

温排水对围隔生态系统各粒级海洋浮游生物的影响

蔡泽富, 杨红*, 焦俊鹏, 丁丽丽, 丁骏, 戴桂香, 马军林

(上海海洋大学海洋科学学院, 上海 201306)

摘要: 为了评价电厂温排水对海洋浮游生态系统的影响, 2010年10月5日—11日于象山港宁海国华电厂附近海域, 根据该海域表层海水温度的变化梯度设计围隔实验, 测定围隔中各粒级海洋浮游生物生物量(B), 呼吸率(R)和初级生产率(P)以及浮游生态系统的总初级生产量与总呼吸量的比值(TPP/TR)和周转率。分析结果表明, 在25.20~26.40℃, 0.25℃的温升对各粒级浮游生物的B, R和P的影响均不明显, 0.52℃的温升对小型和微型浮游生物的R和P均有一定的促进作用, 但对B的影响均不明显, 对微微型浮游生物的B, R和P的影响不明显; 在25.20~26.40℃, 0.52℃的温升使该浮游生态系统的TPP/TR和周转率分别提高了1.2倍和1.5倍。本研究为评价温排水对海洋生态系统的影响提供了一定依据。

关键词: 温升; 围隔生态系统; 各粒级浮游生物; 呼吸率

中图分类号: Q 179.1; S 917

文献标志码: A

近年来, 滨海电厂温排水对受纳海域生态系统的影响受到人们的日益关注^[1]。温排水影响海洋生态系统的直接因素主要是水温的升高, 海洋表层水温变化作为重要干扰对海洋生物个体的生长发育、海洋生物群落和海洋生态系统都有重大的影响^[2-3]。海洋生物新陈代谢能力主要取决于酶的活性, 在一定温度范围内, 酶活性与温度成正比, 海水温度与海洋浮游生物的生物量和生产力呈正相关关系^[4-5]。杨东方等^[6]研究水温对胶州湾浮游植物生长的影响机制, 发现水温具有限制和提高浮游植物增殖能力和初级生产力的双重作用, 周伟华等^[7]通过综合调查分析三亚湾细菌的生物量与环境因子的关系, 发现秋季平均温度比冬季高约4.5℃, 同时秋季细菌生物量比冬季高约1.5倍。刘光兴等^[8]调查研究发现, 胶州湾浮游动物群落的周转率与该海区表层水温显著正相关, 周转率随着水温升高而增大的趋势非常明显, 但是该研究对象局限于浮游动物, 有必要扩展到浮游生态系统。

生物量(B)、呼吸率(R)、初级生产率(P)和周转率等参数是生态系统结构和功能的重要表征。温度上升, 浮游生物群落的总光合速率和初级生产率升高, 但超过最适温度则又转为下降; 而呼吸率却随温度升高呈指数上升趋势。各粒级浮游生物代表浮游生态系统中不同的功能群, 反映各营养级之间的物质循环和能量流动, 对水温的耐受范围不相同^[9-10], 使得其对于温升干扰的响应程度也不同。

目前, 关于各粒级浮游生物B, R和P的研究较少^[11-13], 而采用围隔实验研究温升对各粒级海洋浮游生物的影响还未见报道。模拟现场条件研究温升对海洋浮游生态系统的影响, 围隔实验是一个有效的方法。围隔生态系统是用人工的方法把自然海水围起来的相对封闭的生态系统, 与周围海水没有物质交换^[14]。本研究采用围隔实验生态学方法, 通过对各粒级滤液的原位培养、叶绿素a浓度和浮游细菌生物量等参数的测定分析, 探讨了温升对围隔生态系统中各粒级海洋浮游生

收稿日期: 2011-03-03

修回日期: 2011-04-28

资助项目: 科技部海洋公益性行业科研专项资金项目(200905010)

