模拟电厂温排水温升和游离余氯对亚心形扁藻生长影响的研究

戴雅奇[1,2], 仇建标[3], 潘利平[1], 彭　欣[3], 李彬彬[4], 黄莹莹[1], 陈雪初[1]

(1. 华东师范大学 生态与环境科学学院, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200241; 2. 上海中信元钧环保有限公司, 上海 200331; 3. 浙江省海洋水产养殖研究所, 浙江 温州 325005; 3. 上海大学 环境与化学工程学院, 上海 200444)

摘要: 以亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)为受试藻种, 模拟温升和游离余氯条件, 研究浮游植物对核电厂温排水的生态响应。结果表明, 春秋季温升对其生长影响较小, 而在夏季, 其生长受到显著抑制。亚心形扁藻对游离余氯非常敏感, 0.1 mg/L 游离余氯既能抑制其生长, 抑制作用随着游离余氯浓度的升高而增强。温升会加剧游离余氯的抑制作用, 4℃温升和 0.1 mg/L 游离余氯联合作用对亚心形扁藻的抑制效果明显增加。由于温升和游离余氯的联合作用, 即使在离排口较远的水域, 仍然会导致亚心形扁藻数量减少。

关键词: 温排水; 温升; 游离余氯; 亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)

中图分类号: S963.12　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-3096(2018)02-0134-07

DOI: 10.11759/hykx20170731003

近年来, 我国核电厂的建设速度逐步加快, 为了满足其对大量冷却水的需求, 核电厂一般建在河口或沿海地区[1], 其温排水会导致近岸水域温度上升, 会对生态系统造成负面影响, 导致浮游植物的关键生境条件发生显著变化, 甚至增加水华爆发的风险[2]。同时, 核电厂为防止冷凝器附着生物形成绝热层, 影响冷却效果甚至堵塞冷却系统, 需向循环冷却水中加入一定量的氯, 因此温排水中一般都含有一定浓度余氯[3-4]。含有游离余氯的冷却水排入海域中可能影响海洋浮游植物的种类数、生物量和优势种群, 从而影响海洋生态系统。亚心形扁藻(*Platymonas subcordiformis*)是常见的海洋单细胞绿藻, 对温度、光照和盐度的适应范围较广, 生长繁殖迅速, 极易培养, 是鱼、虾、贝类等重要的饵料食物[5-7]。本文以海洋饵料藻—亚心形扁藻为研究对象, 研究温升及游离余氯的单独作用以及联合作用对亚心形扁藻生长和光合作用的影响, 探讨温排水与亚心形扁藻增殖的关系, 以期为海滨核电厂对其附近水域浮游植物的生态风险评价提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验所用的亚心形扁藻藻种由温州医科大学提供, 培养温度为 20℃, 光照强度约为 2 500 lx, 光暗比设定为 14 h∶10 h, 扩大培养后用于试验。安替福民(次氯酸钠水溶液, 分析纯) 用于配制游离余氯溶液, 购自上海国药集团化学试剂有限公司。

1.2　试验方法

配置 F/2 培养基, 混匀后, 在高温高压灭菌锅中灭菌 50 min, 冷却后接种处于对数生长期的亚心形扁藻, 恒温适应 5~7 d, 再用无菌 F/2 培养基稀释后分装到 250 mL 锥形瓶中进行试验。试验所用控温装置如下: 在水族箱中使用 DYMAX 的一款迷你加温棒, 附带 LED 数显温控器, 使水温达到所需温度, 并使用小型潜水泵让水温均匀, 用温度计进行水温的实时监测。游离余氯只在试验开始前加入, 之后不再添加, 光照强度 2 500 lx, 光暗比设定为 14 h∶10 h, 每组设 3 个平行样, 每天人工摇动锥形瓶 2~3 次, 所有玻璃仪器使用前均经过高温灭菌处理。

1.2.1　温升试验

以 21℃和 28℃为对照组分别模拟春(秋)季和夏季, 试验组设置 4℃的温升, 即 25℃和 32℃, 不加游

收稿日期: 2017-11-02; 修回日期: 2017-12-15

基金项目: 浙江省科技计划项目(2014F50003)

[Foundation: Science and Technology Project of ZhejiangProvince, No.2014F50003]

作者简介: 戴雅奇(1978-), 男, 上海市人, 工程师, 硕士, 主要从事水域生态学研究, 电话: 021-54341137, E-mail: 150652@qq.com; 黄莹莹, 通信作者, 女, 电话: 021-54341137, E-mail: h_yingying@163.com

离余氯，试验周期为 10 d。

1.2.2 游离余氯试验

设置温度条件为 20℃，次氯酸钠现用现配，不加游离余氯的样品为空白对照组，试验组分别加入 0.05、0.10、0.20、0.30、0.40 mg/L 游离余氯，试验周期为 5 d。

