

秋茄 (*Kandelia candel*) 幼苗对多氯联苯 污染的生理生态响应

刘亚云^{1 2} 孙红斌¹ 陈桂珠^{1,*} 赵 波¹ 李伟煜¹

(1. 中山大学环境科学与工程学院 广州 510275 ; 2. 广东海洋大学农学院 湛江 524088)

摘要 通过盆栽实验 ,研究了 4 种不同浓度 (180、900、1800 和 2700 $\mu\text{g kg}^{-1}$) 的多氯联苯 (PCBs) 对红树植物秋茄幼苗的茎高、茎径、生物量、相对生长速率以及叶片的叶绿素含量、水势、丙二醛含量和游离脯氨酸含量等生理生态指标的影响 ,结果表明 : (1) 在所设 PCBs 浓度范围内 ,PCBs 对秋茄幼苗的茎高、茎径、生物量和相对生长速率等生长指标的生长没有产生不利的影响 ,相反具有促进作用 ,红树植物秋茄在 PCBs 污染情况下能旺盛生长 ; (2) 在所设 PCBs 浓度范围内 ,秋茄幼苗叶片能保持相对正常的叶绿素水平和相对稳定的叶绿素 a/b 值 ,叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 的含量虽然有所降低 ,但均为对照的 70% 以上 ,叶绿素 a/b 值有所升高 ,但均未超过对照的 15%。 (3) 随着 PCBs 浓度的升高 ,秋茄幼苗叶片水势呈上升趋势 ,而游离脯氨酸含量和膜质过氧化产物 MDA 含量均有一定的增加 ,说明 PCBs 对秋茄幼苗产生了一定的影响。总体来看 ,秋茄幼苗能在所设浓度的 PCBs 范围内正常生长 ,对 PCBs 有较强的耐受性和适应性 ,对 PCBs 污染的沉积物进行修复是可行的。

关键词 : 红树植物 秋茄 ; 多氯联苯 ; 生理生态 响应

文章编号 : 1000-0933 (2007) 02-0746-09 中图分类号 : Q945.78 , Q948 文献标识码 : A

Eco-physiological responses of *Kandelia candel* seedlings to polychlorinated biphenyls (PCBs) treatment

LIU Ya-Yun^{1 2} , SUN Hong-Bin¹ , CHEN Gui-Zhu^{1,*} , ZHAO Bo¹ , LI Wei-Yu¹

1 School of Environmental Science and Engineering , Sun Yat-sen University , Guangzhou 510275 , China

2 College of Agronomy , Guangdong Ocean University , Zhanjiang , 524088 , China

Acta Ecologica Sinica 2007 27 (2) 0746 ~ 0754.

Abstract : Mangroves are diverse plant communities consisting of tropical to subtropical trees and shrubs growing in intertidal coastal zones. Mangrove , eco-physiology and growth characteristics as effected by nutrient , salinity , metals , PHA and other pollutants including phytoremediation have been previously investigated. However , the phytoremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs)-contaminated sediments by mangrove is a largely untouched area of research. This study was conducted to determine if mangrove specie *Kandelia candel* could be used for phytoremediation of PCBs-contaminated sediments. In this study , *Kandelia candel* seedlings were grown in PCB contaminated sediment for determining the eco-

基金项目 : 国家自然科学基金资助项目 (40576057) , 教育部博士点基金资助项目 (20050558010) , 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2003AA627030)

收稿日期 2005-12-13 ; 修订日期 2006-08-25

作者简介 : 刘亚云 (1968 ~) 女 , 内蒙古人 , 博士 , 主要从事环境生态与湿地恢复研究. E-mail : liu_ya_yun @ 126. com

通讯作者 Corresponding author. E-mail : Chenguizhu@ yeah. net

致谢 : 本文在写作过程中得到了广州大学缪绅裕教授和美国路易斯安娜州立大学湿地生物地球化学研究所 Ronald D. DeLaune 博士的指导 , 特此致谢.

