

3种药物及个人护理品对斜生栅藻生长及光系统II的影响*

朱术超¹, 刘滨扬¹, 陈本亮², 张杰龙¹, 刘蔚秋¹

(1. 中山大学生命科学学院, 广东 广州 510275; 2. 海珠湿地维护中心, 广东 广州 510399)

摘要: 研究了乳糖酸红霉素 (ETM)、双氯芬酸钠 (DCF) 及壬基酚十氧乙烯醚 (NPEO₁₀) 等3种药物及个人护理品 (PPCPs) 对斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 的生长及光系统II (PS II) 的影响。结果表明: 3种 PPCPs 对斜生栅藻的生长及其 PSII 均有抑制作用并以 ETM 的毒性最大, 但 NPEO₁₀ 在低质量浓度时 (0~0.05 mg/L) 对斜生栅藻的生长及 PSII 具有一定的促进作用。对叶绿素荧光快速反应曲线的分析显示, ETM 同时抑制斜生栅藻 PSII 反应中心的供体侧和受体侧, 使 PSII 反应中心失活并降低光化学反应效率等, 而 DCF 和 NPEO₁₀ 主要抑制电子传递链 Q_A⁻ 后的电子传递过程。研究显示叶绿素荧光诱导动力学参数对于反映 PPCPs 对藻类的毒性特征具有较高的敏感性及其一定的特异性, 可作为 PPCPs 污染生态风险评价的潜在候选生物标志物。

关键词: 药物及个人护理用品; 斜生栅藻; IC50; 快速叶绿素荧光诱导动力学

中图分类号: Q89, X835 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2014) 01-0121-07

Effects of Three Pharmaceuticals and Personal Care Products on Growth and Photosystem II in *Scenedesmus obliquus*

ZHU Shuchao¹, LIU Binyang¹, CHEN Benliang², ZHANG Jielong¹, LIU Weiqiu¹

(1. School of Life Sciences, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Haizhu Wetland Maintenance Center, Guangzhou 510399, China)

Abstract: The effects of three Pharmaceuticals and Personal Care Products (PPCPs), namely erythromycin lactobionaten (ETM), diclofenac sodium (DCF) and polyoxyethylene nonylphenol ethers ($n = 10$, NPEO₁₀), on growth and photoystem II (PS II) of *Scenedesmus obliquus* were investigated. The results showed that the three PPCPs could significantly decrease the growth rate and inhibit the PS II function of the tested algae, among which, ETM was the most toxic, followed by NPEO₁₀ and DCF. However, low concentration (0.05 mg/L) of NPEO₁₀ could promote the growth rate and PS II function of *S. obliquus*. Analysis of chlorophyll fluorescence transient kinetics showed that ETM induced an inactivation of reaction center and inhibited both donor and acceptor sides of PS II reaction center, however, the other two PPCPs mainly inhibited the electron flow beyond Q_A⁻. Our study suggested that some chlorophyll fluorescence indices are highly sensitive and relatively specific to algal exposure of PPCPs, and may be potentially used as candidate biomarkers for the exposure of PPCPs.

Key words: Pharmaceuticals and Personal Care Products; *Scenedesmus obliquus*; IC 50; chlorophyll fluorescence transient kinetics

药物与个人护理品 (Pharmaceuticals and Personal Care Products, PPCPs) 的广泛应用及不当处理引

起的环境污染问题近年来已引起社会的广泛关注, 环境残留的 PPCPs 主要来源于抗生素、消炎镇痛药、

* 收稿日期: 2013-10-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (31070470, 31370490); 广东省科技计划资助项目 (2012B030800013)

作者简介: 朱术超 (1987年生), 男; 研究方向: 水环境监测及生态修复; 通讯作者: 刘蔚秋; E-mail: lsslwq@mail.sysu.edu.cn

雌激素、人工合成麝香及显影剂等^[1-2]。抗生素除应用于医疗行业外,还在养殖、食品等多行业应用,其中乳糖酸红霉素 (Erythromycin Lactobionate, ETM) 等大环内酯类抗生素使用量占全国市场的 10% 以上,且其在水环境中残留高,达到 1–2 $\mu\text{g/L}$ 的水平,在医院周边的废水中甚至可达到毫克级的水平^[3-4]。非甾体抗炎药 (NSAIDs) 具有抗炎、抗风湿、止痛、退热和抗凝血等作用,在临床上具有广泛应用,而双氯芬酸钠 (Diclofenac Sodium, DCF) 一直在非甾体抗炎药用量中位居前列^[5],在很多水环境中均监测到其存在,质量浓度可高达 15 $\mu\text{g/L}$ ^[6]。壬基酚聚氧乙烯醚 (NPEO_n, 其中 n 表示乙氧基的数量) 是一种常用非离子型表面活性剂,在洗涤剂、建材、涂料及造纸等行业中具有广泛的用途,并广泛存留于水环境中^[7-8]。相关研究报道显示以上 3 种 PPCPs 对水生生物,如大型蚤 (*Daphnia magna*), 鱼类,藻类等均具有毒性,其 EC₅₀ 介于数十微克每升至数十毫克每升之间^[9-12]。

