

邻苯二甲酸二丁酯污染对老鼠簕幼苗抗逆性生理特性的影响

赵秋毅^{1,2}, 李元跃^{1,2}, 陈融斌^{1,2}, 潘文³, 陈政强^{1,2}, 徐佳佳^{1,2}, 李容伟^{1,2},
高苏蕊^{1,2}, 刘畅^{1,2}

(1. 集美大学 水产学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省海洋渔业资源与生态环境重点实验室, 福建 厦门 361021; 3. 集美大学 食品与生物工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 以红树植物老鼠簕作为实验材料, 通过模拟海水实验, 研究了不同质量浓度(0、1、2、5、10、20 mg/L)的邻苯二甲酸二丁酯(DBP)污染暴露对老鼠簕幼苗叶绿素含量、比值及抗氧化酶系统(SOD, POD, CAT)等生理指标的影响。结果表明: (1)当 DBP 浓度为 5mg/L 时, DBP 污染对老鼠簕幼苗叶绿素含量具有一定促进作用, 其余浓度 DBP 污染均会使老鼠簕幼苗叶绿素含量显著下降; DBP 污染对老鼠簕幼苗叶绿素 a/b 比值基本无影响; (2)随着 DBP 浓度升高, 老鼠簕幼苗抗氧化酶活性均呈现先上升后下降的变化。说明 DBP 污染会导致老鼠簕幼苗叶片衰老; 低浓度 DBP 暴露(≤ 10 mg/L)可以诱导老鼠簕幼苗抗氧化酶系统活性增加, 并保持一定时间细胞内活性氧平衡, 高浓度 DBP 暴露(>10 mg/L)会对老鼠簕幼苗的抗氧化酶系统产生不可逆的损伤。研究结果也为红树林湿地的保护, DBP 的生态风险评估及污染控制提供了科学参考。

关键词: 邻苯二甲酸二丁酯(DBP); 红树植物; 老鼠簕; 叶绿素; 抗氧化酶

中图分类号: Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-3096(2018)06-0070-08

DOI: 10.11759/hyxx20171128001

邻苯二甲酸二丁酯(Dibutyl phthalate, DBP)是一种常见的酞酸酯类化合物(PAEs), 主要用于塑料制品, 使其易于加工, 并增加产品的柔软性和耐久性(俗称增塑剂), 同时也被广泛用于橡胶制品、洗护用品、医疗器械、化妆品等国民经济的各个领域。DBP 不能与塑料等制品中的高分子碳链紧密聚合, 随着时间的推移会从产品中释放, 进入土壤、水体环境或动物体内, 并长时间难以分解或代谢。虽然其不具有高水平急性毒性, 但研究表明, DBP 作为一种半挥发性有机化合物, 对动物具有一定致畸性、致突变性和生殖毒性, 并对人类的内分泌有类似相同的干扰效应^[1-2]。

红树植物是一类生长在热带、亚热带的海岸潮间带的木本植物, 具有调节气候、防止水土流失、保护生物多样性等诸多生态效益和社会价值。近年来, 还有学者从红树林湿地底泥中分离出了一种细菌, 可以促进 DBP 的生物降解^[3]。老鼠簕(*Acanthus ilicifolius* L.)是一种福建省原生非胎生泌盐型红树物种, 从中已分离出有生物碱、黄酮、三萜、甾醇等有效成分, 具有抗氧化、抗肿瘤、杀利什曼原虫等药理活性, 中国传统医学还认为老鼠簕具有消肿散结、清热解毒的疗效。在实地调查中发现, 野外自然分布

的老鼠簕被当地村民、渔民采折用作药材的情况广泛存在, 造成部分地区自然生长的老鼠簕面积在不断缩小^[4-6]。由于老鼠簕主要依靠种子繁殖, 其幼苗抗逆境能力较之胚轴形态的秋茄幼苗弱, 结合其自然恢复水平和速度较差的现状, 针对自然环境中广泛存在的酞酸酯污染对老鼠簕幼苗的抗逆性生理特性的影响开展研究是很有必要的。目前对于酞酸酯类化合物的研究主要集中在其对动物和藻类的毒性影响及代谢机制及其对部分农作物的影响等方面, 而针对该类化合物对老鼠簕及其幼苗生长影响的相关研究仍较为匮乏^[7-10]。

本实验利用人工模拟污染环境的方法研究 DBP 暴露污染对红树植物老鼠簕幼苗叶片叶绿素及抗氧化酶系统活性的影响, 以期了解老鼠簕幼苗植株受 DBP 胁迫下的抗逆境响应。为保护、恢复滨海湿地

收稿日期: 2017-11-28; 修回日期: 2018-03-24

基金项目: 福建省高校产学研合作重大项目(No.2016Y4001)

[Foundation: A major project of production, teaching and research cooperation in Fujian province, No.2016Y4001]

作者简介: 赵秋毅(1993-), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 主要从事滨海湿地生态研究, E-mail: fall_stiff@qq.com; 李元跃, 通信作者, 电话: 13599513539, E-mail: yuanyueli@163.com

地区红树林生态提供了科学参考。同时为 DBP 等酚酯类化合物的生态风险评估和生态毒理学研究提供了新的思路和内容,具有一定的实际意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用老鼠簕种子于 2015 年 7 月采自福建省泉州市洛阳江红树林保护区。选取单粒质量(0.2 ± 0.02) g, 长宽(13 ± 1) mm, 形状扁圆且饱满的新鲜种子用于实验栽培。