Foundation item : The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40576057) ; National Ministry of Education Foundation for Ph. D Programe (No. 20050558010) National "863" program of high technology (No. 2003AA 627030)

Received date 2005-12-13 ; **Accepted date** 2006-08-25

Biography : LIU Ya-Yun , Ph. D. , mainly engaged in environment ecology and wetland rehabilitation. E-mail : liu_ya_yun @ 126. com

physiological responses of mangrove species *Kandelia candel* to PCBs phytotoxicity. The influence of increasing concentrations of PCBs (0, 180, 900, 1800 and 2700 $\mu\text{g kg}^{-1}$) on stem height, basal stem diameter, total biomass, growth rate, chlorophyll content, chlorophyll a/b ratio, water potential, free proline content and MDA contents were measured. Results were as follows: (1) After 6 months of exposure to PCBs, the growth of stem height, basal stem diameter, total biomass and the relative growth rate were equal or higher than the control which indicated that PCBs did not inhibit the growth of *Kandelia candel*; (2) The chlorophyll a, chlorophyll b and chlorophyll a + b content in the leaves of *Kandelia candel* decreased moderately and the chlorophyll a/b ratio increased moderately with increase in PCBs concentration in the sediment. However, the chlorophyll content was never less than 70% and the chlorophyll a/b ratio never more than 15% of PCBs-free control plants. The plants, even though exposed to PCBs, were still able to maintain relatively normal levels of photosynthetic pigments and a constant chlorophyll a/b ratio. (3) The water potential, free proline content and MDA in leaves of PCBs-stressed *Kandelia candel* seedlings were stimulated significantly in comparison to control, with an increase in PCBs concentration in the sediment. The study clearly demonstrated growth and physiological function of mangrove species *Kandelia candel* was not adversely impacted by PCBs contaminated sediment and thus could be used in phytoremediation of PCB contaminated sediment.

Key Words : mangrove ; *Kandelia candel* ; PCBs ; eco-physiology ; responses

多氯联苯 (polychlorinated biphenyls, PCBs) 是一类典型的持久性有机污染物, 由于其低溶解性、高稳定性和半挥发性, 可以通过大气和洋流进行远程迁移, 从而造成全球的环境污染; 又因其高脂溶性, 使其能沿食物链传递、富集和放大^[1], 对动物和人类产生致癌、致畸、致突变效应和类激素效应, 严重威胁着生态系统功能、食物链安全和人类健康, 影响和制约着人类的生存和可持续发展。由于 PCBs 的水溶性很低, 土壤和底泥成为大多数 PCBs 在环境中的重要归宿^[2], 因此对 PCBs 污染的土壤和底泥进行修复, 已成为国内外的研究焦点^[3,4], 由于植物修复技术成本低, 破坏性小, 愈来愈显示出其独特的优势, 引起了人们的高度关注^[5]。然而, 由于许多植物种类对污染物很敏感, 限制了它们在植物修复中的应用, 因此应选择和驯化对污染物有更强抗性的植物种类, 来促进植物修复, 某些生理指标如生长的迅速、叶绿素水平和叶绿素 a/b 的比率、游离脯氨酸和丙二醛的含量等可以用来指示植物对污染物的耐性^[6-8]。

红树植物由于其强大的根系被广泛应用于如氮、磷等营养元素和重金属^[9-15]、石油^[16]以及持久性污染物多环芳烃^[17]等的修复, 但利用红树植物修复沉积物中 PCBs 的研究却鲜见报道。本研究通过人工模拟 PCBs 污染沉积物, 探讨 PCBs 污染对红树植物秋茄幼苗的生长和生理生态特性的影响, 以便了解红树植物对 PCBs 的抗性和耐性, 为合理利用红树植物修复沉积物中的 PCBs 提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试植物秋茄 (*Kandelia candel*) 幼苗和沉积物均采自深圳福田红树林自然保护区育苗基地, 所用化学药品 PCBs 2,2',4,4'-tetrachlorobiphenyl 和 2,2',4,4',6,6'-hexachlorobiphenyl 的纯度 >99%, 为美国百灵威公司产品。