藻类植物作为水生生态系统的初级生产者,是监测评价水环境质量的重要指示生物^[13]。研究环境中 PPCPs 对淡水藻类的毒性大小,对于评价这些污染物对淡水环境的生态风险具有重要的意义。另一方面植物叶绿素荧光诱导动力学技术能够快速灵敏、无损地反映光系统 II (PS II) 供体侧、受体侧及反应中心的状况^[14],是研究植物光合生理、植物环境保护及植物与逆境胁迫关系的理想探针^[15],此技术为污染物的生态风险评价提供了一个快速、简便的手段,但目前将此技术应用于环境生态风险评价的研究很少^[16]。

斜生栅藻 (*Scenedesmus obliquus*) 是淡水生态系统的典型浮游植物类群代表,常被用于水生生物毒理试验和评价。本研究选取抗生素 ETM、非甾体抗炎药 DCF 以及表面活性剂 NPEO₁₀ 作为研究对象,比较不同 PPCPs 对斜生栅藻生长的影响,并利用叶绿素荧光诱导动力学技术探讨上述药物对斜生栅藻光 PSII 的影响特征,为环境污染物的生态风险评价以及相应生物标志物的筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 藻种培养

实验藻种斜生栅藻 (*S. obliquus*) 取自中国科学院典型培养物保藏委员会淡水藻种库 (FACHB-collection)。培养基成分如下: 1.17 mmol/L NaNO₃, 0.085 mmol/L K₂HPO₄, 0.41 mmol/L MgSO₄·7H₂O, 0.34 mmol/L CaCl₂·2H₂O, 0.027 mmol/L KCl, 0.018

mmol/L FeCl₃·6H₂O, 1 mmol/L Na₂SiO₃, 0.015 mmol/L MnCl₂·4H₂O, 1.8 $\mu\text{mol/L}$ ZnCl₂, 0.42 $\mu\text{mol/L}$ CoCl₂·6H₂O, 1.7 $\mu\text{mol/L}$ Na₂MoO₄·2H₂O, 0.032 mmol/L 烟酸, 0.05 $\mu\text{mol/L}$ 核黄素, 0.68 $\mu\text{mol/L}$ 生物素, 1.1 $\mu\text{mol/L}$ 肌醇, 0.16 $\mu\text{mol/L}$ 氯化胆碱, 0.25 $\mu\text{mol/L}$ 胸腺嘧啶, 0.08 $\mu\text{mol/L}$ 乳清酸, 0.001 $\mu\text{mol/L}$ 钴胺素, 0.22 $\mu\text{mol/L}$ 叶酸, 0.001 $\mu\text{mol/L}$ 腐胺。

藻种接种于经 0.22 μm 微孔滤膜抽滤灭菌的培养基中,置于光照培养箱培养,光暗周期为 16 h: 8 h, 培养温度: 25 $^{\circ}\text{C}$ (Light) / 20 $^{\circ}\text{C}$ (Dark), 光照强度为 3 000 lx。藻种经一周培养后进行 PPCPs 暴露实验。

1.2 PPCPs 处理

乳糖酸红霉素 (Erythromycin Lactobionate, ETM)、双氯芬酸钠 (Diclofenac Sodium, DCF) 和壬基酚十氧乙烯醚 (Polyoxyethylene Nonylphenol ethers, NPEO₁₀) 均购自武汉远城科技有限公司 (纯度 $\geq 98\%$)。

3 种 PPCPs 均直接以蒸馏水溶解。将藻类培养液直接接种于加有不同质量浓度药品的培养基中 (200 mL) 培养,接种初始密度为 1.9×10^5 cells/mL。根据不同 PPCPs 的毒性特征及预实验结果,按表 1 设置 3 种药物的暴露质量浓度梯度,各处理设 3 个重复。

表 1 乳糖酸红霉素、双氯芬酸钠及壬基酚十氧乙烯醚对斜生栅藻的处理质量浓度

Table 1 Treatment concentrations of ETM, DCF and NPEO₁₀ on *Scenedesmus obliquus*

PPCPs	$\rho / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$
ETM	0, 0.025, 0.075, 0.25, 0.75, 1.25
DCF	0, 0.5, 2.5, 5.0, 7.5, 10
NPEO ₁₀	0, 0.05, 0.25, 0.75, 1.50, 2.25