通讯作者: 杨红, E-mail: hyang@shou.edu.cn

物 B,R,P 以及浮游生态系统的 TPP/TR 和周转率的影响。

1 材料与方法

1.1 围隔实验

围隔站位的设定 根据 2009 年夏季宁海国华电厂附近海域大潮落憩海表温升的分布以及与该电厂的距离,在该电厂附近海域设定 3 个站点(图 1),每个站点分别安置 1 个围隔,编号分别为 M1,M2 和 M3,其中 M3 为对照围隔。

围隔装置固定与围隔实验实施 每个围隔装置主要由钢骨架和围隔袋(透明聚乙烯材料)组装而成。围隔袋是底面直径为 1 m,高度为 1 m 的圆柱体,其容积约为 785 L。每个围隔装置上部安置浮筏,下部由重锤牵引,使其垂直固定。2010 年 10 月 4 日下午,从对照站位采相同体积的表层(深度为 0.5 m)海水分别加入 3 个围隔袋中,使得每个围隔袋内的水体结构与生物群落结构和对照站位自然海域表层浮游生态系统的状态基本一致。

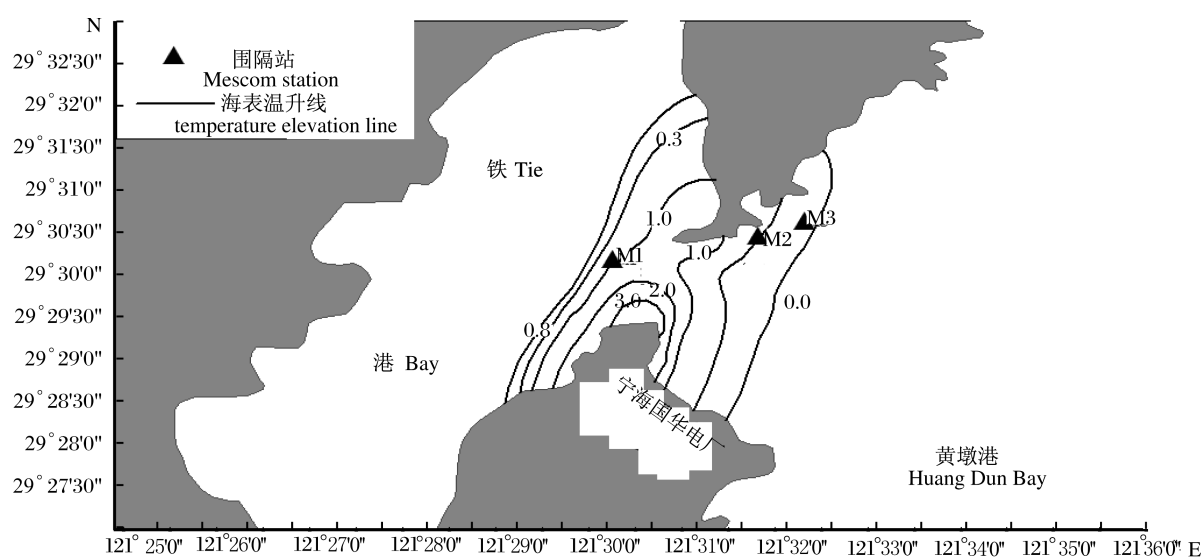


图 1 宁海国华电厂附近海域表层温升分布和围隔站位图分布

Fig. 1 Distributions of sea surface temperature and mesocosm stations near Ninghai Guohua Power Plant in Xiangshan Bay

1.2 样品采集与测定方法

样品的采集 在 2010 年 10 月 5 日—11 日期间,每日上午 9 点,使用有机玻璃采水器采集围隔中层(深度为 0.5 m)水体的水样。表层海水温度使用表面温度计测定。

呼吸率与初级生产率的测定 各粒级海洋浮游生物的呼吸率与初级生产率的测定,参照 WILLIAMS^[13]对海水实验围隔中各粒级浮游生物呼吸率与初级生产率的研究方法进行。将围隔中层的水样,使用孔径为 200 和 20 μm 的筛绢过滤,以及孔径为 2 μm 的滤膜抽滤。将各粒级同一次过滤所获得的滤液分别置于 250 mL 黑瓶和白瓶中,首先测定其溶解氧浓度,以保证初始溶解氧浓度基本一致,然后将其挂在取样围隔原位进行培养。培养 24 h 后,将黑瓶和白瓶收回,测定其溶解氧浓度,并分别计算出直径