1.2.3 温升和游离余氯耦合试验

设置试验温度为 21、25、28℃。21℃作为对照组，不添加游离余氯, 25℃和 28℃作为试验组，分别加入 0.10、0.30 mg/L 的游离余氯，形成 25℃ –0.1 mg/L、25℃ –0.3 mg/L、28℃ –0.1 mg/L 和 28℃ –0.3 mg/L 的 4 个试验组，试验周期为 10 d。

1.3 分析测定与数据计算

游离余氯浓度：采用 N, N-二乙基对苯二胺(*DPD*)分光光度法，通过 SYL-1B 余氯仪(检测限为 0.01 mg/L，精度为 0.01 mg/L)测定。

藻细胞密度：采用微生物血球计数板直接计数法，在 OLYMPUSCKX41 倒置光学显微镜下进行细胞计数。

叶绿素 a 浓度与光系统Ⅱ最大光合潜力(F_v/F_m)：用型号为 PHYTO-PAM 的浮游植物荧光仪(WAlZ, Germany)测定，在室温下进行，F_v/F_m 测定时暗适应时间不少于 5 min。

相对细胞叶绿素 a 含量和生长抑制率分别用下式计算：

相对细胞叶绿素 a 含量=试验组细胞叶绿素 a 含量/对照组细胞叶绿素 a 含量

生长抑制率(%)=(对照组细胞密度–试验组细胞密度)/对照组细胞密度×100%

2 结果

2.1 温升对亚心形扁藻的影响

我国东海近岸水域春秋季平均水温约为 21℃，夏季平均水温约为 28℃，而根据我国《海水水质标准》(GB3097-1997)中的规定：“第三类、第四类海域认为造成的海水温升不超过当时当地 4℃”，故本实验分别以 21℃和 28℃为对照，设置了 4℃的温升，模拟海滨电厂春秋季和夏季温排水对亚心形扁藻的影响。图 1 为温升对亚心形扁藻细胞生长的影响。模拟春(秋)季(21℃)和夏季(28℃)条件下，培养 10 d 后，藻细胞密度分别增加了 16.38 倍和 4.65 倍。模拟春(秋)季温升 4℃条件下，亚心形扁藻仍然持续增殖，但增殖趋势略缓，培养 10 d 后，藻细胞密度增加了 13.37 倍；当温升达到 7℃，即 28℃，水温达到夏季温度水平，藻细胞增殖趋势减缓更为明显。而在模拟夏季条件时，仅温升 4℃，亚心形扁藻增殖则受到显著抑制($P<0.05$)，随着培养时间增加，细胞密度趋于减少，培养 10 d 后，藻细胞密度仅为初始值的 36.98%。结果表明高温不利于亚心形扁藻生长，温升会导致亚心形扁藻增殖趋势减缓，甚至会导致其逐渐消亡。图 1c 进一步比较了温升对亚心形扁藻的抑制作用。结果显示，模拟夏季条件下温升对亚心形扁

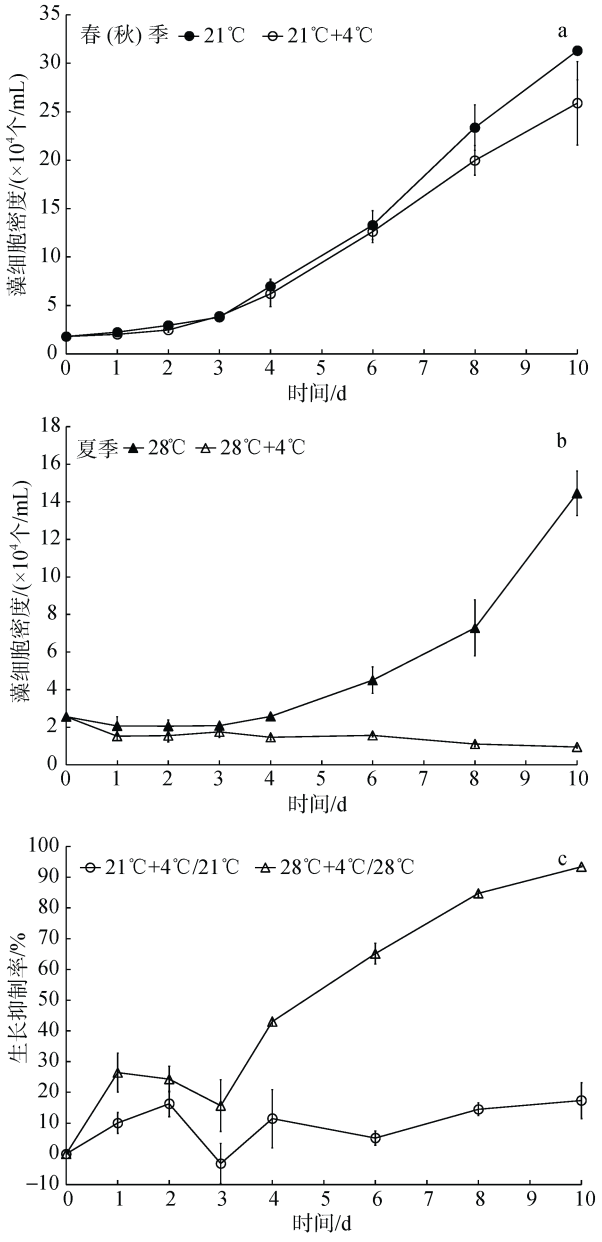


图 1 温升对亚心形扁藻细胞生长的影响

Fig. 1 The effects of temperature increase on the growth of *Platymonas subcordiformis*