1.3 生长曲线的测定和 IC₅₀ 的计算

实验开始后,每 24 h 取 0.1 mL 培养液用浮游生物计数框在显微镜下定量镜检,确定细胞密度,连续测定 7 d,绘制生长曲线。利用概率分析法计算不同 PPCPs 对斜生栅藻的 IC₅₀。

1.4 叶绿素荧光诱导动力学测定

暴露实验进行 96 h 后,分别取各处理组藻液样品 1 mL,加入 2 mL 无菌水后利用植物效率仪 (PEA, Hansatech Ltd., 英国) 于室温下进行叶绿素荧光测定。测定前各样品暗适应 20 min。

叶绿素荧光参数的分析及具体计算方法根据相关文献进行^[16-17]。

2 结果与分析

2.1 生长速率

生长曲线研究结果显示, ETM 对斜生栅藻的生长影响具明显抑制作用, 且随着质量浓度的增加, 斜生栅藻的生长受到的抑制效应明显增强 (图 1A)。

DCF 各处理质量浓度在前两天对斜生栅藻未表现出明显的毒性效应, 在第 4-7 天, 各处理质量浓

度相继出现抑制效应, 并在第 5 天后进入负增长阶段 (图 1B)。DCF 对斜生栅藻生长的抑制率随着处理质量浓度的上升而逐渐增大, 在第 7 天其最大抑制率可达 179%, 表明 DCF 对斜生栅藻有较明显的亚急性毒性效应。

如图 1C, 低质量浓度 NPEO₁₀ (0.05 mg/L) 对斜生栅藻具有一定的兴奋效应, 但当质量浓度高于 0.75 mg/L 时, 斜生栅藻开始表现出生长抑制效应, 且抑制程度随处理质量浓度的增加而上升 (图 1C)。

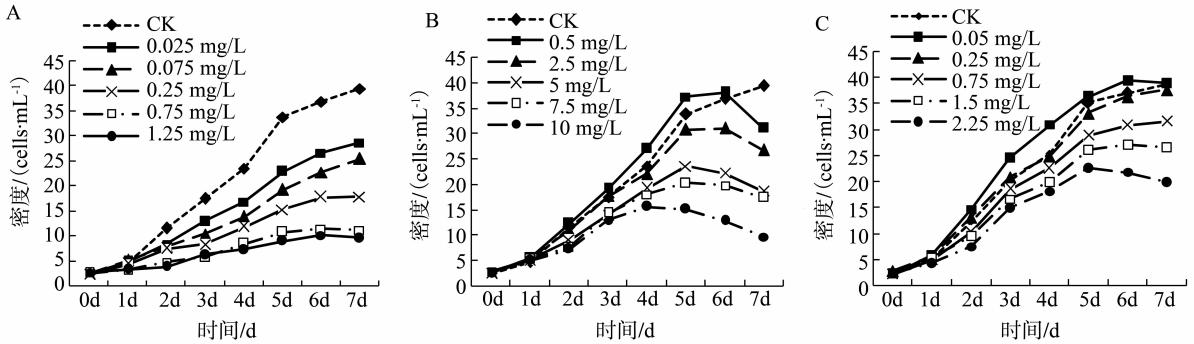


图 1 乳糖酸红霉素、双氯芬酸钠及壬基酚十氧乙醚对斜生栅藻生长的影响

Fig. 1 Effects of ETM, DCF and NPEO₁₀ on growth of *Scenedesmus obliquus*

表 2 显示了 3 种 PPCPs 对斜生栅藻 24, 72, 96, 120 以及 168 h 的 IC₅₀。斜生栅藻经 ETM 处理后的 IC₅₀ 在 24 h 到 72 h 之间由 0.65 mg/L 下降到 0.11 mg/L, 而随后一直较为稳定。经 DCF 处理后, 斜生栅藻在 96 h 之前未表现出明显的抑制效应, 至 120 h 时其 IC₅₀ 为 8.07 mg/L, 到 168 h 时 IC₅₀ 降至 3.34 mg/L。斜生栅藻经 NPEO₁₀ 处理后的 IC₅₀ 在 72 h 至 96 h 之间上升, 但此后明显下降, 至 168 h 时 IC₅₀ 为 2.32 mg/L。总体而言 3 种 PPCPs 中 ETM 对斜生栅藻的毒性最大, NPEO₁₀ 次之, DCF 最小, 但 DCF 和 NPEO₁₀ 的毒性随处理时间延长有逐渐增大的趋势。

2.2 叶绿素荧光诱导动力学

2.2.1 ETM ETM 处理使斜生栅藻单位反应中心吸收的光能 (ABS/RC) 和单位反应中心所捕获的光能 (TRo/RC) 均上升, 但单位面积反应中心的数量 (RC/CS₀) 下降, 且最大光化学效率 (φP₀)、用于电子传递的量子产额 (φE₀) 以及反应中心捕获的光能中用于将电子传递到电子传递链 Q_A⁻ 后的电子受体的比率 (ψ₀) 均明显下降, 导致