小于 200、20、2 μm 浮游生物的呼吸率与初级生产率,由差减法计算出小型(直径为 20 ~ 200 μm)、微型(直径为 2 ~ 20 μm)及微微型(直径 < 2 μm)浮游生物的呼吸率和初级生产率。浮游生物群落(RQ)及浮游植物光合商(PQ)值均按 1 计算,依 1 mg O_2 等于 0.375 mg C 将氧含量转换为碳含量^[17]。

叶绿素 a(分粒级)含量的测定 叶绿素 a(分粒级)含量测定采用分光光度计法^[15]。在水样中加入 1 ~ 2 mL 饱和碳酸镁溶液,分别经孔径为 200 和 20 μm 的筛绢过滤,以及孔径为 2 μm 的核孔滤膜抽滤,抽气负压小于 50 kPa,然后各滤液分别经孔径为 0.45 μm 的聚碳酸酯膜抽滤,将抽滤后的滤膜对折放入 15 mL 的具塞离心管底部,加入 90% 的丙酮溶液 10 mL。离心管在 4 $^{\circ}\text{C}$ 和黑暗条件下静止萃取 24 h,在 4 000 r/min 条件

下离心 10 min,取上清液以 90% 丙酮溶液作为空白对照,测定其在波长为 750、664、647 和 630 nm 处的吸光值。分别计算出直径小于 200、20、2 μm 浮游生物的叶绿素 a 含量,由差减法计算出小型(直径为 20 ~ 200 μm)、微型(直径为 2 ~ 20 μm)及微微型(直径 < 2 μm)浮游生物的叶绿素 a 含量。叶绿素 a 含量与浮游植物生物量之间的转换,按照 1 单位重量的叶绿素 a 等于 50 单位重量的碳含量来换算^[16]。

浮游细菌丰度的测定细菌生物量的测定通过 DAPI(4',6-联脒-2-苯基吡啶二盐酸盐)染色法^[15]在荧光显微镜下计数分析。取 1 mL 经 40% (体积百分比, V/V) 甲醛固定的海水样品于量筒式过滤器中,所用孔径为 0.2 μm 的黑色聚碳酸酯滤膜于负压 50 kPa 条件下将水样进行抽滤。然后在负压恢复为 0 呈真空状态条件下加入 1 mL DAPI 染液,在黑暗条件下染色 5 ~ 10 min。染色结束后,在负压 50 kPa 条件下将染液抽干。之后将滤膜置于载玻片上,滴加一滴无荧光镜油,盖上盖玻片,用 Nikon 80I 荧光显微镜在放大倍数为 10 × 100 下随机选取 10 个视野,通过荧光显微拍照,对染色的细菌个体进行计数。细菌丰度使用公式(1)计算:

$$BN = Na \times S / [S_f \times (1 - 0.05) \times V] \quad (1)$$

式中, BN 为样品含菌数(/L); Na 为各视野的平均细菌数 (cells); S 为滤膜的有效过滤面积 (mm^2); S_f 为视野面积 (mm^2); V 为过滤水样体积(L); 0.05 为甲醛占样品体积的比例。以 20 fgC/cell 为转换系数,将细菌丰度转换为以碳含量表示的细菌生物量^[13]。

2 结果与讨论

2.1 围隔表层水温的变化

M1, M2 和 M3 依次远离电厂排水口,所测得的围隔表层水温存在相应的递减: M1 最高, M2 次之, M3 最低(图 2)。M1, M2 和 M3 的平均温度依次为 (25.91 ± 0.23), (25.64 ± 0.19), (25.39 ± 0.13) °C。取 M3 为对照围隔,则 M1 和 M2 的温升幅度分别为 0.52, 0.25 °C。3 个围隔温度随时间的变化趋势基本一致,除第 2 天温度稍高外,其余 6 d 的温度变化趋势基本持平。