1.2 实验设计

试验设 1 个对照组 (T0) 和 4 个不同浓度处理组, 对照组不加 PCBs, 处理组 PCBs 的浓度分别为海洋沉积物 PCBs 污染风险评价中值^[18]、中值的 5、10 倍和 15 倍, 即 180、900、1800 $\mu\text{g kg}^{-1}$ 和 2700 $\mu\text{g kg}^{-1}$, 分别用 T1、T2、T3 和 T4 表示。试验采取如下 3 个步骤将多氯联苯与风干过筛的沉积物混合: (1) 将供实验用的 PCBs 2,2',4,4'-tetrachlorobiphenyl 和 2,2',4,4',6,6'-hexachlorobiphenyl 各 50mg 溶于 1000ml 丙酮中, 然后分别取 324、216、108ml 和 21.6ml, 各加入到 1000g 沉积物中, 充分搅拌均匀, 于振荡器上振荡 24h, 再放置 1d, 为第 1 母体污染沉积物; (2) 将第 1 母体污染沉积物分别加入到 5000g 沉积物中, 充分搅拌, 于振荡器上振荡 24h, 放置 1d, 为第 2 母体污染沉积物; (3) 然后将第 2 母体污染沉积物再分别加入到另外 3 份预先称好的沉积物中, 使

PCBs 浓度达到上述 4 种试验处理要求,放置 15d,期间每天混合 1 次,向每个盆钵中加入自来水,使水面高过土样 3cm,平衡 15d,备用。

在玻璃铁丝网模拟试验室内进行盆栽试验,以不加 PCBs 的沉积物为对照组,每盆栽植秋茄幼苗 10 株。在盆栽期间,每星期加两次自来水,使水面保持相同的高度,以补充蒸发散失的水分。

1.3 指标测定及其测定方法

1.3.1 植物生长指标的测定

试验前,随机选取同期运回的秋茄幼苗 21 株作标准木,逐株测定茎高和茎径,并将植株各部分(根、茎、叶)在 105℃下烘干至恒重,测定其干物重(生物量),并计算每一植株的总生物量。根据植物相关生长法,苗木的茎高(H)、茎径(D)、与生物量(B)之间存在下列相关关系:

$$B = a (D^2 H)^b, \text{即 } \lg B = \lg a + b \lg (D^2 H) \tag{1}$$

以(1)式为回归式,用标准木实测数据代入,求出关系式中的 a 、 b 值。
试验开始后,每月定期测定各组每一植株的茎高和茎径,计算每月茎高、茎径生长量,将测得的茎高、茎径数据代入式(1),分别统计每一植株生物量,并计算每月生物量的增量,并根据公式:

$$R = (\ln B_2 - \ln B_1) / (t_2 - t_1) \tag{2}$$

计算相对生长速率,式中, R 代表相对生长速率, B_1 和 B_2 分别为试验开始时(t_1)和结束时(t_2)的总生物量^[9]。

1.3.2 生理指标的测定

- 试验处理 6 个月后,对以下生理指标进行测定:
- (1)叶绿素 a 、 b 及总量的测定 取植物功能叶片,用丙酮黑暗浸提 24h,用分光光度计分别测量浸提液在波长 645nm 和 663nm 处的吸光值,计算叶绿素的含量。
 - (2)水势的测定 取植物功能叶片,用小液流法测定秋茄叶片的水势^[20]。
 - (3)丙二醛(MDA)含量的测定 取秋茄功能叶 2.0g,于液氮中迅速研磨至粉末状,分次加入 10ml 预冷的 62.5mmol/L、pH7.8 的磷酸缓冲液,15000r/min 离心 20min,取上清液,采用硫代巴比妥酸显色法测定 MDA 的含量^[21]。
 - (4)游离脯氨酸含量的测定 取植物功能叶片,剪碎混匀,采用磺基水杨酸提取,酸性茚三酮比色法测定游离脯氨酸的含量^[22]。

1.4 数据处理

试验结果进行数理统计,数据为平均数±标准差(Mean±SD),对组间数据进行单因素方差分析(One-Way ANOVA),* $p < 0.05$ 为差异显著,** $p < 0.01$ 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 PCBs 污染对秋茄幼苗生长状况的影响