表 2 不同处理时间乳糖酸红霉素、双氯芬酸钠及壬基酚十氧乙醚对斜生栅藻的 IC₅₀¹⁾

Table 2 The IC₅₀ of ETM, DCF and NPEO₁₀ on *Scenedesmus obliquus* at different treatment times

PPCPs	24 h	72 h	96 h	120 h	168 h
ETM	0.65	0.11	0.12	0.10	0.13
DCF	--	--	--	8.07	3.34
NPEO ₁₀	--	4.38	4.97	4.46	2.32

1) "--" 表示实验条件下未表现明显抑制效应

单位面积的热耗散 (DI₀/RC) 及用于热耗散的量子产额 (φDo) 大幅上升, 并最终导致斜生栅藻 PSII 性能指数 (PI_{abs}) 大幅下降, 当 ETM 处理质量浓度为 1.25 mg/L 时, 斜生栅藻的 PI_{abs} 仅为对照组的 1.7%。ETM 处理使还原速率 (M₀) 略有上升, 而还原 Q_A 所需能量 (S_m) 及被还原的次数 (N) 明显上升, 表明 ETM 对于 PSII 受体侧的抑制作用主要表现在 Q_A 容量的下降, 对于其它电子传递体的影响较小, 造成大量能量用于还原 Q_A, 以保证 Q_A 传递电子的顺利进行。

ETM 对于斜生栅藻放氧复合体也有强烈的破坏作用, 0.025 mg/L 的处理质量浓度即使斜生栅藻放氧复合体比例明显下降, 随着 ETM 质量浓度的升高, 下降幅度逐渐增大。当 ETM 质量浓度高于 0.075 mg/L 时, Q_B 与反应中心的结合率也开始下降, 且该效应随着 ETM 质量浓度的上升而逐渐增强, 表明 ETM 可抑制 PSII 供体侧 (表 3)。

ETM 处理可使斜生栅藻 PSII 性能指数的驱动力 (DFabs) 大幅下降, 而构成 PSII 性能指数的 3 个组成部分中基于吸收单位光能的反应中心数量的驱动力 ($\log(RC/ABS)$) 以及原初光化学反应的驱动力 ($\log \varphi_{Po}/(1 - \varphi_{Po})$) 下降最为明显 (图 2B), 表明 ETM 可抑制斜生栅藻 PSII 的反应中心活性, 并降低光化学反应效率。

2.2.2 DCF DCF 对斜生栅藻光合系统的毒性远低于 ETM, 在 DCF 质量浓度低于 2.5 mg/L 时, 对斜生栅藻 PSII 性能 (PI_{abs}) 有轻微兴奋效应 (图 2C), 当 DCF 质量浓度继续升高时, PSII 性能下降, 至 10.0 mg/L 时, 斜生栅藻 PI_{abs} 约为对照组的 56.9%。DCF 对于斜生栅藻 ABS/RC 以及 φ_{Po} 的影响不显著, 但可诱导 ψ_o 明显下降; 此外, DCF 对 Q_A 还原速率 (M_o) 的影响与 ETM 类似, 但对 S_m 及 N 的影响与 ETM 相反, 表明 DCF 引起斜生栅藻热耗散 (φ_{Do} , D_{Io}/RC) 大幅上升的主要原因在于对 Q_A^- 后的电子传递产生明显的抑制效应 (图 1C)。DCF 对于放氧复合体的影响较小, 仅在 DCF 质量浓度高于 7.5 mg/L 时可诱导 Q_B 结合率轻微下降 (表

3), 表明 DCF 仅轻微抑制 PSII 供体侧。

通过构成性能指数驱动力的 3 个组成部分对 DCF 的响应结果可以看出, 在 DCF 质量浓度低于 2.5 mg/L 时, DFabs 的上升主要由于基于吸收单位光能的反应中心数量的驱动力 ($\log(RC/ABS)$) 以及原初光化学反应的驱动力 ($\log \varphi_{Po}/(1 - \varphi_{Po})$) 的上升; 而高质量浓度 DCF 对 DFabs 的抑制效应则主要通过对暗反应 ($\log \psi_o/(1 - \psi_o)$) 的抑制, 即抑制 Q_A^- 后的电子传递 (图 2D)。

