

DOI: 10.19663/j.issn2095-9869.20200220004

http://www.yykxjz.cn/

孙小雨, 王祎哲, 李旻, 徐旭, 周文礼, 邵蓬, 高金伟, 窦勇, 贾旭颖. 多氯联苯(PCB₁₅₃)对湛江叉鞭金藻生理生态和超微结构的影响. 渔业科学进展, 2021, 42(4): 158-167

SUN X Y, WANG Y Z, LI Y, XU X, ZHOU W L, SHAO P, GAO J W, DOU Y, JIA X Y. Effects of polychlorinated biphenyls (PCB₁₅₃) on the physiological ecology and ultrastructure of *Dicrateria zhanjiangensis*. Progress in Fishery Sciences, 2021, 42(4): 158-167

多氯联苯(PCB₁₅₃)对湛江叉鞭金藻 生理生态和超微结构的影响*

孙小雨 王祎哲 李旻 徐旭 周文礼
邵蓬 高金伟 窦勇 贾旭颖^①

(天津农学院水产学院 天津市水产生态及养殖重点实验室 天津 300384)

摘要 为研究多氯联苯对海洋微藻的生理生态毒性,以湛江叉鞭金藻(*Dicrateria zhanjiangensis*)为研究对象,进行7 d的六氯联苯(PCB₁₅₃)胁迫实验,比较其生长、光合色素含量、谷胱甘肽 S-转移酶(GST)、超氧化物歧化酶(SOD)活性和丙二醛(MDA)含量以及藻细胞超微结构的变化情况。结果显示,PCB₁₅₃胁迫对湛江叉鞭金藻的生长、光合色素含量及抗氧化和解毒相关指标均有显著影响($P<0.05$)。随着 PCB₁₅₃浓度的增大,其对湛江叉鞭金藻生长抑制作用不断增大,250 $\mu\text{g/L}$ 胁迫组藻细胞在第5天全部死亡。PCB₁₅₃胁迫后,湛江叉鞭金藻叶绿素 *a*、叶绿素 *c*、类胡萝卜素和总光合色素均显著下降($P<0.05$),且随着 PCB₁₅₃浓度的增加,各实验组光合色素含量下降比例增大。PCB₁₅₃胁迫后,各胁迫组藻细胞 MDA 含量显著增加;低浓度 PCB₁₅₃(< 25 $\mu\text{g/L}$)胁迫显著诱导 SOD 和 GST 活性的提高;而高浓度 PCB₁₅₃(> 25 $\mu\text{g/L}$)胁迫则显著抑制 2 种酶活性。短期低浓度 PCB₁₅₃胁迫会改变金藻细胞超微结构,使细胞器形态改变、聚缩;高浓度 PCB₁₅₃胁迫则会直接破坏细胞膜的完整性,使细胞破裂,导致细胞自溶死亡。研究表明,PCB₁₅₃抑制叉鞭金藻的生长和光合色素合成,低浓度 PCB₁₅₃激活抗氧化和解毒系统,提高其自我保护水平,高浓度 PCB₁₅₃加剧脂质过氧化,破坏抗氧化和解毒系统正常功能,导致细胞破裂死亡。

关键词 湛江叉鞭金藻; 六氯联苯 PCB₁₅₃; 光合色素; 超氧化物歧化酶; 丙二醛; 谷胱甘肽 S-转移酶; 超微结构

中图分类号 X826 **文献标识码** A **文章编号** 2095-9869(2021)04-0158-10

多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)是国际上广泛存在的一大类人为污染物,共有 209 种具有不同理化和毒理学性质的同系物(Grilo *et al*, 2014),对生物内分泌、神经、免疫和生殖系统等均能产生生理毒

* 国家级大学生创新创业训练计划项目(201810061008)、天津市自然科学基金青年项目(18JJCQNJC14800)、天津市 131 人才工程项目(J01009030726)和天津市水产产业技术体系创新团队项目(ITFRS2017005)共同资助 [This work supported by College Students' Innovative Entrepreneurial Training (201810061008), Youth Fund of Tianjin Natural Science Foundation (18JJCQNJC14800), Project of Tianjin "131" Cultivation of Innovative Talents(J01009030726), and Tianjin Aquatic Industry Technology System Innovation Team Project (ITFRS2017005)]. 孙小雨, E-mail: sunsunny110@163.com

① 通讯作者: 贾旭颖, 副教授, E-mail: jiaxuying1109@sina.com

收稿日期: 2020-02-20, 收修改稿日期: 2020-04-03

性。多氯联苯可以通过废弃的工业设备以及建筑材料等释放到环境中,广泛存在于大气、土壤和水环境中,从而对环境造成了潜在的威胁(Kohler *et al.*, 2005; Hassan, 2018)。尽管自 20 世纪 70 年代,国际上普遍禁止多氯联苯的使用,但由于其理化性质稳定、不易降解的特点,在大多数工业化国家,多氯联苯不仅仍然存在于环境中,而且还可以通过食物网迁移、积累和生物放大(Freitag *et al.*, 1982; Ulbrich *et al.*, 2004)。由于多氯联苯的疏水性和低降解性,相对于水环境中的浓度,多氯联苯可在生物群中累积数千或数万倍的浓度,从而对从浮游植物到海洋哺乳动物等多种物种产生毒理学影响(Song *et al.*, 2012; Filipkowska, 2013)。PCB₁₅₃(2,2',4,4',5,5'-六氯联苯)属于非二噁英类(非共面)同类物(胡芳等, 2012; 陈曦, 2014),是人体脂肪组织中含量最多的 PCBs 之一,与人类关系密切(Duartedavidson *et al.*, 1994; Kimbrogh, 1995; Ghosh *et al.*, 2003)。六氯联苯是常见的环境内分泌干扰物之一,能够使生物体多巴胺、雌激素等代谢异常,扰乱免疫系统。六氯联苯在我国东海岸水体中污染程度较高(徐添翼等, 2016)。梅婕(2014)通过探究 Cd-PCB₁₅₃对海水青鳉(*Oryzias melastigma*)仔鱼的影响时发现,随着水中 Cd-PCB₁₅₃浓度的增大,鱼体中 Cd-PCB₁₅₃浓度增大, RNA/DNA 和 *Shh* 基因相对表达量降低。韩现芹等(2019)探究 PCB₁₅₃对半滑舌鳎(*Cynoglossus semilaevis*)抗氧化酶影响时发现,暴露 24 h 和 48 h 时,半滑舌鳎体内超氧化物歧化酶(SOD)活性呈先诱导后抑制的趋势。李娜(2012)研究 PCBs 在水生食物链中生物毒性及富集效应,发现大型蚤(*Daphnia magna*)、斑马鱼(*Brachydanio rerio* var)体内的 PCBs 主要来源于摄食食物藻类等,在探究 PCB₁₅₃对蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa*)、斜生栅藻(*Scenedesmus obliquus*)的影响时发现,PCB₁₅₃对藻细胞内的叶绿素 *a*、*b* 等均有抑制作用,低浓度 PCB₁₅₃可提高 2 种微藻的 SOD 活性,高浓度 PCB₁₅₃抑制 2 种微藻的 SOD 活性。

微藻是一种指示生物,常用指标有生长速率、细胞密度和叶绿素含量等,这些指标具有可靠、快速和重复性好等优点,常被用于评价水体中重金属和其他新型污染物的毒性,是进行环境风险评价和确定水环境中有毒化学物质释放限值的重要依据(Monteiro *et al.*, 2011; Stauber *et al.*, 2011; Ebenezer *et al.*, 2013)。目前,常用的淡水微藻主要有淡水小球藻(*Chlorella vulgaris*)、羊角月牙藻(*Pseudokirchneriella subcapitata*)和四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda*)等。海洋微藻是海洋生物食物链(网)的基础,微藻细胞所吸附或积累的 PCB₁₅₃可通过海洋食物链在高营养级生物体内富集,