海沙经清洗干净自然风干,剔除动植物残体和石块,过 2 mm 尼龙筛备用。

实验所用试剂均为分析纯, DBP 由无锡市亚泰联合化工有限公司生产。

1.2 实验设计

实验设置高约 25 cm, 直径约 30 cm 的沙基对老鼠簕种子进行沙培,沙基外部套有塑料网筐和塑料盆,每盆沙基中种植 10 株老鼠簕。实验所用不同浓度培养液用 15‰海水和 DBP 标准液配制,设置 6 个 DBP 质量浓度梯度,分别为 0、1、2、5、10、20 mg/L,以不加入 DBP 的 0 mg/L 作为对照组(CK 表示);其余组为实验组;每盆沙基加入的培养液为 3 L。每个 DBP 质量浓度梯度均设置 3 个平行,6 个梯度共 180 株。实验于 2015 年 8 月 27 日至 2015 年 12 月 26 日在自然透光的大棚中进行,培养期共 120 d。每 7 d 更换一次培养液,每天加入预先放置并经过曝气的自来水补足蒸发所散失的水分。

1.3 测定方法

培育至 120 d 时,从每个 DBP 浓度梯度 30 株中选定 15 株长势良好的老鼠簕幼苗完整取出进行测定。叶绿素含量采用分光光度法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑光氧化还原法测定;过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚比色法测定;过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外分光光度法测定^[11-14]。

1.4 数据处理

每组实验均设 3 个平行,实验结果采用 IBM SPSS Statistics 22.0 进行显著性分析(显著水平 $P=0.05$),采用 Origin 9.0 作图。

2 结果与分析

2.1 DBP 污染对老鼠簕幼苗光合色素的影响

2.1.1 DBP 污染对老鼠簕幼苗叶绿素 a 含量的影响

不同 DBP 处理浓度下老鼠簕幼苗的叶绿素 a

含量如图 1a 所示,随 DBP 处理浓度的升高,老鼠簕幼苗叶绿素 a 含量呈现先下降再上升,再下降又上升的高低交替变化趋势。各实验组(1~20 mg/L)的叶绿素 a 含量同 CK 组(0 mg/L)间均具有显著差异($P<0.05$);其中 1~10 mg/L 各实验组与 CK 组间具有极显著差异($P<0.01$);1、2、10 mg/L 实验组间叶绿素 a 含量无显著差异。5 mg/L 实验组老鼠簕幼苗的叶绿素 a 含量最高,相对于 CK 组提高了 40.12%,其余 1、2、10 和 20 mg/L 各实验组的老鼠簕幼苗叶绿素 a 含量相对于 CK 组分别下降了 46.75%、40.25%、50.78%和 15.21%。

2.1.2 DBP 污染对老鼠簕幼苗叶绿素 b 含量的影响

不同 DBP 处理浓度下老鼠簕幼苗的叶绿素 b 含量如图 1b 所示,随 DBP 处理浓度的升高,老鼠簕幼苗的叶绿素 b 含量呈现与叶绿素 a 相似的高低交替变化趋势。只有 20 mg/L 实验组叶绿素 b 含量与 CK 组无显著差异,1~10 mg/L 各组同 CK 组间均具有极显著差异($P<0.01$);1、2、10 mg/L 实验组间叶绿素 b 含量无显著性差异。5 mg/L 实验组老鼠簕幼苗的叶绿素 b 含量最高,相对于 CK 组提高了 47.62%,其余 1、2、10 和 20 mg/L 各实验组的老鼠簕幼苗叶绿素 b 含量相对于 CK 组分别下降了 49.62%、58.15%、48.87%和 10.78%。

2.1.3 DBP 污染对老鼠簕幼苗叶绿素总含量的影响

不同 DBP 处理浓度下老鼠簕幼苗的叶绿素总含量如图 1c 所示,随 DBP 处理浓度的升高,老鼠簕幼苗叶绿素的总含量呈现与叶绿素 a、叶绿素 b 基本相一致的高低交替变化趋势。各实验组(1~20 mg/L)的叶绿素总含量同 CK 组均具有极显著差异($P<0.01$);1、2、10 mg/L 实验组间叶绿素总含量无显著性差异。折线在 5 mg/L 处有较为明显的突跃,只有该浓度实验组的老鼠簕幼苗叶绿素总含量相对于实验组提高了 41.66%,其余 1、2、10 和 20 mg/L 各实验组的老鼠簕幼苗叶绿素总含量相对于 CK 组分别下降了 47.34%、43.93%、50.39%和 14.30%。

2.1.4 DBP 污染对老鼠簕幼苗叶绿素 a/b 比值的影响

不同 DBP 处理浓度下老鼠簕幼苗的叶绿素 a/b 比值如图 1d 所示,随 DBP 处理浓度的升高,老鼠簕幼苗叶绿素 a/b 比值呈现先上升后下降的趋势,只有 2 mg/L 实验组相对于 CK 组(0 mg/L)有比较高的提升,与 CK 组具有极显著差异($P<0.01$);其余 1、5、10、20 mg/L 各实验组的叶绿素 a/b 比值与 CK 组相比,无显著性差异。2 mg/L 实验组内差异较大,叶绿素 a/b