2.2.3 NPEO₁₀ 当 NPEO₁₀ 质量浓度为 0.05 mg/L 时, 对斜生栅藻光合系统 II 有较明显的兴奋作用, 其 PI_{abs} 提升至对照组的 120%。当 NPEO₁₀ 质量浓度继续上升时, 其 PI_{abs} 持续下降, 至 2.25 mg/L 时, PI_{abs} 仅为对照组的 35% (图 2E)。在对各荧光参数的影响方面, NPEO₁₀ 对斜生栅藻的影响与 DCF 类似, 均对 Q_A 还原及电子传递相关参数 (S_m , N , ψ_o , φ_{Eo} , ET_o/RC) 有较强烈的抑制作用, 从而使光合系统热耗散上升。NPEO₁₀ 对放氧复合体以及 Q_B 蛋白结合率的影响也不显著, 仅在质量浓度为 0.05 mg/L 时导致 Q_B 与反应中心的结合率略上升 (表 3)。

构成 DFabs 的 3 个组成部分中, 基于吸收单位光能的反应中心数量的驱动力 ($\log(RC/ABS)$) 对 NPEO₁₀ 的响应不明显, 低质量浓度 NPEO₁₀ 对于原初光化学反应驱动力 ($\log \varphi_{Po}/(1 - \varphi_{Po})$) 的兴奋效应, 而高质量浓度 NPEO₁₀ 对于暗反应驱动力 ($\log \psi_o/(1 - \psi_o)$) 的抑制效应较为明显 (图 2F)。

表 3 乳糖酸红霉素、双氯芬酸钠及壬基酚十氧乙烯醚对斜生栅藻放氧复合体 (OEC) 和 Q_B 结合中心的影响¹⁾

Table 3 Effects of ETM, DCF and NPEO₁₀ on OEC and Q_{Bc} combined center of *Scenedesmus obliquus*

组别	CK	1	2	3	4	5
ETM						
OEC 比例	1	0.986*	0.928*	0.881*	0.633*	0.523*
Q_B 结合中心比例/%	94.67	94.62	93.87*	93.39*	89.72*	89.58*
DCF						
OEC 比例	1	0.996	1.002	0.991	1.004	1.001
Q_B 结合中心比例/%	94.67	94.65	94.14	93.89	93.52*	93.29*
NPEO ₁₀						
OEC 比例	1	1.012	1.006	0.999	1.003	0.998
Q_B 结合中心比例/%	94.67	96.74*	95.32	94.58	94.2	94.19

1) * 表示处理组与对照组的差异显著 ($p < 0.05$); 实验组 1-5 号分别代表 ETM 处理质量浓度为 0.025, 0.075, 0.25, 0.75, 1.25 mg/L, DCF 处理质量浓度为 0.5, 2.5, 5.0, 7.5, 10 mg/L, NPEO₁₀ 处理质量浓度为 0.05, 0.25, 0.75, 1.5, 2.25 mg/L