最终进入人体产生危害(迟潇等, 2019)。目前,关于多氯联苯对海洋微藻的研究相对较少。

本研究选择我国海域常见的海洋微藻——湛江叉鞭金藻(*Dicrateria zhanjiangensis*)为研究对象,进行 PCB₁₅₃胁迫实验,通过分析其生长、光合色素含量、抗氧化、解毒相关指标及藻细胞超微结构的变化规律,探究湛江叉鞭金藻对六氯联苯的生理生态响应规律,为评估多氯联苯对海洋生态系统造成的生态风险的基础研究提供依据,为探究多氯联苯对水生食物链中的影响积累数据,同时,为微藻在海洋环境风险评估和有机污染物生物防治中的应用提供科学参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用湛江叉鞭金藻由天津市水产生态及养殖重点实验室提供。PCB₁₅₃购自德国 Dr. Ehrenstorfer GmbH 公司,使用 90%丙酮助溶,超纯水稀释,配制成 100 mg/L 储备液待用。SOD、谷胱甘肽 S-转移酶(GST)活性试剂盒、丙二醛(MDA)含量试剂盒均购自北京索莱宝科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 湛江叉鞭金藻的培养方法 湛江叉鞭金藻培养用水为正常海水,盐度为 30,培养基为 f/2 培养基,光照培养箱中培养,培养温度为(26±1)℃,光暗周期 12 h : 12 h,光照强度为 2500 lx。每天摇动锥形瓶 3 次,并随机更换位置保证其受光照均匀。

1.2.2 毒性实验 根据预实验结果,正式实验设置空白对照组(CK)、丙酮对照组(AT)及 PCB₁₅₃浓度分别为 1、5、25、50、125 和 250 μg/L 的胁迫组,丙酮对照组的丙酮浓度与最高浓度实验组丙酮浓度一致,为 0.125 μL/mL。每组 3 个平行,所用容器为 500 mL 三角烧瓶,藻液体积为 300 mL,实验藻初始密度为 1.28×10⁶ cell/mL,实验共进行 7 d,每天取 5 mL 藻液测定其生物量;并在胁迫初期(3 d),测定其叶绿素 *a*、叶绿素 *c* 和类胡萝卜素的含量,并分别取空白对照组、5 μg/L 和 250 μg/L 处理组藻液 20 mL 进行电镜观察;在实验结束时(7 d),取剩余藻液,测定其 SOD、GST 活性和 MDA 含量。

1.2.3 测定方法 藻细胞密度的测定方法采用血球计数板法(张士瑾等, 1997),每天 17:00 每组取 5 mL 藻液,用血球计数板在显微镜下计数,每个样品计数 3 次,取平均值。

相对生长速率(relative growth rate)公式:

$$\mu = (\ln N - \ln N_0) / (t - t_0)$$

式中, N 和 N_0 分别为 t 时刻和初始(t_0 时刻)藻密度。

实验结束时(7 d), 采用 Jeffrey 分光光度法(帕森斯, 1989)测定藻液色素含量。公式如下:

$$\text{叶绿素 } a (C_a): \rho\text{Chl.}a = 11.85E_{664} - 1.54E_{647} - 0.08E_{630}$$

$$\text{叶绿素 } c (C_c): \rho\text{Chl.}c = 24.52E_{630} - 1.67E_{664} - 7.6E_{647}$$

$$\text{类胡萝卜素}: \rho\text{Cp} = 7.6(E_{480} - 1.49E_{510})$$

式中, E 是上述不同波长下所测的消光值(以 750 nm 读数校正后)(朱永梅等, 2017)。

SOD 活性单位定义为在黄嘌呤氧化酶耦联反应体系中抑制百分 50% 时, 反应体系中的 SOD 活力定义为 1 个酶活力单位。GST 活性单位定义为在 25℃ 中, 每 10^4 个细胞每分钟催化 1 μmol CDNB 与 GSH 结合为 1 个酶活单位。

1.2.4 数据分析 实验数据采用平均值 \pm 标准差(Mean \pm SD)表示, 使用 SigmaPlot 12.0 绘图, 并使用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan's 多重比较, $P < 0.05$ 表示差异显著。

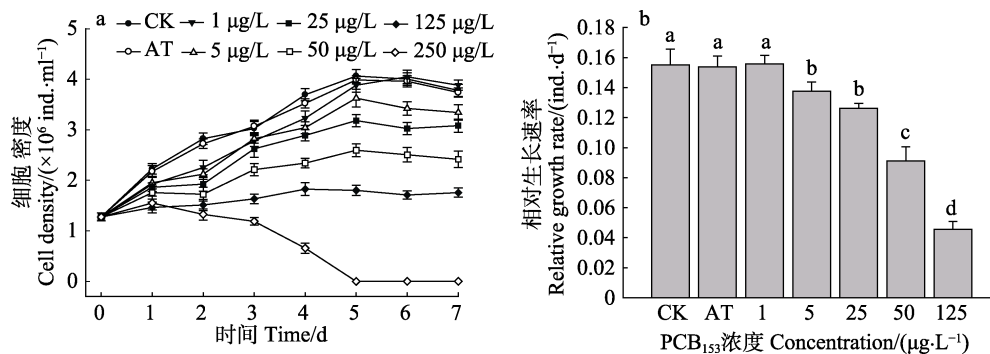


图 1 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长(a)和相对生长率(b)的影响

Fig.1 Effect of PCB₁₅₃ on growth (a) and relative growth rate (b) of *D. zhanjiangensis*

CK: 空白对照组; AT: 丙酮对照组。图中不同字母表示差异显著($P < 0.05$)

CK: Control check; AT: Acetone test. Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$)

2.2 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻光合色素的影响

PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻光合色素含量的影响如图 2 所示。实验期间, 空白对照组与丙酮对照组之间的叶绿素 a 、叶绿素 c 、类胡萝卜素和总光合色素含量无显著差异($P > 0.05$)。在实验浓度范围内, 叶绿素 a 、叶绿素 c 、类胡萝卜素和总光合色素含量均随着 PCB₁₅₃ 胁迫浓度的增加而显著降低。与空白对照组相比, PCB₁₅₃ 胁迫组(1~125 $\mu\text{g/L}$)叶绿素 a 分别下降了 31.07%、47.72%、44.96%、45.03%和 57.70%。与空白对照组相比, PCB₁₅₃ 胁迫组(1~125 $\mu\text{g/L}$)叶绿素 c 分别下降了 15.70%、13.36%、35.61%、35.00%和 44.81%, 均显著低于空白对照组($P < 0.05$)。叉鞭金藻类胡萝卜素含量随 PCB₁₅₃ 胁迫浓度增加而降低,

2 结果

2.1 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长的影响

PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长的影响如图 1 所示。实验期间, 空白对照组与丙酮对照组之间细胞密度变化趋势基本一致, 二者无显著差异($P > 0.05$)。PCB₁₅₃ 胁迫 1 d, 各处理组细胞密度均呈升高趋势, 胁迫 2 d, 250 $\mu\text{g/L}$ 处理组藻密度开始下降, 且随着胁迫时间的延长细胞密度下降程度增加, 至 5 d 时, 细胞密度降为零, 藻细胞全部死亡。在相同的时间点, 除 1 $\mu\text{g/L}$ 组以外, 其余各胁迫组细胞密度均低于空白对照组, 并随着 PCB₁₅₃ 浓度的增大, 密度差增加。实验期间, 1 $\mu\text{g/L}$ PCB₁₅₃ 胁迫组的相对增长率略高于空白对照组和丙酮对照组, 但三者之间差异不显著($P > 0.05$)。其余各胁迫组(5~125 $\mu\text{g/L}$)的相对增长率随着 PCB₁₅₃ 浓度的增加呈明显递减趋势, 其相对生长率均显著低于空白对照组($P < 0.05$)。