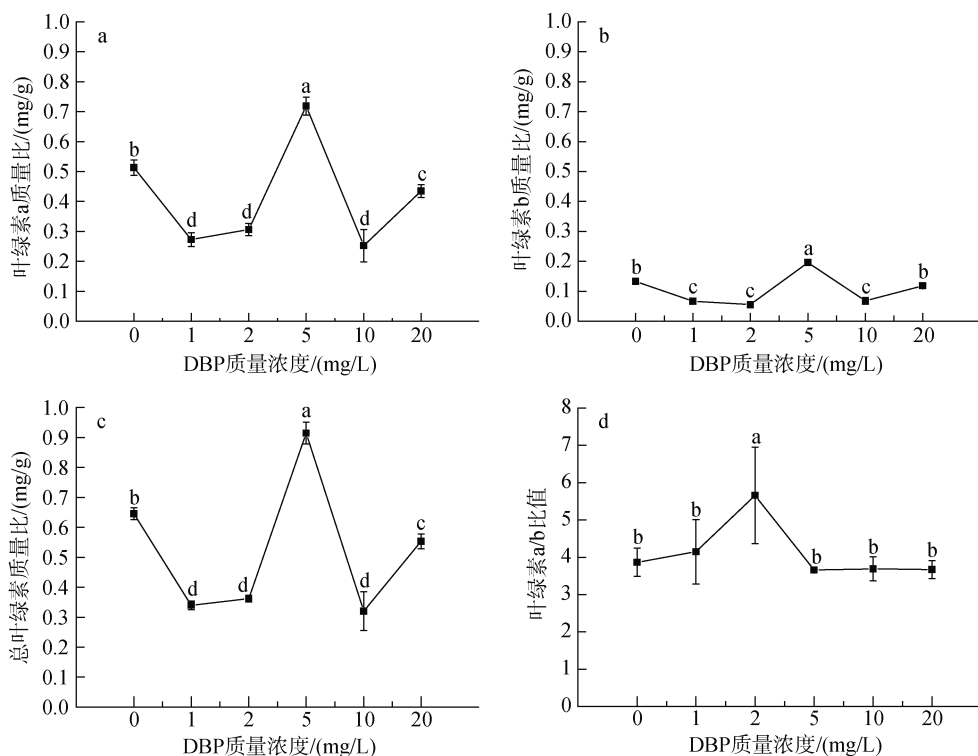


图1 DBP对老鼠簕幼苗叶绿素含量及比值的影响

Fig. 1 Dibutyl phthalate effects on content and ratio of chlorophyll in seedlings of *Acanthus ilicifolius* L.

注: 不同字母 a, b, c, d 表示不同 DBP 处理浓度间的差异显著性, $P < 0.05$ 。下同

Note: The different letter a, b, c, d means the difference of the concentration of different DBP treatment ($P < 0.05$). the same below

比值从 4.24~6.77 不等, 平均相对 CK 组提升了 46.28%, 提升范围较大。其余 1、5、10、20 mg/L 各实验组的叶绿素 a/b 比值相对于 CK 组变化不大, 分别提高 7.25%, 下降 5.39%、4.54%和 5.09%。

2.2 DBP 污染对老鼠簕幼苗抗氧化酶系统的影响

2.2.1 DBP 污染对老鼠簕幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

如图 2 所示, 随 DBP 处理浓度的升高, 老鼠簕幼苗 SOD 的活性呈现先增高后降低的趋势, 实验组 SOD 活性均高于 CK 组, 10 mg/L 实验组 SOD 活性最高, 可达 (135.67 ± 22.08) U/(g·min)。1mg/L 实验组与 CK 组间无显著差异, 2~20 mg/L 实验组与 CK 组间有极显著差异($P < 0.01$)。2 mg/L 与 20 mg/L 实验组间, 以及 5、10 与 20 mg/L 实验组间无显著性差异。各实验组 SOD 活性相对于 CK 组分别提高了 19.80%、101.11%、198.28%、215.40%和 149.38%。

2.2.2 DBP 污染对老鼠簕幼苗过氧化物酶(POD)活性的影响

如图 3 所示, 随 DBP 处理浓度的升高, 老鼠簕幼

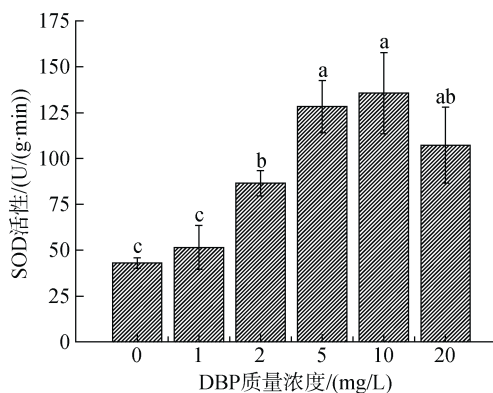


图2 DBP对老鼠簕幼苗SOD活性的影响

Fig. 2 Dibutyl phthalate effects on activity of SOD in seedlings of *Acanthus ilicifolius* L.