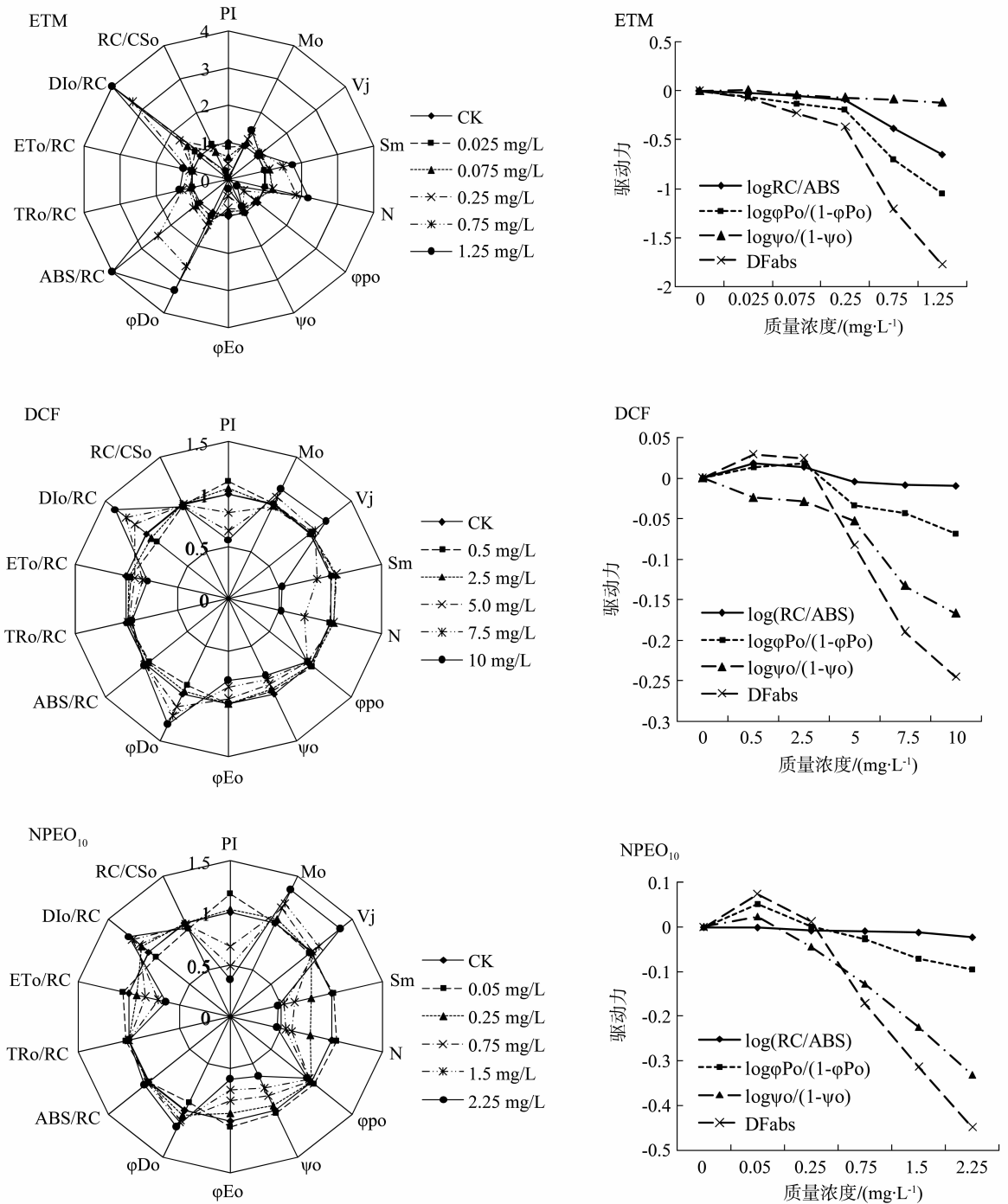


图 2 斜生栅藻对照组及 PPCPs 处理组部分 OJIP - 分析参数雷达图 (A, C, E) 及基于光能吸收的推动力指数及其 3 个组成部分 (B, D, F)

Fig. 2 Spider plot indicating selected OJIP-Test parameters (A, C, E) and the driving force based on equal numbers of photons absorbed by PSII and its three components (B, D, F) of *Scenedesmus obliquus* in control and PPCPs treatment groups

3 讨论

3.1 ETM 对斜生栅藻的影响

研究显示 ETM 等大环内酯类抗生素是一类典型的蛋白质合成抑制剂, 可直接抑制叶绿体基因的表达, 使包括反应中心, 光合电子传递蛋白以及一些

关键酶在内的蛋白合成受阻, 进而导致光合系统机能整体下降, 并影响整个细胞的生长繁殖^[16]。0.25 mg/L 的 ETM 就可对斜生栅藻的生长产生毒性作用, 其对斜生栅藻毒性与其对羊角月牙藻的毒性接近^[18]。

本实验中 ETM 对斜生栅藻 PSII 的多步反应有

明显的抑制作用可能主要与其抑制蛋白合成有关。

3.2 DCF 对斜生栅藻的影响

DCF 进入水体中会很快被光解^[19], 研究显示 DCF 光解使测试细菌受到的急性毒性越来越弱^[20], 但本研究中, DCF 对斜生栅藻的毒性随着暴露时间的延长而增强, 显示不同物种对 DCF 光解中间产物的敏感性可能不同

DCF 不具有抑制蛋白质合成的功能, 因此它们对于叶绿体基因的表达并无直接的影响。本研究中 DCF 对于斜生栅藻 PSII 的毒性作用主要体现为使 ϕE_o 、 ψ_o 、 ET_o/RC 等参数下降, 且 $\log \psi_o/(1 - \psi_o)$ 的敏感度显著高于 $\log RC/ABS$ 和 $\log \phi P_o/(1 - \phi P_o)$, 显示 DCF 对斜生栅藻 PSII 最主要的作用位点是 Q_A^- 后的电子传递链, 其对叶绿素荧光参数的影响明显不同于 ETM。

3.3 NPEO₁₀对斜生栅藻的影响

本研究中, 低质量浓度的 NPEO₁₀ 对于斜生栅藻的生长及光合系统均具有一定程度的兴奋效应。研究表明, 低质量浓度的 NPEO₁₀ 一方面可以增强类囊体膜与一些结合蛋白的亲密度, 从而增加电子传递的效率^[21]; 另一方面, 低质量浓度的 NPEO₁₀ 等表面活性剂对于植物体内一些酶的活性具有一定的促进效应, 从而增强细胞代谢, 促进细胞生长^[22]。本研究结果与此观点相符。