2.1.1 对茎高和茎径生长的影响

根据每个月测得的茎高和茎径,计算秋茄幼苗的茎高和茎径 6 个月内的总的生长量(表 1)以及每个月的生长量(图 1、图 2)。

表 1 PCBs 污染对秋茄幼苗茎高和茎径生长的影响(6 个月)

| Table 1 Effect of PCBs on stem height and basal stem diameter increment of <i>Kandelia candel</i> seedlings (6 months) | | | | |
|--|---------------------------------------|--------------------------------|---|--------------------------------|
| PCBs 浓度 ($\mu\text{g kg}^{-1}$) PCBs conc. | 茎高增量 (cm) Increment of stem height | 处理/对照 (%) Treatment/Control | 茎径增量 (mm) Increment of basal stem diameter | 处理/对照 (%) Treatment/Control |
| T0 (0) | 6.176 ± 1.999 | 100 | 1.634 ± 0.415 | 100 |
| T1 (180) | 7.759 ± 3.655 | 125.63 | 1.747 ± 0.483 | 106.92 |
| T2 (900) | 9.156* ± 3.916 | 148.25 | 1.811 ± 0.493 | 110.83 |
| T3 (1800) | 8.523 ± 3.811 | 138.00 | 1.928* ± 0.471 | 117.99 |
| T4 (2700) | 7.523 ± 3.721 | 121.81 | 1.726 ± 0.476 | 105.63 |

表中数据为平均值±标准差,* $p < 0.05$;Values are means ± SD,* indicated significant difference at $p = 0.05$ level

由表(1)可以看出,PCBs处理6个月后,秋茄幼苗茎高和茎径的生长量,随着PCBs浓度的升高,呈现先升高后降低的趋势,但各浓度组的茎高和茎径生长量均高于对照组T0。其中T2浓度组的茎高和T3浓度组的茎径显著高于对照组,分别比对照组高48.25%和17.99%;T1、T3和T4浓度组的茎高和茎径与对照组相比差异不显著,但仍比对照组高。总的来看,6个月的PCBs处理并未对秋茄植株茎高生长造成不利的影响,反而具有促进生长的作用。

不同的处理时间、不同浓度的PCBs对秋茄幼苗茎高生长的影响如图1所示。从图中可以看出,随着处理时间的延长,各处理组茎高的生长量呈现先升高后降低的趋势,到第5个月时达生长高峰。生长1个月后,T3和T4浓度组茎高的生长量低于对照组,而T1和T2浓度组的茎高要高于对照组,随着时间的进一步延长,各浓度组茎高生长量要大于对照组,说明PCBs对秋茄茎高的生长具有促进作用。开始时,较低浓度组(T1、T2)的促进作用要大于较高浓度组(T3、T4),随着时间的延长,较高浓度组PCBs对茎高的促进作用明显增大。到第6个月时,各浓度组茎高的生长量开始降低,T3降到与对照相同的水平,T1与T4比对照组低,而T2浓度组的茎高生长量仍高于对照组。总的看来,PCBs对红树植物秋茄茎高的生长具有促进作用,而且中浓度组(T2、T3)对茎高生长的促进作用最大。

不同的处理时间、不同浓度的PCBs对秋茄幼苗茎径生长的影响如图2所示。从图中可以看出:1个月后,各浓度处理组幼苗茎径的生长量均大于对照组,随着处理时间的延长,除了T3浓度组茎径生长量大于对照组外,各浓度组茎径的生长量均小于对照组,这种情况一直持续到第4个月。随着处理时间的进一步延长,出现相反的情况,除了T3浓度组茎径生长量小于对照组外,其它各浓度组茎径的生长量均大于对照组。

2.1.3 对生物量和相对生长速率的影响

将实测的标准木的茎径(D)、茎高(H)与生物量(B)代入式(1),建立秋茄生物量与株高和基径的回归方程为 $\lg B = 0.2970 + 0.9279 \lg (D^2 H)$ ($r = 0.8671$, $p < 0.01$)