藻的抑制作用显著高于春(秋)季条件，夏季温升时抑制率持续增加直到培养第10天>90%，这进一步说明亚心形扁藻对夏季温升更为敏感。

图 2 为温升对亚心形扁藻光合作用的影响。实验结果显示，模拟春(秋)季温升条件下亚心形扁藻 F_v/F_m 值在培养初期较对照组略有降低，在培养中期降低趋势明显，但是在培养结束时温升组 F_v/F_m 值反而超过了对照组；模拟夏季温升条件下亚心形扁藻 F_v/F_m 值则显著下降，反映了夏季温升将直接损伤亚心形扁藻的光合反应系统。相应地从单位细胞叶绿素 a 含量的变化趋势来看，培养初期模拟春(秋)季温升对单位细胞叶绿素 a 含量无显著影响(P>0.05)，而试验结束时温升组单位细胞叶绿素 a 含量反而更高，而模拟夏季温升条件下，单位细胞叶绿素 a 含量则显著上升，这可能与存活的亚心形扁藻对温升的生态适应性有关。

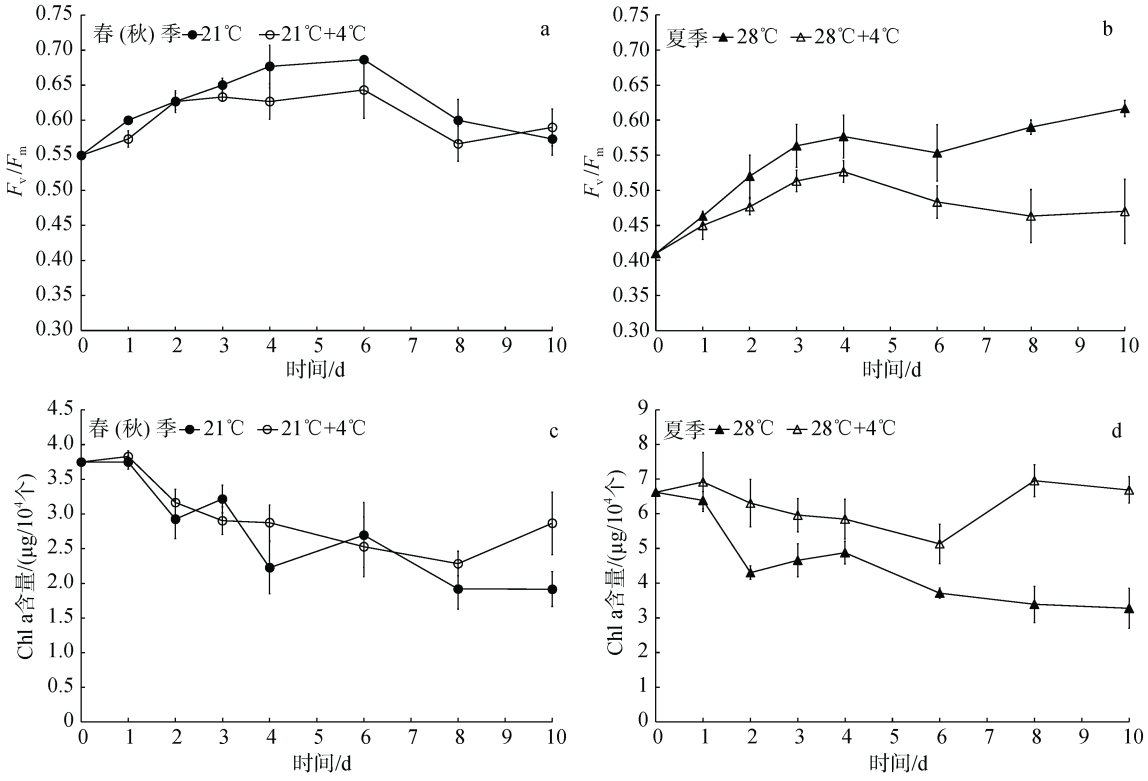


图 2　温升对亚心形扁藻光合作用的影响

Fig. 2　The effects of temperature increase on the photosynthesis of *Platymonas subcordiformis*