2.2 各粒级浮游生物呼吸率和初级生产率的变化

在实验期间的第 4 天至第 6 天, M1 中小型浮游生物的 R 和 P 都明显比 M3 高,而 M2 中小型浮游生物的 R 和 P 在实验期间的变化趋势都与 M3 的相近(图 3-a, b),结果表明,在 25.20 ~ 26.40 °C 内, 0.25 °C 的温升对小型浮游生物的 R 和 P 影响均不明显,而 0.52 °C 的温升对小型浮游生物实验期间后期的 R 和 P 均起到了一定的促进作用,可见小型浮游生物对升温极其敏感。

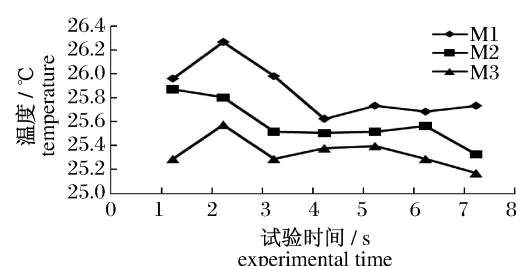


图 2 围隔表层海水温度的变化

Fig. 2 Variations of the sea surface temperature in mesocosm ecosystems

与 M3 相比, M1 中微型浮游生物在实验期间具有明显高的 R 和 P; 而 M2 中微型浮游生物的 R 和 P 在实验期间的变化趋势与 M3 的基本一致(图 3-c, d)。结果表明,在 25.20 ~ 26.40 °C 内, 0.25 °C 的温升对微型浮游生物的 R 和 P 影响均不明显,而 0.52 °C 的温升对微型浮游生物 R 和 P 都起到了一定的促进作用,可见微型浮游生物对于升温是极其敏感的。

在实验 7 d 期间, M1, M2 和 M3 围隔中微型浮游生物的 R 和 P 之间的变化趋势都相近(图 3-e, f),表明在 25.20 ~ 26.40 °C 内, 0.25 和 0.52 °C 的温升对微微型浮游生物的 R 和 P 影响均不明显。可能是因为微微型浮游生物的最适温度比小型和微型浮游生物高, 0.52 °C 的升温在 25.20 ~ 26.40 °C 内不足以影响到微微型浮游生物的代谢。在实验第 7 天,小型浮游生物和微型浮游生物的 R 和 P 都急剧下降;微微型浮游生物的 P 也急速下降,但微微型浮游生物的 R 还维持在正常水平,可能是异养细菌在起作用。