与空白对照组相比, PCB₁₅₃ 胁迫组(1~125 $\mu\text{g/L}$)类胡萝卜素分别下降了 8.38%、16.89%、32.00%、44.10%和 46.68%。低浓度组(1~5 $\mu\text{g/L}$)的类胡萝卜素含量降低趋势较缓, 与空白对照组相比, 无显著差异($P > 0.05$)。在 5~50 $\mu\text{g/L}$ 范围内, 类胡萝卜素含量随胁迫浓度升高而显著降低($P < 0.05$), 当浓度高于 50 $\mu\text{g/L}$ 时, 类胡萝卜素含量降低趋势变缓。与空白对照组相比, PCB₁₅₃ 胁迫组(1~125 $\mu\text{g/L}$)总光合色素含量分别下降 22.60%、33.42%、40.00%、46.78%和 52.49%。低浓度 PCB₁₅₃(1~5 $\mu\text{g/L}$)胁迫组的总光合色素含量随 PCB₁₅₃ 浓度的升高而显著降低($P < 0.05$); 当浓度高于 5 $\mu\text{g/L}$ 时, 总光合色素含量虽然随 PCB₁₅₃ 浓度升高而降低, 但各组之间差异不显著($P > 0.05$)。

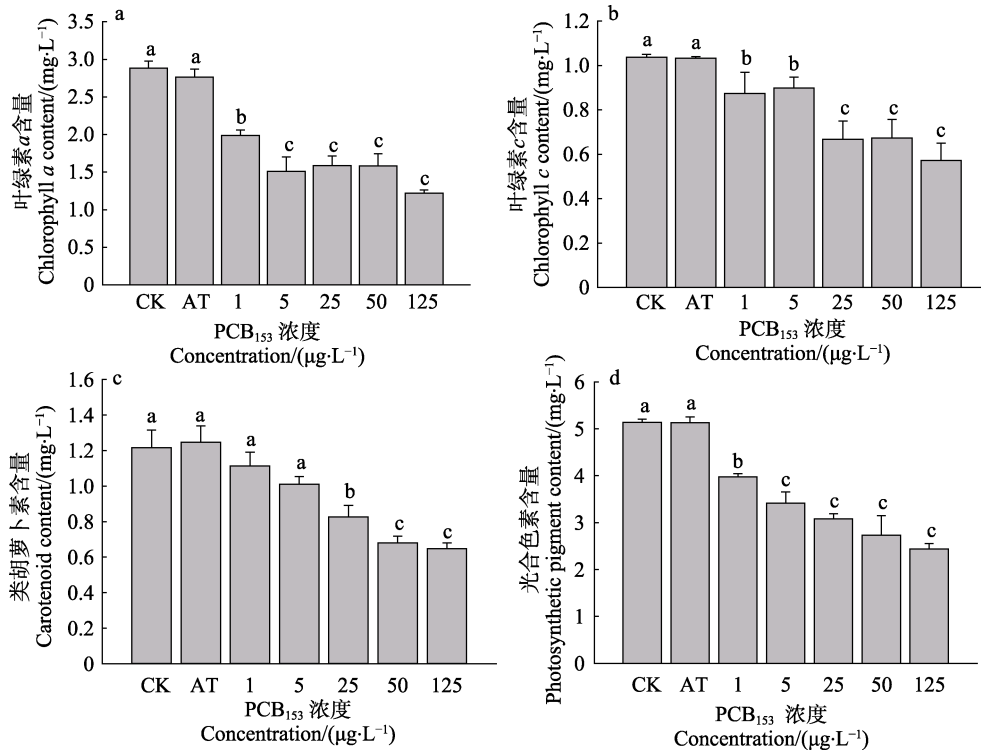


图 2 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻光合色素含量的影响

Fig.2 Effect of PCB₁₅₃ on the content of photosynthetic pigment in *D. zhanjiangensis*

2.3 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻抗氧化和解毒相关指标的影响

PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻 SOD、GST 活性和 MDA 含量的影响如图 3 所示。不同浓度 PCB₁₅₃ 胁迫对湛江叉鞭金藻 SOD 活性和 MDA 含量均有显著影响 ($P < 0.05$)。实验期间, 空白对照组与丙酮对照组的 SOD 活性和 MDA 含量均无显著差异 ($P > 0.05$)。在 1~25 µg/L 胁迫组中, SOD 活性随 PCB₁₅₃ 浓度的升高而显著升高, 25 µg/L 胁迫组的 SOD 活性为空白对照组的 2 倍, 显著高于其他处理组 ($P < 0.05$)。当 PCB₁₅₃ 浓度升高至 50 µg/L 和 125 µg/L 时, SOD 活性则显著下降, 分别降低至空白对照组的 65.19% 和 59.04%,

显著低于其他处理组 ($P < 0.05$)。PCB₁₅₃ 胁迫后, 湛江叉鞭金藻的 MDA 含量显著升高 ($P < 0.05$), 且随着胁迫浓度的升高而升高, 各胁迫组 (1~125 µg/L) 的 MDA 含量分别升高 29.89%、41.35%、66.43%、102.91% 和 124.72%。

丙酮对照组与空白对照组的 GST 活性无显著差异 ($P > 0.05$)。低浓度 PCB₁₅₃ (1~25 µg/L) 胁迫下, GST 活性显著升高 ($P < 0.05$), 而高浓度 PCB₁₅₃ (50~125 µg/L) 胁迫下, GST 活性显著降低 ($P < 0.05$)。

2.4 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻超微结构的影响

PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻超微结构的影响如图 4 所示。对照组藻细胞的细胞膜完整, 细胞器结构完整,

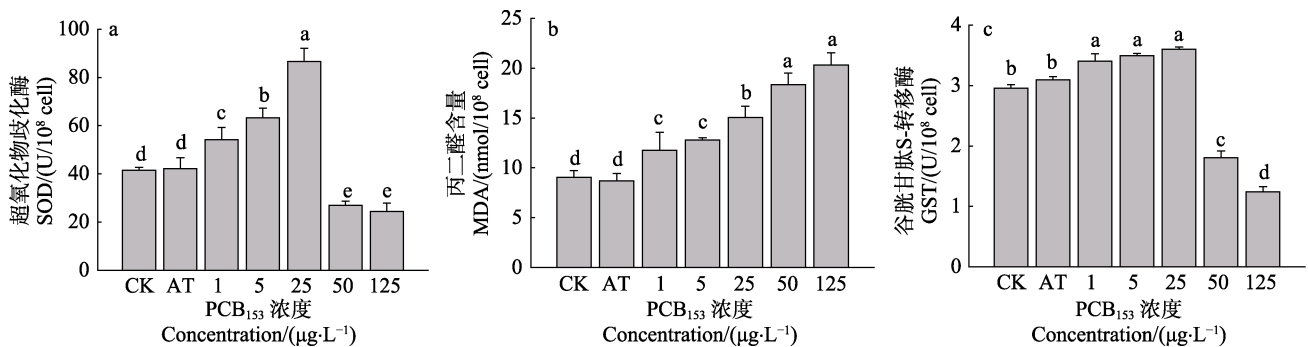


图 3 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻抗氧化和解毒相关指标的影响

Fig.3 Effect of PCB₁₅₃ on indexes related to antioxidation and detoxification of *D. zhanjiangensis*