根据回归方程统计PCBs处理前和处理6个月后各处理组植株的生物量(B),并根据式(2)计算相对生长速率如表2所示。从表中可以看出,PCBs处理6个月后,各浓度组秋茄幼苗的生物量和相对生长速率均比对照组要高,其中T2和T3浓度组的生物量和相对生长速率显著高于对照组,T2浓度组的生物量和相对生长速率分别比对照组高23.55%和22.25%;T3浓度组分别比对照组高23.07%和25.69%。以上分析说明,在所设浓度范围内,PCBs对秋茄幼苗生物量的积累和相对生长速率具有促进作用,尤其是中浓度组(T2和T3)的促进作用更大。

2.2 PCBs污染对秋茄幼苗叶片叶绿素含量的影响

不同浓度PCBs处理6个月对秋茄幼苗叶片叶绿素含量的影响如表3所示。从表中可以看出,随着沉积物中PCBs浓度的升高,秋茄幼苗叶片叶绿素a、叶绿素b和叶绿素a+b的含量均呈现先降低后升高的趋势,且各浓度组均显著或极显著低于对照组含量。T1、T2、T3和T4各浓度组叶绿素a的含量分别比对照组

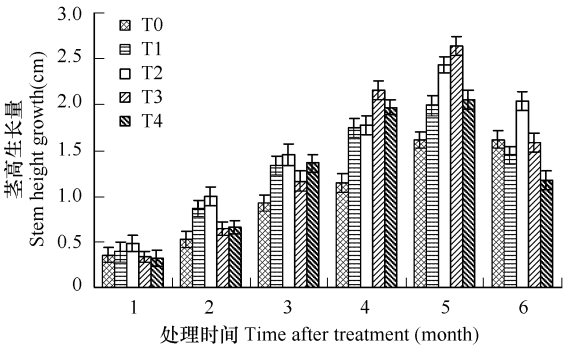


图1 不同处理时间 PCBs 对秋茄幼苗茎高生长的影响
Fig. 1 Effect of PCBs on stem height growth of *Kandelia candel* seedlings at different time

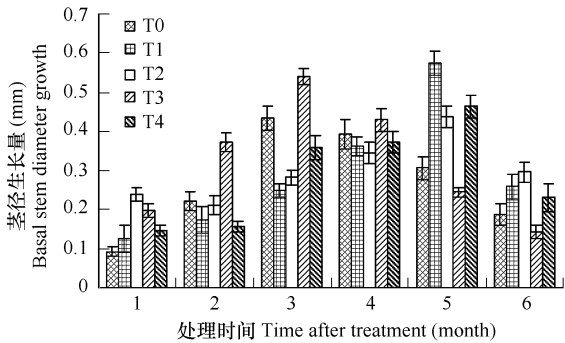


图2 不同处理时间 PCBs 对秋茄幼苗茎径生长的影响
Fig. 2 Effect of PCBs on basal stem diameter growth of *Kandelia candel* seedlings at different time

低 12.71%、23.02%、14.27% 和 18.97% ;叶绿素 b 的含量分别比对照组低 16.57%、25.74%、24.85% 和 26.63% ,叶绿素 a + b 的含量分别比对照组低 13.49%、23.54%、16.73% 和 20.73%。

表 2 PCBs 污染对秋茄幼苗生物量和相对生长速率的影响 (6 个月)

Table 2 Effect of PCBs on total biomass growth and relative growth rate of *Kandelia candel* seedlings (6 months)

| PCBs 浓度 (μg kg ⁻¹) PCBs conc. | 生物量增量 (g) Total biomass increment | 处理/ 对照 (%) Treat/ control | 相对生长速率 Relative growth rate | 处理/ 对照 (%) Treat/ control |
|--|--------------------------------------|------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| T0 (0) | 4.561 ± 1.481 | 100 | 0.436 ± 0.121 | 100 |
| T1 (180) | 5.326 ± 1.426 | 116.77 | 0.503 ± 0.125 | 115.37 |
| T2 (900) | 5.635 * ± 1.566 | 123.55 | 0.533 * ± 0.100 | 122.25 |
| T3 (1800) | 5.613 * ± 1.558 | 123.07 | 0.548 * ± 0.128 | 125.69 |
| T4 (2700) | 5.320 ± 1.682 | 116.64 | 0.474 ± 0.134 | 108.72 |