苗 POD 的活性呈现先增高后降低的趋势, 10 mg/L 实验组的 POD 活性最高, 约为 (466.33 ± 66.67) U/(g·min)。2、5 和 10 mg/L 实验组同 CK 组间具有极显著差异($P < 0.01$), 1 mg/L, 20 mg/L 实验组同 CK 组间无显著性差异。5 mg/L 和 10 mg/L 实验组间以及 1、2 和 20 mg/L 实验组间无显著性差异。1~20 mg/L 各实验组的 POD 活性值相对于 CK 组分别提高了 21.85%、34.78%、65.22%、82.72%和 8.79%。

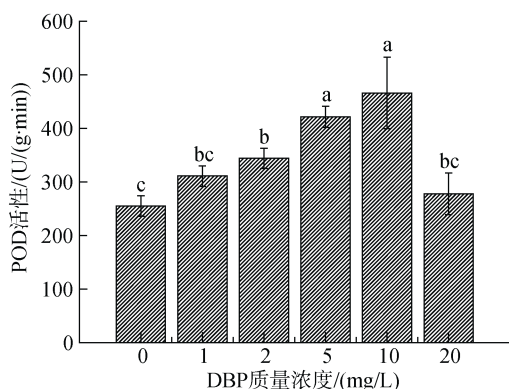


图3 DBP对老鼠簕幼苗POD活性的影响

Fig. 3 Dibutyl phthalate effects on activity of POD in seedlings of *Acanthus ilicifolius* L.

2.2.3 DBP污染对老鼠簕幼苗过氧化氢酶(CAT)活性的影响

如图4所示,随DBP处理浓度的升高,各实验组老鼠簕幼苗CAT的活性呈现先上升后下降,再上升又下降的高低波动变化。但均高于CK组。10 mg/L实验组的CAT活性最高,约为(105.00±10.00)U/(g·min)。1~10 mg/L各实验组CAT活性与CK组间有极显著差异($P<0.01$),20 mg/L与CK组间无显著差异。1,2和5mg/L实验组间老鼠簕幼苗的CAT活性无显著差异。1~20 mg/L各组的CAT活性相对于CK组分别提高了103.27%、72.12%、114.74%、313.09%和19.99%。

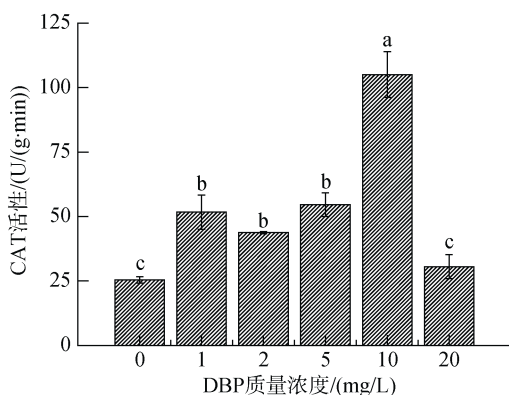


图4 DBP对老鼠簕幼苗CAT活性的影响

Fig. 4 Dibutyl phthalate effects on activity of CAT in seedlings of *Acanthus ilicifolius* L.

3 讨论

3.1 DBP污染对老鼠簕幼苗叶绿素的影响

植物的能量主要来源于光合作用同化的太阳能。叶绿素a和叶绿素b是植物进行光合作用的主

要色素和辅助色素。逆境对植物光合作用的影响,不仅仅体现在影响光合电子传递以及与暗反应相关的酶活性,还会直接引起植物光合结构的损伤^[15]。因此测定老鼠簕幼苗的叶绿素含量能反映出其在DBP的胁迫下的抗逆境能力。杜娜^[16]、戚云^[17]在有关DBP胁迫高等植物的研究中发现,长时间低浓度的DBP胁迫和短时间高浓度的DBP胁迫均使黄瓜叶片中叶绿素的含量有显著性降低;DBP胁迫对小麦幼苗的叶绿素含量产生了明显的抑制作用,且随DBP浓度的增高,抑制作用逐渐变强。本研究中,5 mg/L DBP实验组的老鼠簕幼苗叶片的叶绿素a、叶绿素b和叶绿素总含量均显著高于CK组,可能是由于老鼠簕幼苗在该浓度下恰好可以产生一定程度的抗逆性,增大植株叶片中叶绿素的含量,从而提升光合作用强度,进一步提升植株同化能力,使该浓度下的植株能够有效地对抗DBP的胁迫,从而正常生长。其余1、2、10及20mg/L各组叶绿素a、叶绿素b和总叶绿素含量均显著低于CK组,这与曾晨等^[18]研究发现的在0.02~10 mg/L DBP胁迫下,各实验组秋茄幼苗叶片叶绿素含量均显著高于CK组的结果有所不同。虽然老鼠簕在红树植物类群中同属于秋茄群系,但叶绿素含量和秋茄幼苗叶片有较大差别,可能是由于秋茄属于“胎生”,其胚轴在DBP胁迫环境中抗逆性较好,而老鼠簕幼苗属于较低的灌木,且老鼠簕幼苗由种子开始萌发,其幼苗植株较小,抗逆性较差,故老鼠簕幼苗在其他DBP胁迫浓度下叶绿素a、叶绿素b与总叶绿素含量均低于CK组。