细胞质基质分布较为均匀(图 4a)。PCB₁₅₃ 胁迫 3 d 后, 5 μg/L 胁迫组藻细胞形态略有变化, 其细胞膜变形, 但未见明显缺损, “杯形”色素体聚缩, 细胞质基质较为松散、不均匀(图 4b); 250 μg/L 胁迫组藻细胞形态有明显的变化, 细胞膜破裂、缺损, “杯形”色素体等解体, 甚至已经与细胞质基质融为一体, 并随细胞质基质流出细胞(图 4c)。随 PCB₁₅₃ 的浓度增大, 细胞膜变化越来越明显, 最终由于细胞膜的不完整性导致细胞自溶死亡。

3 讨论

3.1 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长的影响

藻类生长指标可以客观反映藻细胞的生长状况, 同时, 也间接反映了水质的状况, 可以通过检测水体中藻类的生长指标来监测该区域该段时间的水质状况。吴越等(2017)研究发现, PCB₁₃₈ 对牟氏角毛藻 (*Chaetoceros muelleri*) 和亚心形扁藻 (*Platymonas subcordiformis*) 有明显的抑制作用, 0.01 mg/L PCB₁₃₈

胁迫 24 h 后, 牟氏角毛藻开始出现显著生长抑制 ($P < 0.05$), 0.1 mg/L PCB₁₃₈ 胁迫下, 亚心形扁藻细胞密度显著低于对照组 ($P < 0.05$)。聂湘平等(2002)研究发现, PCB₁₂₅₄ 浓度高于 10 ng/mL 时, 蛋白核小球藻和斜生栅藻生长缓慢, 甚至呈负增长。本研究中, PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长有明显的抑制作用, 在浓度较低 (<5 μg/L) 时, PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长的抑制作用相对较小; 浓度较高 (>5 μg/L) 时, PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻的抑制作用较为明显, 且随着浓度增大和胁迫时间的延长, PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长的抑制作用明显增强, 甚至出现负增长。王向艺(2012)研究表明, 叉鞭金藻的生长随原油浓度的增大而抑制作用明显增大, 可能是因为叉鞭金藻没有细胞壁包被, 抵抗外界有毒物质的能力较弱。细胞膜脂质过氧化引起的膜损伤是环境污染物抑制微藻生长的重要原因(岳文洁等, 2009; Fu *et al.*, 2013)。本研究中, PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻生长有显著的抑制作用 ($P < 0.05$), 可能与湛江叉鞭金藻没有细胞壁保护、细胞膜脂质过氧化有关。

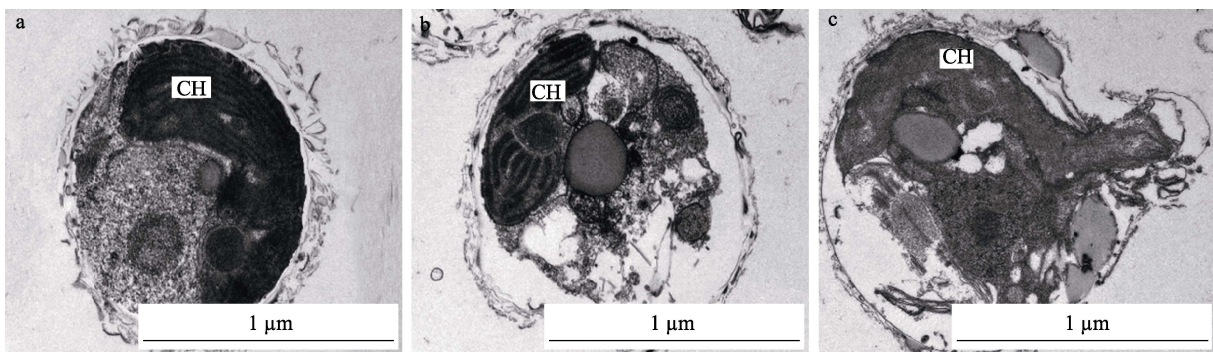


图 4 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻超微结构的影响

Fig.4 Effect of PCB₁₅₃ on the ultrastructure of *D. zhanjiangensis*

a: 对照组; b: 5 μg/L; c: 250 μg/L. CH: “杯形”色素体
a: Control group; b: 5 μg/L; c: 250 μg/L. CH: Cup-shaped plastid

3.2 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻光合色素的影响

光合色素是藻类光合作用进行吸收、传递、转化光能的物质基础, 光合色素质量浓度可以较好地反映植物光合生理能力、各阶段的生长发育状况, 同时, 也是反映环境胁迫状况的重要指标(张锦华等, 2016; Geoffroy *et al.*, 2003; 刘碧云等, 2006)。藻类体内的光合色素按化学结构分为叶绿素、类胡萝卜素和藻胆蛋白(方小丹, 2012)。其中, 湛江叉鞭金藻内主要含有叶绿素 *a*、叶绿素 *c*、类胡萝卜素等(Jeffrey *et al.*, 1997)。光合反应中心主要成分为叶绿素 *a*, 大部分的叶绿素 *a* 吸收和传递光能(Taiz *et al.*, 2006; Ston *et al.*,

2000)。叶绿素 *a* 是捕光色素复合体的重要组成部分, 可以作为光合电子传递链的电子供体参与光合作用系统的反应(Rontani *et al.*, 1994、2001; 张丽, 2015)。类胡萝卜素是光系统中的辅助捕光色素, 是光合色素的一部分; 同时, 也是内源抗氧化剂, 具有抗氧化的作用, 是细胞内活性氧清除系统中非酶促系列的重要组成部分, 具有保护叶绿素和光合机能的作用(胡单等, 2011; 黄彬城等, 2006; 秦天才等, 2000; 张锦华等, 2016; 张浩等, 2019)。叶绿素 *c* 具有吸收传递太阳能的作用, 由于湛江叉鞭金藻无叶绿素 *b*, 叶绿素 *c* 替代叶绿素 *b* 主要捕获水中蓝光和绿光(Katoh *et al.*, 1989)。总光合色素体现出来的是金藻细胞进行最优

光合作用所有色素的动态平衡,可以直接反应出光合作用的状态(张丽, 2015)。李娜(2012)研究发现,在 PCB₁₅₃ 胁迫下,蛋白核小球藻和斜生栅藻细胞中叶绿素 *a* 是最先受到显著抑制的。本研究中,湛江叉鞭金藻受 PCB₁₅₃ 胁迫后,叶绿素 *a* 最先产生显著下降,随后,叶绿素 *c*、类胡萝卜素出现显著下降($P < 0.05$)。相比叶绿素 *c* 和类胡萝卜素,湛江叉鞭金藻叶绿素 *a* 对 PCB₁₅₃ 胁迫更为敏感。这可能是由于 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻光合作用的抑制是先通过抑制叶绿素 *a* 的合成,从而抑制藻细胞正常的生长,促进了藻细胞的衰老、死亡(牧辉等, 2009; 聂湘平等, 2007)。随着 PCB₁₅₃ 浓度的增大,类胡萝卜素含量下降,藻细胞色素的捕光能力减弱,抗氧化能力和光合作用机能下降。随着 PCB₁₅₃ 浓度的增大,叶绿素 *c* 含量不断减少,藻细胞光合作用过程中捕获蓝光、绿光能力下降,吸收传递太阳能的能力也不断下降,光合作用受到严重影响。随着 PCB₁₅₃ 浓度的增大,总光合色素的含量不断下降,表明 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻的胁迫作用不断增大,导致藻细胞体内总光合色素的含量不断减少,光合作用机能遭到严重破坏,几乎无法正常地进行光合作用,由光能转化为化学能的能力减弱,间接影响了藻细胞的呼吸作用以及其他代谢作用,抑制藻细胞生存、生长,促使藻细胞凋亡。