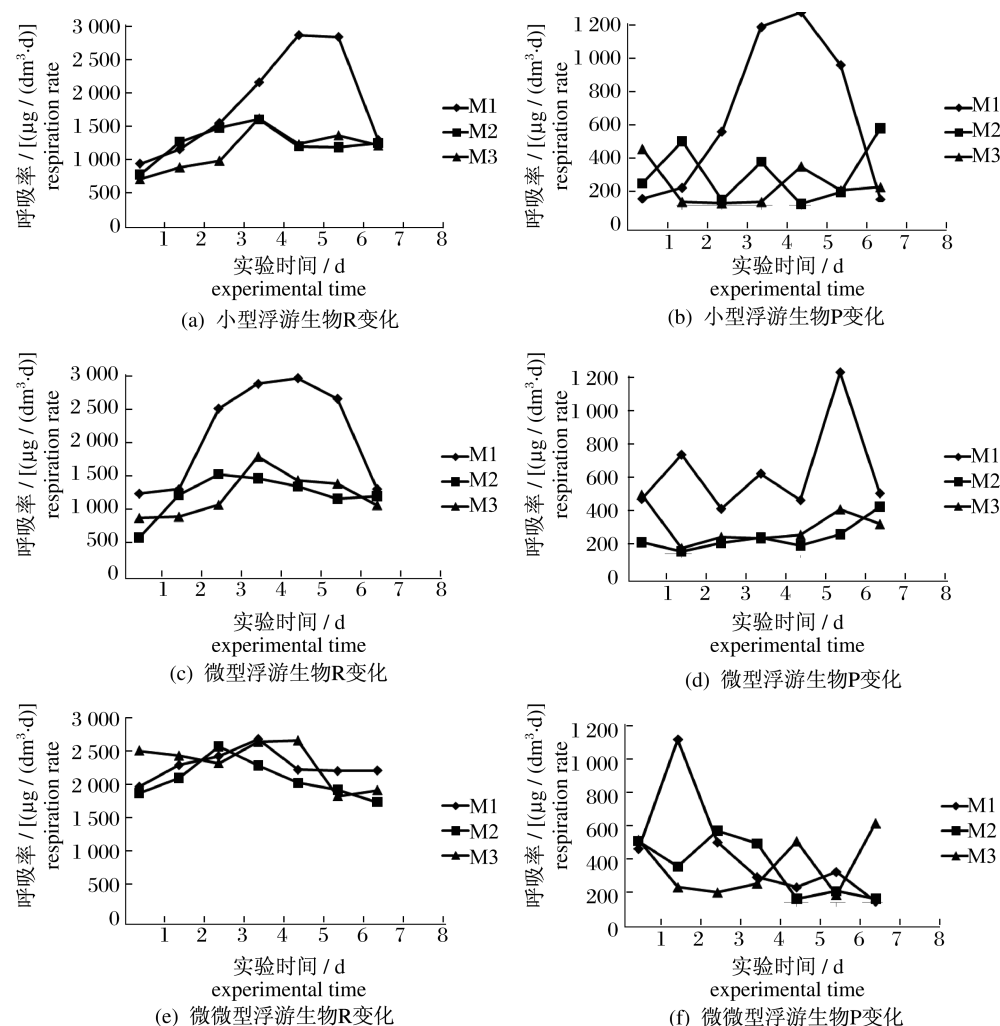


图3 围隔中各粒级浮游生物 R 和 P 的变化

Fig. 3 Variations of the respiration rate and the phytoplankton production rate of different sized plankton in mesocosm ecosystems

2.3 各粒级叶绿素 a 浓度的变化

各粒级浮游生物在水体中的数量和生物量可作为水生生态系统的重要指标^[18]。3 个围隔中小型浮游生物、微型浮游生物和微微型浮游生物的叶绿素 a 浓度随时间的变化趋势都相近(图 4),间接地反映了在 25.20 ~ 26.40 °C 内,0.25 和 0.52 °C 的温升对不同粒级浮游植物的生物量影响都不明显。由于生产量是生物量和死亡量或者摄食量的总和,所以可能是因为在实验期间浮游生物的被摄食率或死亡率较高,使得生产率提高而生物量不提高,导致温升对生物量的增长促进受到一定的限制。同时温升对小型和微型浮游生物的呼吸率有着明显的促进作用。为了进一步解释这种现象,我们引用 IKEDA^[19] 计算浮游生物的呼吸率与温度和生物量之间关系的公式(2),可以看出,在生物量不变的

情况下,温度升高,呼吸率提高。

$\ln R = 0.7886 \ln DW + 0.0490T - 0.2512$ (2)
式中, R 表示呼吸率; DW 为浮游生物的平均个体干重; T 为水温。

2.4 浮游细菌生物量的变化

M1, M2 和 M3 中浮游细菌日平均生物量分别为 (85.39 ± 44.26) , (48.55 ± 15.80) 和 (46.61 ± 20.92) mg C/m^3 ,即 M1 的浮游细菌日平均生物量比 M3 的高 0.8 倍,M2 的浮游细菌日平均生物量比 M3 的高 0.04 倍,表明在 25.20 ~ 26.40 °C 内,0.25 °C 的温升对浮游细菌生物量影响不明显,在实验期间第 2 天和第 4 天,0.52 °C 的温升对浮游细菌生物量有显著的促进作用(图 5),可见浮游细菌的生长对于温升是敏感的,这与周伟华等^[7] 调查分析的结果吻合。