本研究中, 高质量浓度 NPEO₁₀ 对斜生栅藻具有较明显的急性毒性, 且经过较长时间暴露以后, 其毒性明显增强, 这可能与 NPEO₁₀ 在水体中的降解有关^[23-24]。高质量浓度的 NPEO₁₀ 对光合系统的影响与 DCF 类似, 都是主要抑制 Q_A^- 后的电子传递链, 亦与其它一些非蛋白质合成抑制类污染物对光系统的影响方式类似^[25-26]。

4 结 论

ETM 对斜生栅藻的生长具有强烈的急性亚急性毒性效应, 可抑制放氧复合体以及反应中心等光合系统蛋白的合成, 继而导致 PSII 的整体功能下降。DCF 对斜生栅藻具有一定的亚急性毒性效应, 其抑制效应随时间的延长而增强, DCF 对 PSII 的最主要作用位点是 Q_A^- 后的电子传递链, 叶绿素荧光指标的变化明显不同于 ETM 作用下的情况, 显示叶绿素荧光参数对于不同类型污染物具有一定程度的特异性。NPEO₁₀ 对斜生栅藻表现出较明显的急性亚急性毒性效应, 且其毒性强于 DCF, 但显著低于 ETM, 其对 PSII 的抑制机理与 DCF 类似,

故其叶绿素荧光参数的变化较相似。此外, 低质量浓度的 NPEO₁₀ 对于斜生栅藻的生长及光合系统均具有一定程度的兴奋效应。研究显示, 叶绿素荧光参数可以灵敏地反映污染物对藻类的生长抑制特征且测量方法快速、简单, 可作为 PPCPs 污染环境生态风险评价的候选生物标志物。

参考文献:

- [1] 胡洪营, 王超, 郭美婷. 药品和个人护理用品 (PPCPs) 对环境的污染现状与研究进展[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 947-952.
- [2] 安婧, 周启星. 药品及个人护理用品 (PPCPs) 的污染来源、环境残留及生态毒性[J]. 生态学杂志, 2009, 28(9): 1878-1890.
- [3] YANG S, CARLSON KH. Solid-phase extraction-high performance liquid chromatography-ion trap mass spectrometry for analysis of trace concentrations of macrolide antibiotics in natural and wastewater matrices[J]. Chromatogr A, 2004, 1038: 141-155.
- [4] BOXALL ABA, FOGG LA, BLACKWELL PA, et al. Veterinary medicines in the environment[J]. Rev Environ Cont Tox, 2004, 180: 1-91.
- [5] 刘国强, 刘保良. 双氯芬酸钠新制剂研究进展[J]. 中国药业, 2003, 12(9): 71-72.
- [6] JUX U, BAGINSKI M, ARNOLD HG, KRÖNKE M, et al. Detection of pharmaceutical contaminants of river, pond, and tap water from Cologne (Germany) and surroundings[J]. Int J Hyg Environ Heal, 2002, 205: 393-398.
- [7] VAZQUEZ-DUHALT R, MARQUEZ-ROCHA F, PONCE E, et al. Nonylphenol, an integrated vision of a pollutant[J]. Appl Ecol Environ Res, 2006, 4: 1-15.
- [8] FRIES E, PÜTTMANN W. Occurrence and behavior of 4-nonylphenol in river water of Germany[J]. J Environ Monitor, 2003, 5: 598-603.
- [9] SCHWAIGER J, FERLING H, MALLOW U, et al. Toxic effects of the non-steroidal anti-inflammatory drug diclofenac. Part I. Histopathological alterations and bioaccumulation in rainbow trout[J]. Aquat Toxicol, 2004, 68(2): 141-150.
- [10] MEINERTZ J R, SCHREIER T M, BEMARDY J A. Chronic toxicity of erythromycin thiocyanate to *Daphnia magna* in a flow-through, continuous exposure test system [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2011, 87: 621-625.
- [11] CORREA-REYES G, VIANA M T, MARQUEZ-ROCHA F, et al. Nonylphenol algal bioaccumulation and its effect through the trophic chain [J]. Chemosphere, 2007, 68: 662-670.