3.3 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻抗氧化和解毒相关指标的影响

SOD 是生物体内重要的抗氧化酶,在生物体的自我保护系统中起着极为重要的作用,是反映生物应对各种胁迫的重要指标(韩莎等, 2018; 郝水, 1983)。SOD 作为酶类抗氧化剂,在生物体内广泛存在,当机体受到活性氧物质刺激时,SOD 会迅速产生应答,清除活性氧物质,从而保护机体(Sheng *et al.*, 2014; Kong *et al.*, 2018; 唐洁等, 2019)。MDA 是脂质过氧化的重要产物,可以反映生物体受 ROS 攻击的程度,是脂质过氧化和氧化应激的重要生物标志物(Lawal *et al.*, 2011; 井维鑫等, 2019)。MDA 含量是反映机体抗氧化潜在能力的重要参数,间接反映组织过氧化损伤程度。聂湘平等(2002)进行了多氯联苯对蛋白核小球藻和斜生栅藻生长影响的研究,在 PCB₁₂₅₄ 作用下,蛋白核小球藻和斜生栅藻体内的 SOD 活性有较明显的变化,低浓度作用下,SOD 活性均略有升高;高质量浓度时,明显受到抑制,活性逐渐下降。方浩等(2011)研究发现,低浓度多氯联苯(PCB₁₂₅₄)对锥状斯氏藻(*Scrippsiella trochoidea*)的 SOD 活性有诱导作用,当多氯联苯浓度超过一定阈值,酶活性下降。 Cd^{2+}

等可引起背角无齿蚌(*Anodonta woodiana*)等双壳类体内 MDA 含量的上升,指示脂质过氧化以及氧化胁迫的存在(井维鑫等, 2019; Nardi *et al.*, 2017; Almeida *et al.*, 2018)。由于 ROS 攻击引发的膜脂质过氧化严重影响了生物膜的功能及完整性并对细胞造成不可逆的损伤(Aravind *et al.*, 2005)。本研究发现,较低浓度 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻体内的 SOD 有诱导作用,SOD 活性的升高增强了机体消除各种代谢产生的活性氧自由基的能力,使生物体内的活性氧自由基的产生和消除处于动态的平衡状态,也增强了藻细胞自我保护机制,提高藻细胞抗氧化能力和抗损伤能力;较高浓度 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻体内的 SOD 有破坏作用,其自我保护机制、代谢作用已遭到严重损坏,藻细胞的生长受到抑制。MDA 含量随着 PCB₁₅₃ 浓度的增大而增大,表明了藻细胞受 ROS 攻击程度不断增大,膜脂质过氧化程度也不断加深,而且 MDA 含量的增大,表明藻细胞膜的损伤、细胞的衰老等加剧,PCB₁₅₃ 胁迫对藻细胞造成不可逆的损伤,抑制了藻细胞的生长,促进了细胞的凋亡。

GST 是一种 II 相解毒酶,也是一种重要的抗氧化酶(Shenai-Tirodkar *et al.*, 2017; 杨惠珍等, 2015)。GST 可保护植物体免受污染物及 ROS 的损伤(Nemat Alla, 1995),GST 既具有过氧化物酶的活性,同时,可以直接清除分子结构里带有亲电基团的化合物(刘滨扬, 2011; Nemat Alla, 1995; Nemat Alla *et al.*, 2006)。姜爽(2011)在研究多溴联苯醚对米氏凯伦藻(*Karenia mikimotoi*) GST 活性影响时发现,GST 活性随时间的延长先增加后降低的趋势。前 5 d, GST 活性随时间的延长而增大;后 5 d, GST 活性随时间的延长而减小。朱佩佩等(2019)在研究不同浓度铅胁迫对椭圆食粉螨(*Aleuroglyphus ovatus*) GST 活性影响的研究中发现,随着铅浓度的增加, GST 活性呈先增大后减小的趋势,当铅的浓度超过 25 mg/kg 时, GST 活性不断减小。本研究中,当 PCB₁₅₃ 浓度低于 25 $\mu\text{g/L}$ 时, GST 活性随浓度升高而提高;当 PCB₁₅₃ 浓度高于 25 $\mu\text{g/L}$ 时, GST 活性随着 PCB₁₅₃ 浓度升高而降低。本研究发现,较低浓度 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻体内的 GST 有诱导作用,可以刺激藻细胞的自我保护机制,提高藻细胞的抗氧化能力和抗损伤能力;较高浓度 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻体内的 GST 有破坏作用,其 GST 活性降低,清除结构里带亲电基团化合物的能力降低,自我保护机制、代谢作用已遭到严重损坏。

3.4 PCB₁₅₃ 对湛江叉鞭金藻超微结构的影响

PCB₁₅₃ 通过对湛江叉鞭金藻细胞膜的破坏,导致

部分细胞器流出细胞,同时,细胞膜的不完整导致细胞自溶死亡(陈必链等,2000)。“杯”形色素体是湛江叉鞭金藻细胞进行光合作用、将光能转化为化学能的主要场所,从进化角度看,由较原始的单层类囊体组成,且仅有 1 个色素体(时沁峰等,2009;毛连菊等,1999)。250 $\mu\text{g/L}$ 组“杯”形色素体的形态发生变化,表明了类囊体受损,光合作用场所受到破坏,光能转化为化学能的过程受到抑制,光合作用较为微弱,严重影响了藻细胞自身的正常生长以及代谢活动,从而促使细胞无法正常生长繁殖,甚至凋亡。湛江叉鞭金藻没有细胞壁,细胞膜是它与外界进行物质交换等的具有选择透过性的结构,它对藻细胞起着一定的保护功能。 PCB_{153} 胁迫破坏了湛江叉鞭金藻的细胞膜,藻细胞内的细胞器暴露于溶液中,加速了其被氧化进程,藻细胞的正常生理活动遭受严重破坏。3 d 后,250 $\mu\text{g/L}$ 胁迫组的湛江叉鞭金藻细胞出现胞内基础结构解体(万莉等,2014)。Moharikar 等(2006)用“类凋亡”来描述藻类的这种类似细胞死亡方式。本研究表明,湛江叉鞭金藻受 PCB_{153} 胁迫后,出现“类凋亡”现象。高浓度 PCB_{153} 使膜系统脂质氧化因而破坏细胞和叶绿体等的结构,造成光合色素合成受到阻碍,藻细胞生长受抑制。高浓度 PCB_{153} 胁迫的藻细胞内基础结构解体,可能与 SOD、GST 等抗氧化物酶的活性降低有关,SOD、GST 活性降低意味藻细胞体内自我保护机制、代谢作用已遭到严重损坏,藻细胞内的各个细胞器无法正常工作。随着 PCB_{153} 浓度的增加,细胞膜开始变形,逐渐解体,可能是由于藻细胞受 ROS 攻击程度不断增大,膜脂质过氧化程度也不断加深,最终导致藻细胞膜缺损破裂,藻细胞死亡。

综上所述, PCB_{153} 胁迫对湛江叉鞭金藻的生长和光合色素的合成有明显的抑制作用,且随着胁迫浓度的增加,抑制作用增大。随着 PCB_{153} 浓度的增大,MDA 含量逐渐增大。低浓度 PCB_{153} 激活藻细胞的 SOD 活性和 GST 活性,提高其自我保护水平,而高浓度 PCB_{153} 胁迫则显著抑制这 2 种酶的活性。短期低浓度 PCB_{153} 胁迫会改变金藻细胞超微结构,使细胞器形态改变、聚缩;高浓度 PCB_{153} 胁迫则会直接破坏细胞膜的完整性,使细胞破裂,导致细胞自溶死亡。