2.2　游离余氯对亚心形扁藻的响应

图 3 为不同游离余氯条件对亚心形扁藻细胞生长的影响。结果表明，0.05 mg/L 游离余氯浓度对亚心形扁藻细胞生长没有明显影响，细胞可以持续增殖；当游离余氯浓度超过 0.1 mg/L 时，初期藻细胞生长都受到明显抑制，且随着游离余氯浓度越高，受抑制情况越明显；但在 2 d 后藻细胞密度都有所恢复，藻细胞重新趋于增殖状态。从抑制率情况来看(图 3b)，0.05 mg/L 游离余氯处理时对藻细胞没有明显抑制作用，随着游离余氯浓度增加，抑制率上升明显；但在 0.2 和 0.3 mg/L 时，随着处理时间延长，抑制作用下降；而在 0.4 mg/L 处理时，抑制率保持在 50%左右。

图 4 显示不同游离余氯浓度对亚心形扁藻光合作用的影响。实验结果显示，初始游离余氯浓度为 0.4 mg/L 时，第 1 天亚心形扁藻 F_v/F_m 值下降，表明高游离余氯胁迫下短期内亚心形扁藻光合反应系统受到抑制或损伤，但第 2 天 之后 F_v/F_m 值都有所恢复；而在游离余氯胁迫下，单位细胞叶绿素 a 含量略有增加，表明亚心形扁藻光合反应系统对游离余氯胁迫有一定适应性。

2.3　温升和游离余氯联合作用对亚心形扁藻的影响

由于单独温升实验已显示夏季温升条件下亚心

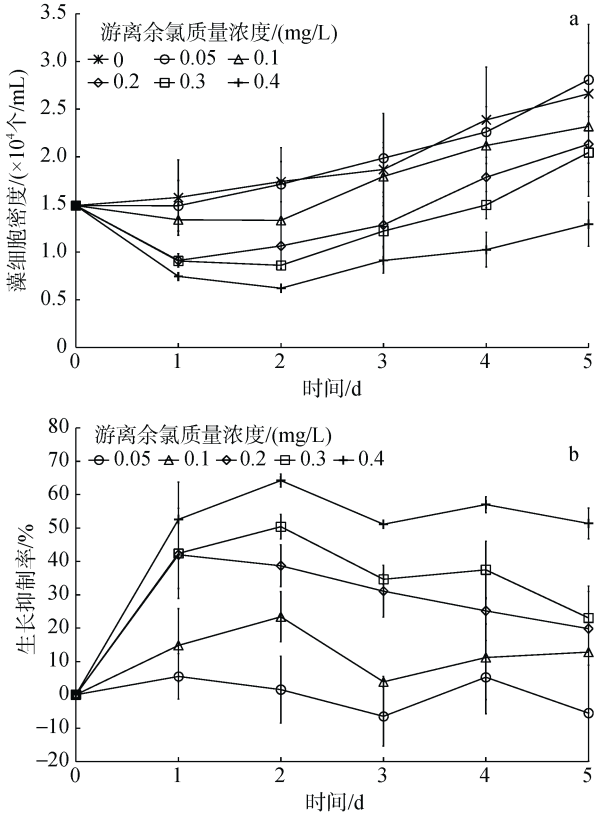


图 3　游离余氯对亚心形扁藻细胞生长的影响

Fig. 3　The effects of free residual chlorine on the growth of *Platymonas subcordiformis*

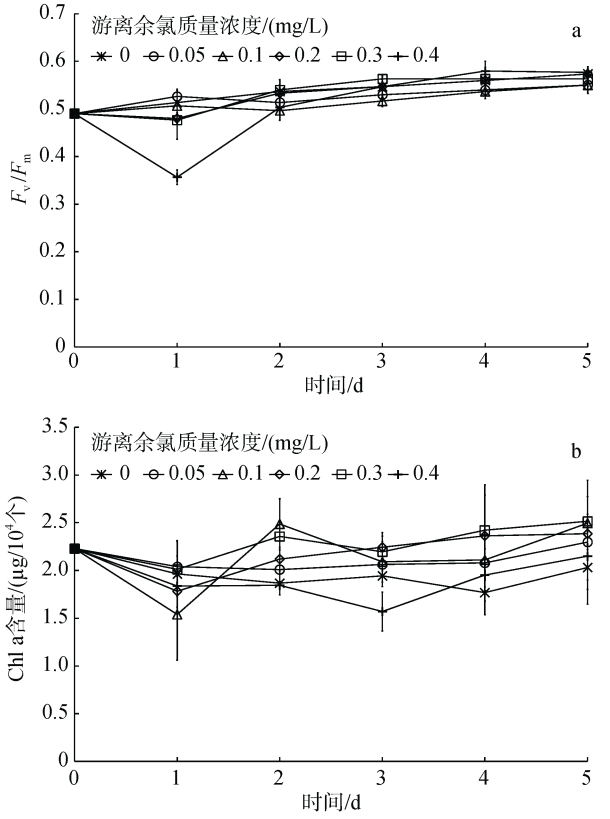


图 4　游离余氯对亚心形扁藻光合作用的影响

Fig. 4　The effects of free residual chlorine on the photosynthesis of *Platymonas subcordiformis*