表中数据为平均值 ± 标准差 , * $p < 0.05$, ;Values are means ± SD , * indicated significant difference at $p = 0.05$ level

随着沉积物中 PCBs 浓度的升高 ,秋茄幼苗叶片叶绿素 a/b 值呈现先升高后降低的趋势 ,各浓度组叶绿素 a/b 值均高于对照组 ,其中 T3 浓度组极显著高于对照组 ,其余浓度组与对照组间差异不显著。

表 3 多氯联苯污染对秋茄叶片色素的含量 (mg/g 鲜重)的影响 (6 个月)

Table 3 Effect of PCBs on Chlorophyll contents (mg/g FW) of *Kandelia candel* seedling (6 months)

| PCBs 浓度 (μg kg ⁻¹) PCBs conc. | 叶绿素总量 Chl. a + b | 叶绿素 a Chl. a | 叶绿素 b Chl. b | 叶绿素 a/b Chl. a/b |
|--|---------------------|------------------|------------------|---------------------|
| T0 (0) | 1.423 ± 0.108 | 1.086 ± 0.064 | 0.338 ± 0.047 | 3.216 ± 0.302 |
| T1 (180) | 1.231 ± 0.130 | 0.948 ± 0.094 | 0.282 ± 0.040 | 3.359 ± 0.255 |
| T2 (900) | 1.088 ** ± 0.060 | 0.836 ** ± 0.047 | 0.251 ** ± 0.013 | 3.327 ± 0.045 |
| T3 (1800) | 1.185 * ± 0.078 | 0.931 * ± 0.066 | 0.254 ** ± 0.012 | 3.660 * ± 0.116 |
| T4 (2700) | 1.128 ** ± 0.088 | 0.880 ** ± 0.074 | 0.248 ** ± 0.014 | 3.554 ± 0.119 |

表中数据为平均值 ± 标准差 , * $p < 0.05$, ;Values are means ± SD , * indicated significant difference at $p = 0.05$ level , ** indicated significant difference at $p = 0.01$ level

2.3 PCBs 污染对秋茄幼苗叶片水势的影响

不同浓度 PCBs 对秋茄幼苗叶片水势的影响见图 3。从图中可以看出 ,随着沉积物中 PCBs 浓度的增加 ,秋茄幼苗叶片水势略有增加 ,但差异不显著 ;当沉积物中 PCBs 浓度达 2700 μg kg⁻¹ 时 ,叶片水势显著增加 ,比对照组增加 23.53%。水势的增加意味着秋茄幼苗的吸水能力有所下降 ,从而会对植株生长产生一定的影响。

2.4 PCBs 污染对秋茄幼苗叶片丙二醛 (MDA) 和游离脯氨酸含量的影响

2.4.1 对丙二醛 (MDA) 含量的影响

处理 6 个月后 ,秋茄叶片中 MDA 含量如表 4 所示。从表中可以看出 ,随着 PCBs 浓度的提高 ,秋茄幼苗叶片 MDA 含量变化基本呈先升后降的趋势 ,但均高于对照组。其中 T1 和 T2 浓度组极显著高于对照组 ,分别比对照组高 45.96% 和 57.48% ,T3 浓度组和对照组相比差异不显著 ,但仍比对照组高 6.86% ,T4 浓度组显著高于对照组 ,比对照组高 33.70% ,说明 PCBs 污染导致了秋茄细胞发生了质膜过氧化作用。