参 考 文 献

- ALMEIDA $\tilde{\text{A}}$, CALISTO V, ESTEVES V I, *et al.* Effects of single and combined exposure of pharmaceutical drugs (carbamazepine and cetirizine) and a metal (cadmium) on the biochemical responses of, *R. philippinarum*. *Aquatic Toxicology*, 2018, 198(5): 10–19
- ARAVIND P, PRASAD M N V. Modulation of cadmium-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* by zine involves ascorbate-glutathione cycle and glutathione metabolism. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2005, 43(2): 107–116
- CHEN B L, ZHUANG H R, CHEN W L, *et al.* Effect of Co on the ultrastructure of *Pavlova viridis*. *Marine Environmental Science*, 2000, 19(2): 22–29 [陈必链, 庄惠如, 陈文列, 等. Co 对绿色巴夫藻超微结构的影响. *海洋环境科学*, 2000, 19(2): 22–29]
- CHEN X. Remediation of polychlorinated biphenyls contaminated soil by nanoscale zerovalent iron or nZVI-microorganism integrated treatment. Master's Thesis of Zhejiang University, 2014 [陈曦. 纳米零价铁及其与微生物联合修复多氯联苯污染土壤. 浙江大学硕士研究生学位论文, 2014]
- CHI X, XIA B, ZHU L, *et al.* Acute toxicity of four polybrominated diphenyl ether congeners to marine organisms: *Chlorella pyrenoidosa*, *Daphnia magna*, and *Scophthalmus maximus*. *Progress in Fishery Sciences*, 2019, 40(6): 88–97 [迟潇, 夏斌, 朱琳, 等. BDE-47、BDE-99、BDE-153 和 BDE-209 对蛋白核小球藻、大型溞和大菱鲆的急性毒性效应. *渔业科学进展*, 2019, 40(6): 88–97]
- DUARTE DAVIDSON R, WILSON S C, JONES K C. PCBs and other organochlorines in human tissue samples from the Welsh population. *Adipose Environmental Pollution*, 1994, 84(1): 69–77
- EBENEZER V, KI J S. Quantification of toxic effects of the herbicide metolachlor on marine microalgae *Ditylum brightwellii* (Bacillariophyceae), *Prorocentrum minimum* (Dinophyceae), and *Tetraselmis suecica* (Chlorophyceae). *Journal of Microbiology*, 2013, 51(1): 136–139
- FANG H, LÜ S H, MA F F, *et al.* Study on the acute toxicity of PCBs to two species of microalgae. *Anhui Agricultural Science*, 2011, 39(15): 9147–9150 [方浩, 吕颂辉, 马方方, 等. 多氯联苯对 2 种微藻的急性毒性研究. *安徽农业科学*, 2011, 39(15): 9147–9150]
- FANG X D. HPLC-MS/MS analysis and application on photosynthetic pigments of marine environment. Master's Thesis of Dalian Polytechnic University, 2012 [方小丹. 海洋环境中光合色素的 HPLC-MS/MS 分析技术研究与应用. 大连工业大学硕士研究生学位论文, 2012]
- FILIPKOWSKA A. Determining PCBs in fish and sediment samples related to intercomparison studies. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2013, 22(5): 1341–1347
- FREITAG D, GEYER H, KRAUS A, *et al.* Ecotoxicological profile analysis. VII. Screening chemicals for their environmental behavior by comparative evaluation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1982, 6(1): 60–81
- FU M, SONG X X, YU Z M, *et al.* Responses of activity of antioxidant enzyme in *Thalassiosira*. *Marine Environmental Science*, 2013, 32(6): 809–813
- GEOFFROY L, DEWEZ D, VERNET G, *et al.* Oxyfluorfen toxic effect on *S. obliquus* evaluated by different, photosynthetic and enzymatic biomarkers. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2003, 45(4): 445–452
- GHOSH U, ZIMMERMAN J R, LUTHY R G. PCB and PAH speciation among particle types in contaminated harbor

- sediments and effects on PAH bioavailability. *Environmental Science and Technology*, 2003, 37(10): 2209–2217
- GRILO T F, CARDOSO P G, PATO P, *et al.* Uptake and depuration of PCB₁₅₃ in edible shrimp *Palaemonetes varians* and human health risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 101(1): 97–102
- HAN S, HU W, LI C L, *et al.* Effects of pH stress on survival rate, growth and antioxidant enzyme activities of the sea cucumber, *Apostichopus japonicus* Selenka. *Progress in Fishery Sciences*, 2018, 39(5): 91–98 [韩莎, 胡炜, 李成林, 等. pH胁迫对刺参存活、生长及抗氧化酶活性的影响. *渔业科学进展*, 2018, 39(5): 91–98]
- HAN X Q, CHEN Y P, GUO H Y, *et al.* Effect of PCB₁₅₃ on acute toxicity and antioxidant enzyme activity of *Cynoglossus semilaevis*. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(24): 153–157 [韩现芹, 陈永平, 郭华阳, 等. PCB₁₅₃对半滑舌鳎的急性毒性及抗氧化酶活性的影响. *江苏农业科学*, 2019, 47(24): 153–157]
- HAO S. *Course of cell biology*. Beijing: Higher Education Press, 1983, 142–147 [郝水. *细胞生物学教程*. 北京: 高等教育出版社, 1983, 142–147]
- HASSAN H M. Effects of pollution on marine crustaceans in Qatari waters: A baseline survey and a case study on genotoxicity indicators in an endemic shrimp. Doctoral Dissertation of University of Salford, 2018
- HU D, YANG Y H. Effect of different application rate of nitrogen on photosynthetic pigment, biomass and yield of winter highland barley seedlings. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(24): 14561–14563, 14585 [胡单, 杨永红. 不同施氮对冬青稗幼苗光合色素、生物量及产量的影响. *安徽农业科学*, 2011, 39(24): 14561–14563, 14585]
- HU F, XU Z C. Pollution of PCBs in environment media in China. *Guangdong Chemical Industry*, 2012, 39(1): 87–88 [胡芳, 许振成. 多氯联苯(PCBs)污染现状分析. *广东化工*, 2012, 39(1): 87–88]
- HUANG B C, JI J, WANG G, *et al.* Advances of carotenoid in plants. *Tianjin Agricultural Sciences*. 2006, 12(2): 13–17 [黄彬城, 季静, 王罡, 等. 植物类胡萝卜素的进展. *天津农业科学*, 2006, 12(2): 13–17]
- JEFFREY S W, MANTOURAR F C, WRIGHT S W. *Phytoplankton pigments in oceanography: Guidelines to modern methods*. Paris: UNESCO Publishing, 1997, 638
- JIANG S. The toxic effects of two kinds of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) on four species of marine microalgae. Master's Thesis of Ocean University of China, 2011 [姜爽. 两种多溴联苯醚对四种海洋微藻的毒性效应研究. *中国海洋大学硕士研究生学位论文*, 2011]
- JING W X, LIN Z G, LANG L, *et al.* Oxidative stress in the gills and digestive gland of *Anodonta woodiana* exposed to cadmium. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2019, 47(8): 1334–1340 [井维鑫, 林子根, 朗朗, 等. 镉暴露对背角无齿蚌鳃和消化腺的氧化应激. *山西农业科学*, 2019, 47(8): 1334–1340]
- KATOH T, MIMURO M, TAKAICHI S. Light-harvesting panicles isolated from a brown alga, *Dictyota dichotoma*: A supramolecular assembly of fucoxanthin-chlorophyll-protein complexes. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1989, 976(2): 233–240
- KIMBROUGH R D. Poly chlorinated biphenyls (PCBs) and human health: An update. *Critical Reviews in Toxicology*, 1995, 25(2): 133–163
- KOHLER M, TREMP J, ZENNEGG M, *et al.* Joint sealants: An overlooked diffuse source of polychlorinated biphenyls in buildings. *Environmental Science and Technology*, 2005, 39(7): 1967–1973
- KONG H, CHANDEL N. To claim growth turf, mTOR says SOD off. *Molecular Cell*, 2018, 70(3): 383–384
- LAWAL A O, LAWAL A F, OLOGUNDUDU A, *et al.* Antioxidant effects of heated garlic juice on cadmium-induced liver damage in rats as compared to ascorbic acid. *Journal of Toxicological Sciences*, 2011, 36(5): 549–557
- LI N. Toxicity effects and enrichment effect of PCBs in the aquatic food chain. Master's Thesis of Jinan University, 2012 [李娜. 多氯联苯在水生食物链中的生物毒性及富集效应研究. *暨南大学硕士研究生学位论文*, 2012]
- LIU B Y, ZHOU P J, LI J J, *et al.* Effect of γ -HCH on the growth, photosynthetic and lipid peroxidation of *Scenedesmus obliquus* kütz. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2006, 25(1): 204–207 [刘碧云, 周培疆, 李佳洁, 等. 丙体六六六对斜生栅藻生长及光合色素和膜脂过氧化影响的研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25(1): 204–207]
- LIU B Y. Toxic effect and mechanism of erythromycin, ciprofloxacin and sulfamethoxazole on *Pseudokirchneriella subcapitata*. Master's Thesis of Jinan University, 2011 [刘滨扬. 红霉素、环丙沙星和磺胺甲噁唑对羊角月牙藻的毒性效应及其作用机理. *暨南大学硕士研究生学位论文*, 2011]
- MAO L J, ZHANG C Y, YOU X C. Studies on ultrastructural of *Isochrysis zhanjiangensis*. *Journal of Dalian Fisheries University*, 1999, 14(4): 7–12 [毛连菊, 张从尧, 由学策. 湛江等鞭金藻的超微结构研究. *大连水产学院学报*, 1999, 14(4): 7–12]
- MEI J. Effect of Cd-PCB₁₅₃, humic acid and Cd-PCB₁₅₃ on RNA/DNA and expression of sonic hedgehog gene of marine medaka larva. Master's Thesis of Guangxi University, 2014 [梅婕. 镉、多氯联苯 153、黄腐酸和镉-多氯联苯 153 对海水青鳉仔鱼 RNA/DNA 和 Shh 基因表达的影响. *广西大学硕士研究生学位论文*, 2014]
- MOHARIKAR S, D'SOUZA J S, KULKARNI A B, *et al.* Apoptotic-like cell death pathway is induced in unicellular Chlorophyte *Chlamydomonas reinhardtii* (Chlorophyceae) cells following UV irradiation: Detection and functional analyses. *Journal of Phycology*, 2006, 42(2): 423–433
- MONTEIRO C M, FONSECA S C, CASTRO P M L, *et al.* Toxicity of cadmium and zinc on two microalgae, *Scenedesmus obliquus* and *Desmodesmus pleiomorphus*, from Northern Portugal. *Journal of Applied Phycology*, 2011, 23(1): 97–103
- MU H, PENG X J, DAI N, *et al.* Toxicity of [C8mim] PF₆ to aquatic organisms. *China Environmental Science*, 2009, 29(11): 1196–1201 [牧辉, 彭新品, 戴宁, 等. 离子液体 [C8mim] PF₆ 对水生生物的毒性作用. *中国环境科学*, 2009, 29(11): 1196–1201]
- NARDI A, MINCARELLI L F, BENEDETTI M, *et al.* Indirect effects of climate changes on cadmium bioavailability and biological effects in the Mediterranean mussel *Mytilus*