形扁藻生长趋于停滞，而游离余氯同样不利于其生长，因此本试验部分仅研究春(秋)季温升与游离余氯联合作用。图 5 为夏季温升和游离余氯联合作用时对亚心形扁藻细胞生长的影响。结果显示，春(秋)季温升和游离余氯的联合作用不利于亚心形扁藻生长，当游离余氯为 0.1 mg/L，温升为 4℃和 7℃时，亚心形扁藻都仍处于生长趋势，但较对照组增殖速度降低，且温升 7℃较 4℃增殖趋势弱；当游离余氯为 0.3 mg/L，温升为 4℃和 7℃时，亚心形扁藻的生长受到明显抑制，藻细胞密度趋于减少。从抑制率结果看，同样显示游离余氯为 0.3 mg/L，温升 4℃和 7℃时，对于亚心形扁藻生长具有显著抑制作用，抑制率持续上升，后期接近 100%；相比单独游离余氯 0.3 mg/L 作用时，抑制率仅为 40%~20%，且有生态适应的表现，这说明对于亚心形扁藻而言，温升和游离余氯联合作用可能增加对其生长的抑制余氯交互作用对亚心形扁藻光合作用的影响。结果显示，0.3 mg/L 游离余氯与温升交互作用时，F_v/F_m 显著降低($P<0.05$)，且响应很快，在第 1 天即降低到 0.05 以下，之后虽然有所上升，实验结束时仍然低于 0.1，而 0.3 mg/L 游离余氯和 4℃温升单独作用时，F_v/F_m 始终分别维持在 0.48 和 0.55 以上。0.1 mg/L 游离余氯与温升交互作用时，F_v/F_m 在第 1 天同样显著降低($P<0.05$)，但仅降低到约 0.35，之后逐渐恢复，与对照组没有显著差异($P>0.05$)。表明尽管在单独作用时亚心形扁藻对游离余氯和温升胁迫有一定适应性，当高游离余氯与温升交互作用时，会对亚心形扁藻光合系统造成不可逆的破坏。从单位细胞叶绿素 a 含量看，游离余氯与温升交互作用导致其显著降低($P<0.05$)，但低游离余氯组叶绿素 a 含量有所恢复，试验结束时甚至高于对照组。

进一步地，相同游离余氯条件下高温升组和低温升组细胞密度(除低游离余氯作用 6 d 后)、F_v/F_m 和单位细胞叶绿素 a 含量均没有显著差异($P>0.05$)，但高游离余氯组细胞密度、F_v/F_m 和单位细胞叶绿素 a 含量均显著低于低游离余氯组(F_v/F_m, $P<0.05$)。

3　讨论

亚心形扁藻是常见的海洋单细胞绿藻，对温度的适应范围较广，在 7~30℃范围以内都能生长繁殖，

最适温度约为 20~28℃，温度上升到 33℃以上生长繁殖受到较大的抑制，出现黄萎状态，温度接近 35℃时即大量死亡。陈晓娟等[8]发现亚心形扁藻生长的最适温度为 28℃，在本实验中，亚心形扁藻在 21~28℃均能生长，但随温度的升高细胞生物量降低，当温度为 32℃时，细胞密度显著减少。电厂温排水排口温升可达 7~12℃，而 4℃温升区域可达 2~3 km^2[9]。在春(秋)季，自然水体温度较低时，虽然 4℃的温升会导致亚心形扁藻的增殖减缓，但并不显著，温升达到 7℃，藻细胞的增殖将明显简化，而在夏季，自然水温较高，已不利于亚心形扁藻的生长繁殖，此时仅 4℃的温升即对其造成较大的影响，细胞密度和 F_v/F_m 都显著下降。夏季温升对浮游植物的伤害较大，仅 4℃的温升加剧了温度对其生长的抑制，甚至出现大量死亡的现象[10]。