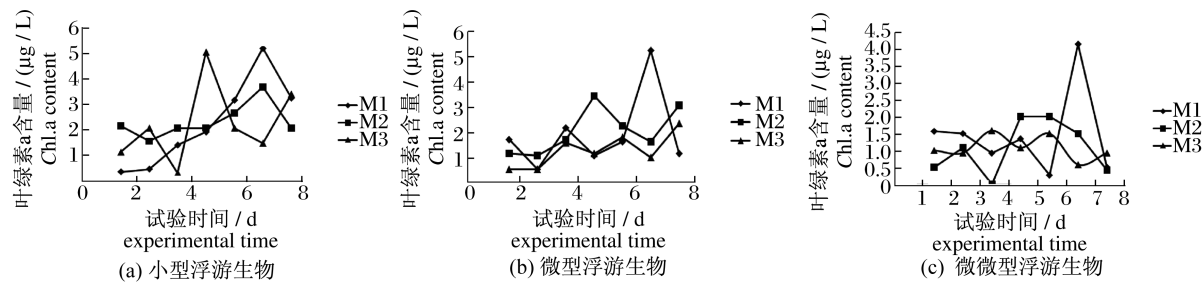


图4 围隔中各粒级叶绿素 a 含量的变化

Fig. 4 Variations of chlorophyll-a content of different sized plankton in mesocosm ecosystems

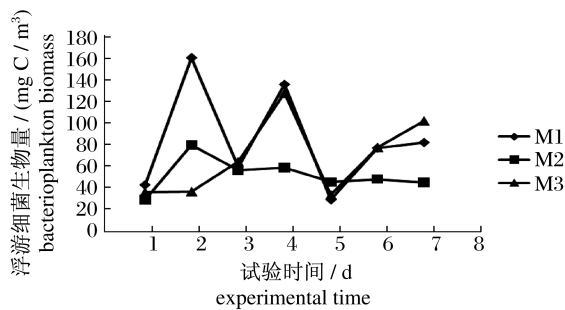


图5 围隔中浮游细菌生物量的变化

Fig. 5 Variations of bacterioplankton biomass in mesocosm ecosystems

2.5 浮游生态系统特征的变化

M1, M2 和 M3 中的浮游细菌日平均生物量与总浮游植物日平均生物量的比值分别为 0.29, 0.16 和 0.18, 表明在 25.20 ~ 26.40 °C 内, 0.52 °C 的温升对浮游细菌日平均生物量与总浮游植物日平均生物量的比值提高了 0.6 倍。M1, M2 和 M3 的日平均总初级生产量与日平均总呼吸量的比值分别为 0.26, 0.12 和 0.12, M1, M2 和 M3 的日

均总初级生产量与日平均总生物量的比值分别为 4.48, 1.42 和 1.79。

ODUM^[20] 的生态系统发育理论中, 总初级生产量与总呼吸量的比值 (TPP/TR) 是表征生态系统成熟度的重要指标; 总初级生产量与总生物量的比值 (TPP/TB) 也称周转率, 反映生物碳的代谢速率快。在实验期间, M2 中的 TPP/TR 和 TPP/TB 与 M3 的变化趋势相近, M1 中的 TPP/TR 和 TPP/TB 都明显比 M3 高 (图 6)。研究表明, 在 25.20 ~ 26.40 °C 内, 0.25 °C 的温升对浮游生态系统的 TPP/TR 和 TPP/TB 影响不明显, 而 0.52 °C 的温升对其 TPP/TR 和 TPP/TB 有显著的提高, 0.52 °C 的温升使得浮游生态系统的 TPP/TR 和周转率分别提高了 1.2 倍和 1.5 倍, 此结果与刘光兴等^[8] 调查研究浮游动物群落周转率随温度升高而增加的结果一致。因此, 温升可以促进浮游生态系统的成熟; 同时温升可以促进浮游生态系统的代谢速率, 原因可能是温升提高酶的活性, 加快浮游生物的代谢, 从而使得浮游生态系统的周转率得到提高。