叶绿素的含量及比值与植物生长发育状况以及环境密切相关,在大多数C₃植物中叶绿素a/叶绿素b的理论值约等于3^[19-20]。本研究中,2 mg/L实验组的老鼠簕幼苗叶片叶绿素a/b的比值显著高于其他组和CK组,最高达到6.77。植物在水分、重金属等逆境条件下,均表现出光合作用强度降低,同化产物减少。主要是由于其在轻度胁迫下,气孔因素导致光合速率下降;中、高度胁迫时,植物细胞内产生并积累大量的活性氧自由基,直接引发叶绿素的破坏,尤其是在特定环境条件下对叶绿素a或叶绿素b的特异性破坏;其进一步氧化的产物还可以直接、间接启动对膜脂的过氧化作用^[21-22]。因此可能是由于2 mg/L实验组条件下,DBP对老鼠簕幼苗的叶绿素b的特异性破坏程度高于叶绿素a,虽然叶绿素a与叶绿素b含量相对于CK组均有不同程度的降低,叶绿素a作为主要光合色素较为稳定、分解较少,而叶绿

素 b 在该浓度的 DBP 胁迫下分解的程度较高, 含量较低, 故整体叶绿素 a/叶绿素 b 的比值相对于其他组有显著的提高。这与袁芳等^[19]研究中可能存在叶绿素 a/叶绿素 b 的测定值超过 6 的报道相一致。其他 1、5、10、20 mg/L 各 DBP 实验组的叶绿素 a/b 的比值相对于 CK 组相差小于 7.25%, 比值大约为 3.6, 无显著性差异。虽然 5 mg/L 实验组的老鼠筋幼苗叶片叶绿素 a 与叶绿素 b 的含量均相对于 CK 组有显著提高, 但其叶绿素 a/b 的比值仍然保持正常水平。可以基本认为其他这些实验组的老鼠筋幼苗叶片的光合色素结构仍处于和 CK 组相似的正常状态。

3.2 DBP 污染对老鼠筋幼苗抗氧化酶系统的影响

生物体的抗氧化酶对污染物胁迫相当敏感, 其活性变化可为污染物胁迫下的机体氧化应激提供敏感信息, 因此抗氧化酶可以作为检测环境污染胁迫的生物标记物^[23]。在正常情况下, 植物细胞中存在着活性氧的产生和清除两个过程, 逆境胁迫会促进活性氧的产生, 活性氧在植物体内积累会导致生物大分子和脂质过氧化, 破坏细胞膜结构。SOD、POD 和 CAT 是植物适应多种逆境胁迫的重要酶类, 统称为植物抗氧化酶系统, 它们能消除这种毒害, 维持细胞膜稳定, 在植物有效抵御逆境胁迫方面发挥着重要的作用^[24]。

SOD 催化超氧化物阴离子 $O_2^{\cdot-}$ 转化成 H_2O_2 , CAT 和 POD 催化 H_2O_2 分解为 H_2O 和 O_2 , 以避免和减少 $OH^{\cdot}$ 的产生以致对生物膜系统造成潜在伤害。SOD 普遍存在于各种动植物细胞内, 是特异性清除超氧阴离子自由基的酶, 其活性高低与植物抗逆性大小有一定的相关性, 在适度的逆境环境诱导下, SOD 活性增加能提高植物的适应能力^[25]。吴桂容^[26]、万永吉^[27]等研究表明, 在重金属胁迫下, 桐花树、秋茄体内的 SOD 活性随重金属浓度的增加, 呈现先上升后下降的变化。戚云^[17]、曾晨等^[18]研究表明, DBP 胁迫秋茄幼苗时 SOD 活性也呈现先上升后下降的变化; 小麦茎叶和根系的 SOD 活性均随 DBP、DEHP 浓度升高呈现先上升后下降的趋势。在本实验中, 老鼠筋幼苗的 SOD 活性随 DBP 浓度的增加, 也表现出先上升后下降的趋势。可能由于 DBP 浓度小于 10 mg/L 时, DBP 迫使老鼠筋幼苗细胞中超氧阴离子自由基增加, 随之老鼠筋幼苗激活了细胞中的 SOD, 或诱导了 SOD 蛋白编码基因的表达而合成新的酶, 以清

除细胞中的自由基, 减轻或使植物免受迫害。当 DBP 浓度超过 10mg/L 时, 对老鼠筋幼苗的伤害程度超出了其自我调节阈值, SOD 活性不再上升, 反而呈现下降趋势, 说明高浓度的 DBP 污染对老鼠筋幼苗 SOD 体系造成了一定程度的毒害, 抑制了 SOD 活性和新的酶合成。