- 文集(1), 2008.
- [12] 李馨,李旭祥,王婷,等. 基于因子分析的黄河流域人居环境评价[J]. 环境科学与技术, 2010, 33(6): 189 - 193.
- [13] 李明. 基于遗传算法改进的BP神经网络的城市人居环境质量评价研究[D]. 沈阳: 辽宁师范大学, 2007.
- [14] 党安荣,毛其智,王晓栋,等. 丽江地区人居环境的GIS空间分析[J]. 地球信息科学, 2000, 2(4): 40 - 45.
- [15] 陈庆彩,李楠. 模糊综合评判及主成分分析在城市人居环境评价中的实例比较[J]. 资源与人居环境, 2009(2): 71 - 74.
- [16] 熊鹰,曾光明,董力三,等. 城市人居环境与经济协调发展不确定性定量评价——以长沙市为例[J]. 地理学报, 2007, 62(4): 397 - 406.
- [17] 顾文选,罗亚蒙. 宜居城市科学评价标准[J]. 北京规划建设, 2007(1): 7 - 10.
- [18] 封志明,唐焰,杨艳昭,等. 基于GIS的中国人居住环境指数模型的建立与应用[J]. 地理学报, 2008, 63(12): 1327 - 1336.
- [19] 郝慧梅,任志远. 基于栅格数据的陕西省人居环境自然适宜性测评[J]. 地理学报, 2009, 64(4): 498 - 506.
- [20] 生态屏障、功能区划与人口发展课题组. 科学界定人口发展功能区促进区域人口与资源环境协调发展——生态屏障、功能区划与人口发展研究报告[J]. 人口研究, 2008, 32(3): 1 - 14.
- [21] 岳健,雷军,马天宇,等. 关于新疆人居环境自然适宜性评价的讨论[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 11: 1 - 7.
- [22] THOM E C. The discomfort index [J]. Weatherwise, 1959, 12(2): 57 - 61.
- [23] 刘清春,王铮,许世远. 中国城市旅游气候舒适性分析[J]. 资源科学, 2007(1): 133 - 141.
- [24] 黄奇章. 广东降水气候特征及其成因分析[J]. 热带地理, 1990(2): 113 - 124.

(上接第126页)

- [12] GAO Q T, TAM N F Y. Growth, photosynthesis and antioxidant responses of two microalgal species, *Chlorella vulgaris* and *Selenastrum capricornutum*, to nonylphenol stress [J]. Chemosphere, 2011, 82: 346 - 354.
- [13] 李开明,谢丹平,陈晓宏,等. 广州古廖涌生物修复的指示藻类[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2009, 48(1): 76 - 80, 86.
- [14] 李鹏民,高辉远,RETOJ STRASSER. 快速叶绿素荧光动力学分析在光合作用研究中的应用[J]. 植物生理学与分子生物学报, 2005, 31(6): 559 - 566.
- [15] 曹春晖,孙世春,王学魁,等. 锰浓度对米氏凯伦藻叶绿素荧光特性及生长的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(19): 5280 - 5288.
- [16] LIU B Y, NIE X P, LIU W Q, et al. Toxic effects of erythromycin, ciprofloxacin and sulfamethoxazole on photosynthetic apparatus in *Selenastrum capricornutum* [J]. Ecotox Environ Safe, 2011, 74: 1027 - 1035.
- [17] APPENROTH K J, STOCKEL J, SRIVASTAVA A, et al. Multiple effects of chromate on the photosynthetic apparatus of *Spirodela polyrhiza* as probed by OJIP chlorophyll a fluorescence measurements [J]. Environ Pollut, 2001, 115: 49 - 64.
- [18] NIE X P, LIU B Y, YU H J, et al. Toxic effects of erythromycin, ciprofloxacin and sulfamethoxazole exposure to the antioxidant system in *Pseudokirchneriella subcapitata* [J]. Environ Pollut, 2013, 172: 23 - 32.
- [19] SCHMITT-JANSEN M, BARTELS P, ADLER N, et al. Phytotoxicity assessment of diclofenac and its phototransformation products [J]. Anal Bioanal Chem, 2007, 387: 1389 - 1396.
- [20] COELHO A D, SANS C, AGUERA A, et al. Effects of ozone pre-treatment on diclofenac: intermediates, biodegradability and toxicity assessment [J]. Sci Total Environ, 2009, 407: 3572 - 3578.
- [21] 林永成. 海洋微生物及其代谢产物[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 39 - 40.
- [22] 周小勇,仇荣亮,胡鹏杰,等. 表面活性剂对长柔毛委陵菜(*Potentilla griffithii* var. *velutina*)修复重金属污染的促进作用[J]. 生态学报, 2009, 29(1): 283 - 290.
- [23] CHEN L, ZHOU H Y, DENG Q Y. Photolysis of nonylphenol ethoxylates: the determination of the degradation kinetics and the intermediate products [J]. Chemosphere, 2007, 68: 354 - 359.
- [24] YOSHIDA H, KUDARI S, HORI T, et al. Distribution of Particulate Nonylphenol in Lake Biwa, Japan [J]. Water Air Soil Poll, 2009, 200: 267 - 276.
- [25] GREENBERG B M, HUANG X D, BABU S B, et al. Inhibition of photosynthesis by polycyclic aromatic hydrocarbon pollutants [J]. Environ Respon Adapt, 1997, 29: 58.
- [26] 刘玉晓,龚丽丽,刘芳,等. 链格孢菌毒素对莱茵衣藻光系统II的多重影响[J]. 西北植物学报, 2008, 28(1): 119 - 124.