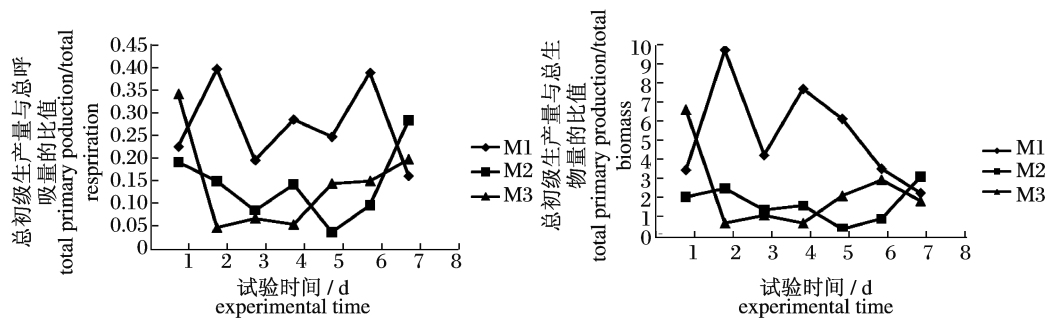


图6 围隔中 TPP/TR 和 TPP/TB 的变化

Fig. 6 Variations of Total Primary Production/Total Respiration (TPP/TR) and Total Primary Production/Total Biomass (TPP/TB) in mesocosm ecosystems

以上结果表明,适度的升温对于浮游生态系统起着促进的作用。但是,根据水温对浮游生物生长具有促进和限制的双重作用机制,应该还存在着限制的作用,由于围隔安置困难和工作量大等原因,围隔站位没有完全靠近电厂排水口,造成温度的变化范围较窄和温度变化梯度较小,使得实验结果还不够充分反映出抑制作用。所以,关于温排水对海洋生态系统的结构和功能的影响还有待进一步研究,如扩大温度变化范围和梯度,增加底栖生物和游泳生物等研究对象。

3 结论

为了评价温排水对海洋生态系统的影响,本研究针对象山港宁海国华电厂附近海域进行围隔实验,通过比较不同温度条件下的围隔生态系统中不同粒级浮游生物 B, R 和 P 等参数以及围隔生态系统的成熟度和周转率的变化,在一定程度上反映了浮游生态系统结构和功能对温升的响应。

(1) 在 25.20 ~ 26.40 °C 内,0.25 °C 的温升对围隔中各个粒级浮游生物的生物量,呼吸率和初级生产率的影响均不明显。

(2) 在 25.20 ~ 26.40 °C 内,0.52 °C 的温升对围隔中小型和微型浮游生物的呼吸率和初级生产率均有一定的促进作用,但对其生物量的影响均不明显,对微型浮游生物的生物量,呼吸率和初级生产率的影响都不明显。

(3) 在 25.20 ~ 26.40 °C 内,0.52 °C 的温升使围隔中浮游生态系统的 TPP/TR 和周转率分别提高了 1.2 倍和 1.5 倍,即提高该浮游生态系统的成熟度和代谢速率。

参考文献:

- [1] TSUCHIDA S. The relationship between upper temperature tolerance and final preferendum of Japanese marine fish [J]. *Journal of Thermal Biology*, 1995, 20(1-2): 35-41.
- [2] YANG D F, GAO Z H, CHEN Y, *et al.* Influence of seawater temperature on phytoplankton growth in Jiaozhou Bay, China [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2004, 22 (2): 166-175.
- [3] PANE L, FRANCESCHI E, DE NUCCIO L. Applications of thermal analysis on the marine phytoplankton, *Tetraselmis suecica* [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2001, 66 (1): 145-154.
- [4] BAI J, ZHANG H F, LI K R, *et al.* Limiting factors of biomass and production of marine heterotrophic bacterioplankton [J]. *Periodical of Ocean University of China*, 2004, 34(4): 594-602.
- [5] KIRCHMAN D L, JAMES H R, RICHARD T B. Biomass and biomass production of marine heterotrophic bacteria along 140 °C W in the equatorial Pacific; Effect of temperature on the microbial loop [J]. *Deep Sea Res*, 1995, 42(2-3): 603-619.
- [6] 杨东方,高振会,王培刚,等. 营养盐 Si 和水温影响浮游植物的机制 [J]. *海洋环境科学*, 2006, 25(1): 1-6.
- [7] 周伟华,王汉奎,董俊德,等. 三亚湾秋、冬季浮游植物和细菌的生物量分布特征及其环境因子的关系 [J]. *生态学报*, 2006, 26(8): 2634-2639.
- [8] 刘光兴,张志南. 胶州湾北部浮游动物的生物量 and 生产力 [J]. *青岛海洋大学学报*, 2000, 30(2): 58-64.
- [9] 曾江宁. 滨海电厂温排水对亚热带海域生态影响的研究 [D]. 杭州:浙江大学, 2008.
- [10] MARTINEZ A A, ABUNDES S, GONZALEZ M, *et al.* On the influence of hot-water discharges on phytoplankton communities from a coastal zone of the Gulf of Mexico [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2000, 119(1): 209-230.
- [11] 刘国才,李德尚,董双林. 对虾养殖生态系不同粒级浮游生物呼吸率和初级生产率测定 [J]. *海洋学报*, 2001, 23(6): 101-106.
- [12] HOPKINSON C S, SHEER J B, WIEBURTH W. Size fractionated metabolism of coastal plankton [J]. *Marine Ecology-progress Series*, 1989, 51: 155-166.
- [13] WILLIAM S. Microbial contribution to overall marine plankton metabolism: direct measurements of respiration [J]. *Oceanologica Acta*, 1981, 4: 359-364.
- [14] LI G. Different types of ecosystem experiments [C] // LALLI C M. *Enclosed experimental marine ecosystems: A review and recommendations*. London: Springer-Verlag, 1990: 7-19.
- [15] 国家海洋局. GB/T 12763. 6-2007, 海洋调查规范·海洋生物调查 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] HARRIS G P. *Picoplankton ecology, function and fluctuations* [M]. Chpman and Hall, London, UK, 1986: 221-235.
- [17] SCHROEDER G L. *Autotrophic and heterotrophic*

- production of microorganisms in intensely-manured fish ponds and related fish yields[J]. *Aquaculture*, 1978, 14: 303 – 325.
- [18] 赵文, 李晓东, 徐纪军. 轮虫培育池不同粒级藻类对浮游植物生物量 and 生产量的贡献[J]. *水产学报*, 2004, 28(2): 167 – 174.
- [19] IKEDA T. Metabolic rates of epipelagic marine zooplankton as a function of body mass and temperature[J]. *Marine Biology*, 1985, 85: 1 – 11.
- [20] ODUM E P. The strategy of ecosystem development [J]. *Science*, 1969, 104: 262 – 270.

Effects of thermal effluent on different size-fractionated marine plankton in the mesocosm ecosystem

CAI Ze-fu, YANG Hong*, JIAO Jun-peng, DING Li-li, DING Jun, DAI Gui-xiang, MA Jun-lin
(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: To evaluate effects of thermal effluent on the planktonic ecosystem, we carried out a mesocosm experiment according to the sea surface temperature gradient, near Guohua Ninghai Power Plant in Xiangshan Bay during October 5th to 11th of 2010, and determine biomass (B), respiration rate (R) and primary productivity (P) of marine planktons and the ratio of total primary production and total respiration (TPP/TR) and turnover rate in the planktonic ecosystem. The results show that: in the range of 25.20 – 26.40 °C, effects of 0.25 °C warming on the B, R and P of all plankton were not obvious, 0.52 °C warming can elevate the R, P of microplankton and nano-phytoplankton. Effects of 0.52 °C warming on the B, R and P of picoplankton were not obvious. The TPP/TR and turnover rate in the planktonic ecosystem were increased 1.2 times and 1.5 times, respectively. A theoretical basis is provided for evaluating effects of thermal effluent on the marine planktonic ecosystem.

Key words: temperature elevation; mesocosm ecosystem; different size-fractionated plankton; respiration rate

Corresponding author: YANG Hong. E-mail: hyang@shou.edu.cn