POD 是抗氧化酶系统中活性较高的一种适应性酶, 广泛参与到植物的光合作用、呼吸作用及生长素的氧化等过程中, 其活性能有效的反映植物体内的代谢状况、生长发育的特点以及植物对外界环境的适应性。POD 能够催化过氧化氢及氧化酚类的反应, 在植物的呼吸代谢及抗性生理中发挥着非常重要的作用, 并且 POD 在逆境中被激活的程度最大、持续时间最长^[25, 28]。尹素真等^[10]研究表明, 低浓度的 Cd 与 DBP 复合胁迫使油菜的 POD 活性上升, 但与 CK 组差异不显著; 高浓度的 Cd、DBP 复合胁迫则显著抑制了油菜的 POD 活性, 这与本研究中 1 mg/L DBP 实验组与 CK 组、1 mg/L 与 2 mg/L DBP 实验组间差异不显著的结果相一致。本研究结果显示, 当 DBP 浓度小于 10 mg/L 时, 老鼠筋幼苗的 POD 活性逐渐上升, 这是因为老鼠筋幼苗受到 DBP 胁迫时产生了大量有害的过氧化物, 植物体为了保护细胞免受氧化胁迫的伤害而诱导了细胞内 POD 的活性增加^[29]。当 DBP 浓度超过 10 mg/L 时, POD 活性又显著降低, 可能是高浓度的 DBP 胁迫超出了植物体内的 POD 的自我调节阈值, 从而破坏了植物细胞中的多种功能膜及酶体系, 从而导致 POD 活性降低。

CAT 存在于所有的植物体, 主要存在于植物细胞中的过氧化体中, 是一种包含血红素的四聚体酶, 可以清除植物通过呼吸代谢或者光合作用等途径产生的 H_2O_2 , 阻遏了 Haber-Weiss 反应产生毒性更强的物质, 也避免了 H_2O_2 对植物细胞的伤害, 维持活性氧代谢的平衡, 保护细胞膜的完整性^[30]。在本研究中, 虽然 CAT 活性在 DBP 浓度 1 mg/L 到 5 mg/L 之间有波动, 但它们之间并不存在显著性差异。整体上来看, 当 DBP 浓度小于 10 mg/L 时, 老鼠筋幼苗 CAT 的活性随着 DBP 处理浓度的增高而上升, 在 10 mg/L 达到最高。这可能是老鼠筋幼苗在受到不同程度的 DBP 胁迫时, 细胞内产生的 H_2O_2 诱导了相应合成 CAT 和提高 CAT 活性基因的表达, 以清除细胞内过多的 H_2O_2 , 从而维系正常生命活动进程。但当 DBP 浓度达到 20 mg/L 时, CAT 活性明显降低至与 CK 组无显著差异的水平, 可能是由于过高质量浓度的

DBP导致老鼠簕幼苗细胞内生成的 H_2O_2 超出了CAT的清除能力。CAT活性变化趋势与SOD基本一致,都在20 mg/L处有比较明显的下降,这与林植芳等报道的CAT与SOD的具有协同作用,可以缓解 H_2O_2 引起的膜脂过氧化相一致^[31]。赵虎等^[32]研究表明,秋茄幼苗可以耐受0~50 mg/L Cu^{2+} 胁迫,SOD等抗氧化酶活性增加;但老鼠簕却无法耐受20 mg/LDBP胁迫,可能是由于秋茄幼苗胚轴个体较大,耐受性较好,而老鼠簕由种子开始发育,耐受程度较差。

4 结论与展望

老鼠簕幼苗对5 mg/L质量浓度的DBP污染会作出叶绿素含量上升的响应,但整体来看,DBP污染仍会导致老鼠簕幼苗叶片衰老,叶绿素含量相对于对照组显著下降。幼苗的抗氧化酶系统在逆境胁迫下的响应机制及各种酶之间的相互协同作用可以维持其在一定污染范围内(≤ 10 mg/L)细胞活性氧代谢平衡,以及光合作用等生命进程的正常进行。高浓度DBP污染(>10 mg/L)使老鼠簕幼苗细胞体内产生过量的活性氧自由基,抑制了抗氧化酶系统的活性,从而进一步对细胞膜系统产生过氧化损伤,最终可能导致植株衰老或死亡。结合当前老鼠簕自然状态的分布现状,老鼠簕的恢复种植可能更多地需要增加人工育苗过程,以减少酞酸酯类化合物对老鼠簕幼苗的不良影响。同时应当加强对沿海居民的宣传教育以及对老鼠簕等红树植物的保护力度。本研究是基于短期模拟污染环境下DBP暴露对老鼠簕幼苗的影响,但酞酸酯类化合物在海洋中广泛存在,后期应逐步建立起长期动态监测机制以了解酞酸酯类环境污染对海岸带各类植物的长期影响。

参考文献:

- [1] Fan G, Xie J, Yoshino H, et al. Environmental conditions in homes with healthy and unhealthy schoolchildren in Beijing, China[J]. *Building & Environment*, 2017, 112: 270-284.
- [2] van Wezel A P, Van V P, Posthumus R, et al. Environmental risk limits for two phthalates, with special emphasis on endocrine disruptive properties[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2000, 46(3): 305-321.
- [3] Li K, Gu J. Biodegradation of di-n-butyl phthalate by mangrove microorganism *Rhodococcus ruber* 1K. [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(8): 1566-1568.
- [4] Suttie A. *Acanthus ilicifolius*[J]. *Indian Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2009, 70(6): 821-823.
- [5] 邓业成, 骆海玉, 张丽珍, 等. 14种红树植物对动物病原菌的抑菌活性[J]. *海洋科学*, 2012(3): 37-41.
Deng Yecheng, Luo Haiyu, Zhang Lizhen, et al. Inhibitory activity of fourteen mangrove plants against animal pathogens[J]. *Marine Sciences*, 2012(3): 37-41.
- [6] 林鹏, 林益明, 杨志伟, 等. 中国海洋红树林药物的研究现状、民间利用及展望[J]. *海洋科学*, 2005(9): 78-81.
Lin Peng, Lin Yiming, Yang Zhiwei, et al. Research status, civil utilization and Prospect on marine mangrove drug in China—a review[J]. *Marine Sciences*, 2005(9): 78-81.
- [7] Lu Y, Lin M, Aitken R J. Exposure of spermatozoa to dibutyl phthalate induces abnormal embryonic development in a marine invertebrate *Galeolaria caespitosa* (Polychaeta: Serpulidae)[J]. *Aquatic Toxicology*, 2017, 191.
- [8] 穆希岩, 李成龙, 黄瑛, 等. 两种邻苯二甲酸酯类污染物对斑马鱼胚胎发育的影响[J]. *中国环境科学*, 2017(9): 3566-3575.
Mu Xiyang, Li Chenglong, Huang Ying, et al. Effects of two phthalate esters on zebrafish embryos[J]. *China Environmental Science*, 2017(9): 3566-3575.
- [9] 刘春晓, 王平, 李海燕, 等. DBP对铜绿微囊藻生长和抗氧化酶的影响[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(2): 7-12.
Liu Chunxiao, Wang Ping, Li Haiyan, et al. Effects of dibutyl phthalate on growth and enzymatic antioxidants of *Microcystis aeruginosa*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(2): 7-12.
- [10] 尹素真, 李光德, 刘明明, 等. DBP和Cd复合污染对油菜的毒性作用研究[J]. *水土保持学报*, 2015(2): 294-298.
Yin Suzhen, Li Guangde, Liu Mingming, et al. Toxic effects of combined pollution DBP and Cd on rape[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015(2): 294-298.
- [11] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 74-77, 211-219.
Gao Junfeng. *Plant Physiology Experiment Guide*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 74-77, 211-219.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 134-137.
Li Hesheng. *Plant physiology and biochemistry experiment principle and technology*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 134-137.
- [13] 中国科学院上海植物生理研究所. 现代植物生理学实验指南[M]. 上海: 科学出版社, 1999: 305-306.
Science of Plant Physiology and Ecology, SIBS, CAS. *Modern Plant Physiology Experiment Guide*[M]. Shanghai:

- Science Press, 1999: 305-306.
- [14] 杨兰芳, 庞静, 彭小兰, 等. 紫外分光光度法测定植物过氧化氢酶活性[J]. 现代农业科技, 2009(20): 364-366.
Yang Lanfang, Pang Jing, Peng Xiaolan, et al. Measurement of catalase activity in plants by ultraviolet spectrophotometry[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2009(20): 364-366.
- [15] 冯建灿, 胡秀丽, 毛训甲. 叶绿素荧光动力学在研究植物逆境生理中的应用[J]. 经济林研究, 2002(4): 14-18.
Feng Jiancan, Hu Xiuli, Mao Xunjia. Application of chlorophyll fluorescence dynamics to plant physiology in adverse circumstance[J]. Economic Forest Researchers, 2002(4): 14-18.
- [16] 杜娜. 黄瓜对邻苯二甲酸二丁酯(DBP)的毒性响应[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
Du Na. Toxicity Response of Cucumber to Dibutyl Phthalate[D]. Haerbin: Northeast Agricultural University, 2014.
- [17] 戚云. DBP、DEHP 对小麦的毒理学效应研究[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
Qi Yun. Toxicological Effects of DBP and DEHP on Wheat[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2016.
- [18] 曾晨, 李元跃, 陈融斌, 等. DBP 对秋茄幼苗光合作用和抗氧化酶活性的影响[J]. 集美大学学报(自然科学版), 2014(4): 253-258.
Zeng Chen, Li Yuanyue, Chen Rongbin, et al. Physiological and biochemical properties of *Kandelia candel* seedlings under dibutyl phthalate (DBP) stress[J]. Journal of Jimei University (Natural Science), 2014(4): 253-258.
- [19] 袁方, 李鑫, 余君萍, 等. 分光光度法测定叶绿素含量及其比值问题的探讨[J]. 植物生理学报, 2009, 45(1): 63-66.
Yuan Fang, Li Xin, Yu Junping, et al. Methodological Study on Determination of Chlorophyll Contents and Ratio of Chl a/Chl b by Spectrophotometry[J]. Plant Physiology Journal, 2009, 45(1): 63-66.
- [20] Yang S, Jin W, Wang S, et al. Chlorophyll ratio analysis of the responses of algae communities to light intensity in spring and summer in Lake Erhai[J]. Environmental Earth Sciences, 2015, 74(5): 3877-3885.
- [21] 伍泽堂. 超氧自由基与叶片衰老时叶绿素破坏的关系[J]. 植物生理学报, 1991(4): 277-279.
Wu Zetang. Relationship between Superoxide Dismutase and Chlorophyll Degradation in Leaf Senescence[J]. Plant Physiology Journal, 1991(4): 277-279.
- [22] Zhang M, Tan F. Relationship Between Ratio of Chlorophyll a and b Under Water Stress and Drought Resistance of Different Sweet Potato Varieties[J]. Seed, 2001, 18(11): 12-16.
- [23] Wang S, He Y, Ye S, et al. Effects of Di-(2-ethylhexyl) Phthalate (DEHP) on POD Activities and MDA Contents in Stem and Leaves of *Vicia faba* Seedlings[J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2010, 5(4): 587-591.
- [24] Yin L, Huang J, Huang W, et al. Microcystin-RR- induced accumulation of reactive oxygen species and alteration of antioxidant systems in tobacco BY-2 cells[J]. Toxicon Official Journal of the International Society on Toxinology, 2005, 46(5): 507-512.
- [25] 杨舒怡, 陈晓阳, 惠文凯, 等. 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然版), 2016, 45(5): 481-489.
Yang Shuyi, Chen Xiaoyang, Hui Wenkai, et al. Progress in responses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stresses[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2016, 45(5): 481-489.
- [26] 吴桂容. 重金属 Cd 对桐花树幼苗生理生态效应及土壤酶的影响研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2007.
Wu Guirong. The Ecophysiological and Soil Enzymes Effects Research of heavy metal Cd on *Aegiceras corniculatum* seedlings[D]. Xiamen: Xiamen University, 2007.
- [27] 万永吉, 郑文教, 方煜, 等. 重金属铬(Ⅲ)胁迫对红树植物秋茄幼苗 SOD、POD 活性及其同工酶的影响[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008(4): 571-574.
Wan Yongji, Zheng Wenjiao, Fang Yu, et al. Effects of Cr(III) Stress on Activities and Isozymes of SOD and POD of *Kandelia candel* Mangrove Seedlings[J]. Journal of Xiamen University(Natural Science), 2008(4): 571-574.
- [28] Demirevska-Kepova K, Simova-Stoilova L, Stoyanova Z, et al. Biochemical changes in barley plants after excessive supply of copper and manganese[J]. Environmental & Experimental Botany, 2004, 52(3): 253-266.
- [29] 吴桂容, 严重玲. 镉对桐花树幼苗生长及渗透调节的影响[J]. 生态环境, 2006(5): 1003-1008.
Wu Guirong, Yan Chongling. Effects of Cd on the growth and osmotic adjustment regulation contents of *Aegiceras corniculatum* seedlings[J]. Ecology and Environment, 2006(5): 1003-1008.
- [30] 杨淑慎, 高俊凤. 活性氧、自由基与植物的衰老[J]. 西北植物学报, 2001, 21(2): 36-41.
Yang Shushen, Gao Junfeng. Influence of active oxygen and free radicals on plant senescence[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2001, 21(2): 36-41.
- [31] 林植芳, 刘楠. 活性氧调控植物生长发育的研究进展[J]. 植物学报, 2012, 47(1): 74-86.
Lin Zhifang, Liu Nan. Research Progress in the control and regulation of plant growth and development by re-