- galloprovincialis*. Chemosphere, 2017, 169(5): 493–502
- NEMAT ALLA M M, HASSAN N M. Changes of antioxidants levels in two maize lines following atrazine treatments. Plant Physiology and Biochemistry, 2006, 44(4): 202–210
- NEMAT ALLA M M. Glutathione regulation of glutathione S-transferase and peroxidase activity in herbicide treated *Zea mays*. Plant Physiology and Biochemistry, 1995, 33(2): 185–192
- NIE X P, LAN C Y, LIN L, *et al.* The effect of Aroclor 1254 on the growth of *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus*. Acta Scientiarum Naturalium University Sunyatseni, 2002, 41(1): 68–71 [聂湘平, 蓝崇钰, 林里, 等. 多氯联苯对蛋白核小球藻和斜生栅藻生长影响的研究. 中山大学学报, 2002, 41(1): 68–71]
- NIE X P, WANG X, CHEN J F, *et al.* Toxic effects of trichloroisocyanuric acid and ciprofloxacin hydrochloride on a freshwater alga, *Chlorella pyrenoidosa*. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(10): 1694–1701 [聂湘平, 王翔, 陈菊芳, 等. 三氯异氰尿酸与盐酸环丙沙星对蛋白核小球藻的毒性效应. 环境科学学报, 2007, 27(10): 1694–1701]
- PARSONS. Handbook of analytical chemistry and biological methods of seawater. Beijing: Ocean Press, 1989, 104–108 [帕森斯. 海水分析化学和生物学方法手册. 北京: 海洋出版社, 1989, 104–108]
- QIN T C, RUAN J, WANG L J. Effect of Cd on the plant photosynthesis. Environmental Science and Technology, 2000, 23(1): 33–35 [秦天才, 阮捷, 王腊娇. 镉对植物光合作用的影响. 环境科学与技术, 2000, 23(1): 33–35]
- RONTANI J F, AUBERT C. Effect of oxy-free radicals upon the phytol chain during chlorophyll *a* photodegradation. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 1994, 79(3): 167–172
- RONTANI J F. Visible light-dependent degradation of lipidic phytoplanktonic components during senescence: A review. Photochemistry, 2001, 58(2): 187–202
- SHENAI-TIRODKAR P S, GAUNS M U, MUJAWAR M W A, *et al.* Antioxidant responses in gills and digestive gland of oyster *Crassostrea madrasensis* (Preston) under lead exposure. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 142: 87–94
- SHENG Y, ABREU I A, CABELLI D E, *et al.* Superoxide dismutases and superoxide reductases. Chemical Reviews, 2014, 114(7): 3854–3918
- SHI Q F, CAO W R. Research overview of superoxide dismutase (SOD). Livestock and Poultry Industry, 2009(4): 66–68 [时沁峰, 曹威荣. 超氧化物歧化酶(SOD)的研究概况. 畜禽业, 2009(4): 66–68]
- SONG X, LI J, CHEN L, *et al.* Determination of polychlorinated biphenyls in seawater using headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry with the aid of experimental design. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2012, 23(1): 132–141
- STAUBER J L, DAVIES C M. Use and limitations of microbial bioassays for assessing copper bioavailability in the aquatic environment. Environmental Reviews, 2011, 8(4): 255–301
- STON J, KOSAKOWSKA A. Qualitative and quantitative analysis of Baltic phytoplankton pigments. Oceanologia, 2000, 42(4): 449–471
- TAIZ L, ZEIGER E. Plant physiology. Sinauer Associate Inc, Sunderland, 2006, 128–138
- TANG J, YANG H Y, LI L, *et al.* Repair effects on SOD enzyme and anti-inflammatory activity of the *Platycladus orientalis* extract. China Surfactant Detergent and Cosmetics, 2019, 49(9): 585–589 [唐洁, 杨海延, 李利, 等. 侧柏叶提取物对SOD酶活力修复作用及抗炎功效. 日用化学工业, 2019, 49(9): 585–589]
- ULBRICH B, STAHLMANN R. Developmental toxicity of polychlorinated biphenyls (PCBs): A systematic review of experimental data. Archives of Toxicology, 2004, 78(5): 252–268
- WAN L, SHAO L L, LU K H, *et al.* Effect of ultrasound on the ultrastructure and physiological characteristics of blue-green algae (*Microcystis aeruginosa*). Acta Hydrobiologica Sinica, 2014, 38(3): 516–524 [万莉, 邵路路, 陆开宏, 等. 超声波对铜绿微囊藻超微结构和生理特性的影响. 水生生物学报, 2014, 38(3): 516–524]
- WANG X Y. Acute toxic effects of crude oil and oil dispersant on three algae. Master's Thesis of Dalian Maritime University, 2012 [王向艺. 原油和消油剂对三种藻的急性毒性效应. 大连海事大学硕士研究生学位论文, 2012]
- WU Y, CHEN X X, PAN Q C, *et al.* A study of toxicity and bioaccumulation of PCBs in two species of marine microalgae. Marine Sciences, 2017, 41(3): 61–67 [吴越, 陈星星, 潘齐存, 等. 多氯联苯在两种海洋微藻中毒性效应及富集效应的研究. 海洋科学, 2017, 41(3): 61–67]
- XU T Y, TANG W Q. Comparative analysis on isomer-specific of polychlorinated biphenyls in the dead bodies of two finless porpoise subspecies in Yangtze estuary. Chinese Journal of Zoology, 2016, 51(3): 337–346 [徐添翼, 唐文乔. 长江口两种江豚亚种体脂内多氯联苯同分异构体含量的比较分析. 动物学杂志, 2016, 51(3): 337–346]
- YANG H Z, LIU N, LI Y Q, *et al.* Effect of cadmium on glutathione content and related enzyme activity in main tissues of *Anodonta woodiana*. Journal of Agro-Environmental Science, 2015, 34(1): 15–21 [杨惠珍, 刘娜, 李涌泉, 等. 镉对背角无齿蚌主要组织谷胱甘肽含量和相关酶活性的影响. 农业环境科学学报, 2015, 34(1): 15–21]
- YUE W J, WANG Z H, WANG Q J, *et al.* Toxic effect of cypermethrin on *Chattonella marina*. Asian Journal of Ecotoxicology, 2009, 39(15): 251–257 [岳文洁, 王朝晖, 王桥军, 等. 氰菊酯对海洋卡盾藻的毒性效应. 生态毒理学报, 2009, 39(15): 251–257]
- ZHANG H, ZHAO Y X, DAI C J, *et al.* Effect of vermicomposte on seedling growth and photosynthetic pigment content of *Zea mays* L. under salt stress. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(20): 122–125 [张浩, 赵雨欣, 戴川景, 等. 蚓粪添加对盐胁迫下玉米幼苗生长和光合色素含量的影响. 江苏农业科学, 2019, 47(20): 122–125]
- ZHANG J H, FENG J, LÜ J P, *et al.* Toxic effects of 1, 4-dichlorobenzene on the growth and photosynthetic pigment of *Scenedesmus quadricauda*. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2016, 44(3): 333–336 [张锦华, 冯佳, 吕俊平, 等. 1,4-二氯苯对四尾栅藻生长和光合色素的毒性效应. 山西农业科学, 2016, 44(3): 333–336]

