生态学报*, 2005, 25(5): 1115–1122.
- [19] 鲁光四, 李平衡, 覃宗善, 等. 陡河水库富营养化趋势分析与防治对策. *水资源保护*, 2001, (3): 22–25.
- [21] 邓光, 李夜光, 胡鸿钧, 等. 温度、光照和 pH 值对锥状斯氏藻和塔玛亚历山大藻光合作用的影响及光暗周期对其生长速率和生物量的影响. *武汉植物学研究*, 2004, 22(2): 129–135.
- [22] 张宝玉, 李夜光, 李中奎, 等. 温度、光照强度和 pH 对雨生红球藻光合作用和生长速率的影响. *海洋与湖沼*, 2003, 34(5): 558–565.