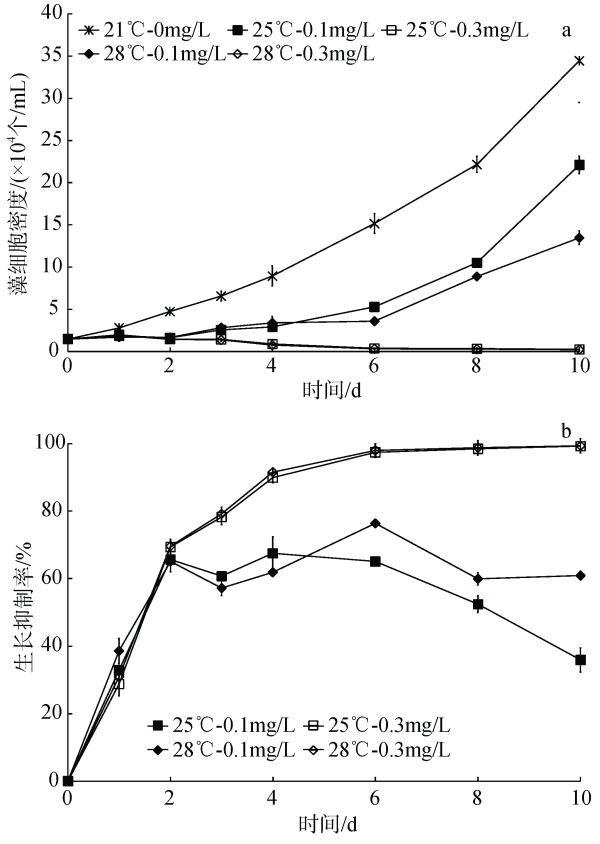


图 5　春(秋)季温升和游离余氯联合作用对亚心形扁藻细胞生长的影响

Fig. 5　The combined effects of temperature increase and free residual chlorine on the growth of *Platymonas subcordiformis* in spring/autumn

温排水中游离余氯是影响海洋浮游植物生长繁殖的重要因素，0.001 mg/L 的游离余氯短时间内也可能会抑制其细胞的生长[11]，0.2 mg/L 的游离余氯可以直接杀死冷却水 60%~80%的藻类[12]。本实验中，当游离余氯浓度为 0.05 mg/L 时，亚心形扁藻细胞密度几乎不受影响，细胞持续增殖；当游离余氯浓度超过 0.1 mg/L 时，亚心形扁藻的生长在短时期内受到抑制，且随着游离余氯浓度的升高，抑制作用越强，但是随时间的增加，细胞重新趋于增殖，这与曾江宁等[13]的研究结果基本一致。

光合活性与藻类的生长是密切相关的，F_v/F_m 是反映藻类光合作用能力的指标，可直接代表藻类的光合作用[13]。结果表明，温升和游离余氯对亚心形扁藻 F_v/F_m 均有影响。温度是影响藻类光合作用的因素之一，温度过高或短期高温都会破坏叶绿素，影响光合作用效率[14]，春秋季，4℃的温升单独作用时，试验组亚心形扁藻的 F_v/F_m 在培养末期超过了对照组，说明低温时亚心形扁藻对温升有一定的生态适应性；夏季，试验组亚心形扁藻的 F_v/F_m 始终低于试验组，而且随培养时间的增加而显著降低，这表明，

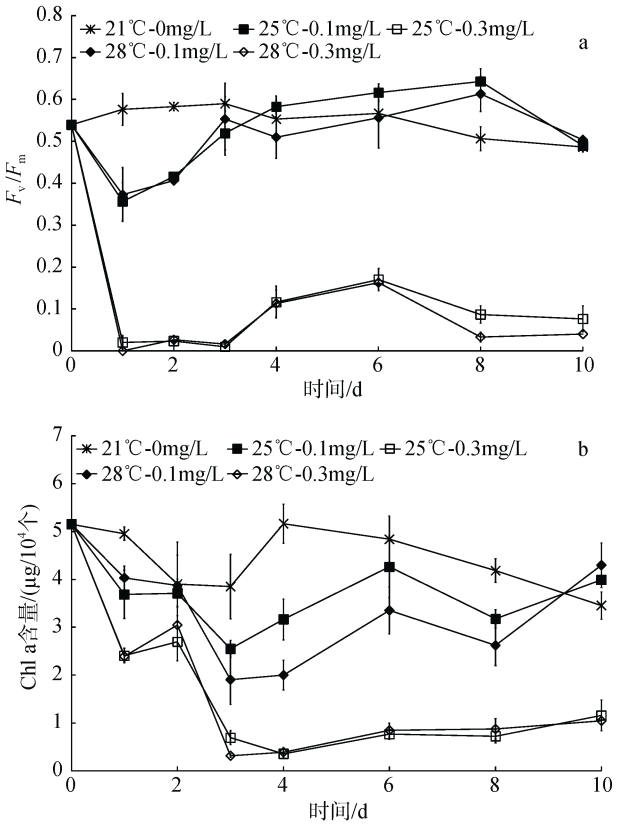


图 6　春(秋)季温升和游离余氯联合作用对亚心形扁藻光合作用的影响

Fig. 6　The combined effects of temperature increase and free residual chlorine on the photosynthesis of *Platymonas subcordiformis* in spring/autumn

高温时温升可直接损伤藻类光合反应系统。温排水中的游离余氯也是影响浮游植物光合作用的重要因素，游离余氯的浓度超过藻类承受范围会破坏其光合系统，光合作用能力下降[13]，在本实验中，当游离余氯浓度超过 0.1 mg/L 时，亚心形扁藻 F_v/F_m 短时间内下降，游离余氯越高受抑制越显著，表明高游离余氯胁迫下短期内亚心形扁藻光合反应系统受到抑制或损伤，但是随着培养时间的增加，F_v/F_m 都有不同程度的恢复，说明亚心形扁藻光合反应系统对游离余氯胁迫有一定适应性。