- ZHANG L. Toxic effects of 2, 2', 4, 4'-tetrabromodiphenyl ether (BDE-47) on two marine microalgae. Master's Thesis of the First Institute of Oceanography, 2015 [张丽. 2, 2', 4, 4'-四溴联苯醚(BDE-47)对两种海洋微藻的毒性效应. 国家海洋局第一海洋研究所硕士研究生学位论文, 2015]
- ZHANG S C, MA J Y, FAN X. Principles and applications of marine biotechnology. Beijing: Ocean Press, 1997, 97-98 [张士瑾, 马军英, 范晓. 海洋生物技术原理和应用. 北京: 海洋出版社, 1997, 97-98]
- ZHU P P, WANG D, MO W F, *et al.* Effects of heavy metal lead on the morphology and SOD, GST activity of *Aleuroglyphus ovatus*. Chinese Journal of Applied Entomology, 2019, 56(4): 702-709 [朱佩佩, 汪丁, 莫维芬, 等. 重金属铅对椭圆食粉螨形态及 SOD、GST 活性的影响. 应用昆虫学报, 2019, 56(4): 702-709]
- ZHU Y M, LIU Z G. Effects of different photosynthetic light intensity of blue LED light on the growth and pigment concentration of *Isochrysis zhanjiangensis*. Journal of Guangdong Ocean University, 2017, 37(1): 35-40 [朱永梅, 刘志刚. 不同光合光子照度 LED 蓝光对湛江等鞭金藻生长及色素含量的影响. 广东海洋大学学报, 2017, 37(1): 35-40]

(编辑 冯小花)

Effects of Polychlorinated Biphenyls (PCB₁₅₃) on the Physiological Ecology and Ultrastructure of *Dicrateria zhanjiangensis*

SUN Xiaoyu, WANG Yizhe, LI Yang, XU Xu, ZHOU Wenli,
SHAO Peng, GAO Jinwei, DOU Yong, JIA Xuying^①

(College of Fishery Science, Tianjin Agriculture University;
Tianjin Key Laboratory of Aqua-Ecology and Aquaculture; Tianjin 300384, China)

Abstract In order to study the physiological and ecological toxicity of polychlorinated biphenyls (PCBs) of marine microalgae, the growth, photosynthetic pigment content, glutathione S-transferase (GST), superoxide dismutase (SOD) activity, malondialdehyde (MDA) content, and ultrastructure of *Dicrateria zhanjiangensis* were compared over 7 days under 2,2',4,4',5,5'-hexachlorobiphenyl (PCB₁₅₃) stress. The results showed that PCB₁₅₃ stress had significant effects on the growth, photosynthetic pigment content, antioxidant and detoxification related indexes of *D. zhanjiangensis* ($P < 0.05$). Increasing PCB₁₅₃ concentration increased the inhibition of PCB₁₅₃ on the growth of *D. zhanjiangensis*. In the 250 µg/L stress group, all the algae cells died on day five. The content of chlorophyll *a*, chlorophyll *c*, carotenoid, total light, and pigment had decreased significantly after the PCB₁₅₃ stress ($P < 0.05$). The decreasing photosynthetic pigment level was enhanced by the increase in PCB₁₅₃ concentration. The MDA content of algal cells in all stress groups increased after the PCB₁₅₃ stress. SOD and GST enzyme activities were significantly increased by low concentration PCB₁₅₃ (<25 µg/L). Both enzyme activities were significantly inhibited by high concentrations of PCB₁₅₃ (>25 µg/L). Under short-term low concentrations of PCB₁₅₃ stress, the ultrastructure of the cells changed. To be specific, the organelle morphology altered and shrunk. Under high concentrations of PCB₁₅₃ stress, the integrity of the cell membrane was destroyed, leading to cell rupture, autolysis and death. PCB₁₅₃ can inhibit the growth and synthesis of photosynthetic pigments of *D. zhanjiangensis*. Low concentrations of PCB₁₅₃ can activate the antioxidant and detoxification system. This activation improves self-protection capabilities. High concentrations of PCB₁₅₃ can aggravate lipid peroxidation and destroy the normal function of antioxidant and detoxification systems, causing cell rupture and death.

Key words *Dicrateria zhanjiangensis*; PCB₁₅₃; Photosynthetic pigment; Superoxide dismutase; Malondialdehyde; Glutathione S-transferase; Ultrastructure

① Corresponding author: JIA Xuying, E-mail: jiaxuying1109@sina.com