active oxygen species[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2012, 47(1): 74-86.
[32] 赵胡, 唐俊, 郑文教. 重金属 Cu(2+)胁迫对红树植物秋茄幼苗生长及某些生理特性的影响[J]. 海洋科学,

2016(4): 65-72.
Zhao Hu, Tang Jun, Zheng Wenjiao. Growth and physiological characteristics of *Kandelia obovata* seedlings under Cu²⁺ stress[J]. Marine Sciences, 2016(4): 65-72.

Effects of dibutyl phthalate pollution on stress resistance physiological characters of the *Acanthus Illicifolius* L. seedlings

ZHAO Qiu-yi^{1, 2}, LI Yuan-yue^{1, 2}, CHEN Rong-bin^{1, 2}, PAN Wen³, CHEN Zheng-qiang^{1, 2}, XU Jia-jia^{1, 2}, LI Rong-wei^{1, 2}, GAO Su-rui^{1, 2}, LIU Chang^{1, 2}

(1. Fisheries College, Jimei University, Xiamen 361021, China; 2. Key Laboratory of Marine fishery Resources and Ecological environment in Fujian province, Xiamen 361021, China; 3. College of Food and Biological Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China)

Received: Nov. 28, 2017

Key words: dibutyl phthalate; mangrove; *Acanthus illicifolius* L.; chlorophyll; antioxidant enzymes

Abstract: In the simulated pot experiments, the effects of different exposure of dibutyl phthalate(DBP) mass concentrations (0, 1, 2, 5, 10, 20 mg/L) on contents of chlorophyll, ratio of chlorophyll a/b, antioxidant enzymes (superoxide dismutase, peroxidase and catalase) *et al* were studied, taking the mangrove *Acanthus illicifolius* L. seedlings as experimental materials. The results showed that the 5mg/L DBP exposure would have a positive effect on chlorophyll content of the seedlings, while others reduced remarkably. The DBP exposure has hardly effect on the ratio of chlorophyll a/b in the seedlings. The results also showed the activity of antioxidant enzymes in *Acanthus illicifolius* L. seedlings first increased then declined with the improve of DBP concentration. It is suggested that the DBP pollution could lead to leaf senescence. Antioxidant enzyme system could be induced to increase its activity with a low-concentration DBP exposure(≤ 10 mg/L) and maintain the metabolic balance of active oxygen in cells within a certain time, while could get irreversible damage with a high one(>10 mg/L). The conclusions of this study also provide a scientific reference for the protection of mangrove wetlands, as well as the ecological risk assessment and pollution control of DBP.

(本文编辑: 梁德海)