2.4.2 对游离脯氨酸含量的影响

处理 6 个月后 ,秋茄叶片中游离脯氨酸含量如表 4 所示。从表中可以看出 ,脯氨酸含量的变化与 MDA 呈

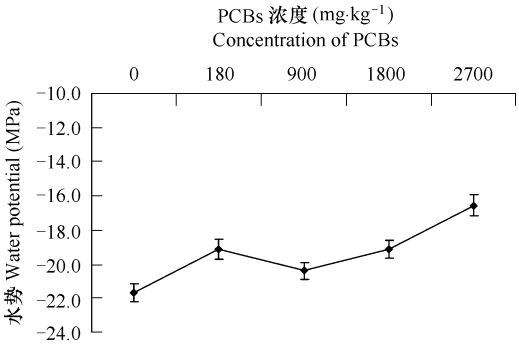


图 3 多氯联苯污染对秋茄幼苗叶片水势的影响

Fig.3 Effect of PCBs on water potential of *Kandelia candel* seedling (6 months)

现基本相同的趋势,即随着 PCBs 浓度的提高,游离脯氨酸的含量呈先升后降的趋势,且均高于对照组,其中 T1 和 T4 浓度组分别比对照组高 20.29% 和 30.32%,但差异不显著;T2 和 T3 浓度组分别比对照组高 51.65% 和 50.81%,差异显著,说明在 PCBs 污染的情况下,各处理都有一定的脯氨酸的积累。

表 4 PCBs 污染对秋茄幼苗叶片丙二醛和游离脯氨酸含量的影响 (6 个月)

Table 4 Effect of PCBs on contents of MDA and free proline of *Kandelia candel* seedlings (6 months)

| PCBs 浓度 (μg kg ⁻¹) PCBs conc. | 丙二醛含量 (nmol g ⁻¹) Contents of MDA | 处理/对照 (%) Treatment/ control | 脯氨酸含量 (μg g ⁻¹) Contents of free proline | 处理/对照 (%) Treatment/ control |
|--|--|---------------------------------|---|---------------------------------|
| T0 (0) | 4.879 ± 0.400 | 100 | 8.205 ± 1.757 | 100 |
| T1 (180) | 7.121 ** ± 0.810 | 145.96 | 9.870 ± 1.967 | 120.29 |
| T2 (900) | 7.684 ** ± 0.887 | 157.48 | 12.433 * ± 2.422 | 151.65 |
| T3 (1800) | 5.923 ± 0.772 | 106.86 | 12.374 * ± 1.344 | 150.81 |
| T4 (2700) | 6.523 * ± 0.234 | 133.70 | 11.103 ± 2.535 | 135.32 |

表中数据为平均值 ± 标准差, * $p < 0.05$, $p < 0.01$;Values are means ± SD , * indicated significant difference at $p = 0.05$ level , ** indicated significant difference at $p = 0.01$ level

3 讨论

3.1 PCBs 污染对秋茄幼苗生长的影响

关于 PCBs 污染对红树植物生长的影响的研究尚未见报道,而其它污染物如人工污水、盐、重金属、含油废水和多环芳烃等对红树植物生长的影响已有相关报道^[23-31],在这些研究中均发现低浓度污染物促进红树植物的生长,高浓度污染物抑制红树植物的生长,在其它高等植物中也发现了低浓度污染物的刺激作用^[32],本研究在所设浓度范围内,PCBs 对红树植物秋茄和桐花树幼苗茎高、茎径、生物量和相对生长速率等生长指标具有促进作用,这可能是因为 PCBs 具有与植物生长激素如生长素和赤霉素相类似的环状结构,生长素和赤霉素促进植物茎的生长,而 PCBs 也可能因其结构的相似性而具有与生长激素类似的作用,从而促进秋茄的生长。

3.2 PCBs 污染对秋茄幼苗叶片叶绿素含量的影响

叶绿素含量和叶绿素 a/b 值,是光合作用的基础参数,常被用来作为植物抗性的指标,来评价环境污染物对植物的影响^[6,33,34]。当植物受逆境胁迫时,植物叶片中叶绿素的含量会降低,而叶绿素 a/b 值会升高,不过对于耐性较强的植物来说,叶绿素含量降低的比较缓慢,叶绿素 a/b 值也升高的比较平稳^[6]。