我国电厂大多是直流冷却方式的电厂，温升一般在 2~12℃[1, 15-17]，其加氯的方法主要有连续加氯、定时不连续加氯和间歇短时加氯三种方式，一般电厂在加氯 2.0 mg/L 处理后，冷凝器前余氯浓度达到 1 mg/L，出水口余氯浓度约为 0.15~0.25 mg/L[4]，电厂排水口附近水域温升和余氯浓度均较高，而离排水口较远的水域，温升和余氯浓度较低。从本研究的结果来看，温升和余氯均不利于亚心形扁藻的生长，余氯的影响更显著，而温升会加剧余氯的毒性，因此，即使在离排口较远的水域(4℃温升区)，温排水仍然会导致亚心形扁藻数量减少，而亚心形扁藻作为重要的饵料藻和初级生产者，其数量减少会对海洋食物链造成负面影响；同时核电厂周边若存在养殖区，则也可能因为饵料藻活性及产率下降而受到影响。进一步的，由于不同藻种对温排水的敏感性不同，藻类种群结构可能受到影响，生物多样性降低，有害种或赤潮种增加[18-19]。

4 结论

(1) 不同季节温升对亚心形扁藻生长的影响不同，春(秋)季温升(21℃+4℃)条件下，亚心形扁藻均可以持续增殖，但温升条件下增殖趋势比对照减缓，但单位细胞叶绿素 a 含量略有升高；夏季温升(28℃+4℃)条件下，亚心形扁藻的增殖则受到明显抑制；亚心形扁藻对游离余氯非常敏感，游离余氯浓度仅为 0.1 mg/L 时，亚心形扁藻的增殖即受到抑制。

(2) 温升和游离余氯的联合作用不利于亚心形扁藻生长，当游离余氯为 0.1mg/L，温升 4℃和 7℃时，亚心形扁藻增殖速度降低，且温升 7℃较 4℃增殖趋势弱；当游离余氯为 0.3 mg/L，温升 4℃和 7℃时，亚心形扁藻的生长受到明显抑制，相比单独游离余氯 0.3 mg/L 作用时，温升和游离余氯联合作用可能增加对其生长的抑制作用，并且可能对其光合反应系统造成不可逆的破坏影响。

参考文献:

[1] 徐晓群, 曾江宁, 曾淦宁, 等. 滨海电厂温排水对浮游动物分布的影响[J]. 生态学杂志, 2008, 27(6): 933-939.
Xu Xiaoquan, Zeng Jiangning, Zeng Ganning, et al. Effects of thermal water discharged from coastal power plant on distribution of zooplankton[J]. Chinese Jounal of Ecology, 2008, 27(6): 933-939.

[2] 徐梦佳, 于磊, 赵彦伟, 等. 水库温排水增温模拟及其对富营养化影响分析[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(6): 1180-1188.
Xu Mengjia, Yu Lei, Zhao Yanwei, et al. The Simulation of Reservoir Water Warming by Thermal Discharge and Research on Reservoir Eutrophication[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(6): 1180-1188.

[3] Bamber R N, Seaby R M. The effects of power station entrainment passage on three species of marine planktonic crustacean, *Acartia tonsa* (Copepoda), *Crangon crangon* (Decapoda) and *Homarus gammarus* (Decapoda)[J]. Marine Environmental Research, 2004, 57(4): 281-294.

[4] 刘兰芬, 郝红, 鲁光四. 电厂温排水中余氯衰减规律及其影响因素的实验研究[J]. 水利学报, 2004, (5): 94-98.
Liu Lanfen, Hao Hong, Lu Guangsi. Experiment study on attenuation law of residual chlorine in cooling water discharged from thermal power plants[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, (5): 94-98.

[5] 李庆彪, 宋全山. 生物饵料培养技术 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
Li Qingbiao, Song Quanshan. Cultivation technique of live feeds [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999.

[6] Xie J, Zhang Y, Li Y, et al. Mixotrophic cultivation of *Platymonas subcordiformis*[J]. Journal of Applied Phycology, 2001, 13(4): 343-347.

[7] 陈晓娟, 廖利民, 赵昕宇, 等. 一株饵料微藻——亚心形扁藻的生长条件优化[J]. 福建水产, 2015, 37(4): 287-292.
Chen Xiaojuan, Liao Limin, Zhao Xinyu, et al. Optimization conditions for growth of *Platymonas subcordiformis* for bait[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2015, 37(4): 287-292.

[8] 江志兵, 曾江宁, 陈全震, 等. 热冲击和加氯后亚热带海区浮游植物细胞数量的动态变化[J]. 植物生态学报, 2008, 32(6): 1386-1396.
Jiang Zhibing, Zeng Jiangning, Chen Quanzhen, et al. Dynamic change of phytoplankton cell density after thermal shock and chlorination in a subtropical bay in China[J]. Journal of Plant Ecology, 2008, 32(6): 1386-1396.

[9] Bamber R N. The influence of rising background temperature on the effects of marine thermal effluents[J]. Journal of Thermal Biology, 1995, 20(1-2): 105-110.

[10] Sanders J G, Ryther J H, Batchelder J H. Effects of copper, chlorine, and thermal addition on the species composition of marine phytoplankton[J]. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 1981, 49(1): 81-102.

[11] Langford T. Ecology and cooling water use by power

stations[J]. ATOM, 1988, (385): 4-7.
[12] 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.
Zeng Jiangning. Ecological effect by thermal diacharged water from subtropical coastal power plants[D]. hangzhou: ZheJiang University, 2008.
[13] 张露, 黄莹莹, 陈雪初, 等. 电厂温排水对铜绿微囊藻生长影响的模拟研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(4): 1181-1186.
Zhang Lu, Huang Yingying, Chen Xuechu, et al. Simulation study on effects of thermal discharge from an electric power plant on *Microcystis aeruginosa*[J]. China Environmental Science, 2015, 35(4): 1181-1186.
[14] 钟楚, 张明达, 胡雪琼, 等. 温度变化对烟草光合作用光响应特征的影响[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 337-341.
Zhong Chu, Zhang Mingda, Hu Xueqiong, et al. Effects of temperature variation on the light-response characteristics of tobacco leaf photosynthesis[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 337-341.
[15] 陈梦齐, 刘紫丹, 戴文芳, 等. 象山港电厂温排水增温对浮游细菌群落空间分布的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20): 6574-6582.
Chen Mengqi, Liu Zidan, Dai Wenfang, et al. Effects of thermal discharge on the spatial distribution of bacterioplankton community near a power plant in Xiangshan Bay[J]. Acta Ecological Sinica, 2016, 36(20): 6574-6582.
[16] 江志兵, 曾江宁, 陈全震, 等. 滨海电厂冷却水余热和余氯对中华哲水蚤的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1401-1406.
Jiang Zhibing, Zeng Jiangning, Chen Quanzhen, et al. Effects of residual heat and chlorine in cooling water from coastal power plant on Calanussinicus[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1401-1406.
[17] Li X Y, Li B, Sun X L. Effects of a coastal power plant thermal discharge on phytoplankton community structure in Zhanjiang Bay, China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2014, 81(1): 210-217.
[18] 戴雅奇, 黄莹莹, 彭欣, 等. 电厂温排水对米氏凯伦藻生长影响的模拟研究[J]. 环境污染与防治, 2017, 39(增刊): 55-58.
Dai Yaqi, Huang Yingying, Peng Xin, et al. Study on the Effects of Thermal Discharge from an Electric Power Plant on *Karenia mikimotoi*[J]. 2017, 39(Supplement): 55-58.
[19] 毕亚梅. 余氯对浮游生物毒理效应及损失量初步评估[D]. 上海: 上海海洋大学, 2011.
Bi Yamei. Preliminary assessment on resource loss and biological toxicological effects of residual chlorine to plankton[D]. Shanghai : Shanghai Ocean University, 2011.

Study on the effects of thermal discharge temperature increase and free residual chlorine from an electric power plant on *Platymonas subcordiformis*

DAI Ya-qi[1, 2], QIU Jian-biao[3], PAN LI-ping[1], PENG Xin[3], LI Bin-bin[4], HUANG Ying-ying[1], CHEN Xue-chu[1]

(1. Shanghai Key Lab for Urban Ecological Processes and Eco-Restoration, School of Ecological and Environmental Sciences, East China Normal University, Shanghai 200241, China; 2. Shanghai Citic Yuanjun Environmental Co., Ltd., Shanghai 200331, China; 2. Zhejiang Mariculture Research Institute, Wenzhou 325005, China; 3. School of Environmental and Chemical Engineering, Shanghai University, Shanghai 200444, China)

Received: Nov. 2, 2017
Key words: thermal discharge; temperature increase; free residual chlorine; *Platymonas subcordiformis*

Abstract: This study investigated the effects of thermal discharge from an electric power plant on the growth of a typical green alga, *Platymonas subcordiformis*, under different conditions of temperature increase and free residual chlorine. The results showed that temperature increase had few effects on the growth of *P. subcordiformis* in spring or autumn, but it inhibited the algal growth in summer. *P. subcordiformis* was extremely sensitive to free residual chlorine. Only 0.1 mg/L free residual chlorine concentration could inhibit the algal growth, and the inhibitory effect increased with the free residual chlorine concentration. Free residual chlorine was more toxic with an increase in temperature. Under 4°C temperature increase combined with 0.1 mg/L free residual chlorine, the inhibitory effect became more obvious. Thermal discharge has a negative effect on the alga, and the biomass of *P. subcordiformis* would decrease even in an area with water far from the outfall.

(本文编辑: 梁德海)