本研究中,各浓度组秋茄幼苗叶片中叶绿素含量均比对照组低,但均为对照组的 70% 以上,如各浓度组叶绿素 a、叶绿素 b 和叶绿素 a + b 的含量分别是对照组的 76.98% ~ 87.29%、73.37% ~ 83.43% 和 76.46% ~ 86.51% ;各浓度组叶片叶绿素 a/b 值与对照组相比均有所升高,但升高的幅度都比较小,均未超过对照组的 15%,如各浓度组幼苗叶片叶绿素 a/b 值是对照组的 101.76% ~ 112.84% 。表明秋茄幼苗在所设 PCBs 浓度范围内,仍然能保持相对正常的光合色素水平,对 PCBs 有较强的耐受性。

3.3 PCBs 污染对秋茄幼苗叶片水势的影响

植物的水势,通常被认为是植物水分状况最有代表意义的参数^[35],因而水势的变化,可以反应出污染物对植物在生长发育中的水分状况的影响。杨盛昌等研究了不同浓度 Cd 对桐花树幼苗水势的影响^[27],结果表明随着培养液中 Cd 浓度的增加,桐花树幼苗的抽条水势略有降低,但当培养液中 Cd 浓度大于 0.5 μg/L 时,抽条水势显著增加,这与本研究结果有部分相似,随着沉积物中 PCBs 浓度的增加,秋茄幼苗叶片水势略有增加,但差异不显著,表明秋茄幼苗对 PCBs 具有较强的耐性;当沉积物中 PCBs 浓度达 2700 μg kg⁻¹ 时,叶片水势显著增加,水势的增加意味着秋茄幼苗的吸水能力有所下降,表明浓度为 2700 μg kg⁻¹ 的 PCBs 对秋茄植株的生长产生了一定的影响。

3.4 PCBs 污染对秋茄幼苗叶片丙二醛和游离脯氨酸含量的影响

植物器官在逆境条件下,往往发生膜脂过氧化作用,MDA 是其产物之一,常被作为脂质过氧化指标,用来

反映细胞膜脂过氧化程度和植物对逆境条件下反应的强弱^[7]。目前有关红树植物对 PCBs 污染情况下的细胞膜脂过氧化程度的研究尚未见报道,而在其他逆境胁迫如重金属、盐和多环芳烃等方面已有相关报道^[27, 36~42],郑海雷等研究发现对于红树植物白骨壤和秋茄来说,盐度增加会加剧叶片中 MDA 的累积^[36, 37];孙娟等研究发现,随着生长基萘浓度的提高,白骨壤幼苗子叶 MDA 含量变化基本呈先升后降的趋势,且各处理组含量与对照相当或普遍高于和略高于对照组^[42],杨盛昌等研究表明,随着培养液中 Cd 浓度的增加,桐花树叶片的膜脂过氧化作用则有明显增强^[27],本研究中,随着沉积物 PCBs 浓度的增加,秋茄叶片的脂膜过氧化作用明显增强,说明 PCBs 污染导致了秋茄细胞发生了质膜过氧化作用。

生长在逆境中的植物,体内常积累游离脯氨酸,而游离脯氨酸积累的量又往往和逆境强度和植物对逆境的抵抗力有关^[43]。植物体内脯氨酸含量可作为鉴定植物相对抗性的指标^[8],起到渗透调节、含氮化合物来源、酶和细胞结构保护剂及羟基自由基清除剂以及参与叶绿素合成,维持细胞膜的正常功能等作用^[21, 44~46]。逆境胁迫时,大量有害离子累积在液泡中,植物中的细胞质不能忍受高浓度离子,细胞质需要无毒的渗透物质即脯氨酸来平衡液泡中的离子^[47]。从本研究结果看,随着 PCBs 浓度加大,植物体内积累的游离脯氨酸含量也增加,表明秋茄对 PCBs 具有较强的耐性和抗性。

References :

[1] Safe S. Polychlorinated biphenyls (PCBs) : environmental impact , biochemical and toxic responses , and implications for risk assessment. *Critical Reviews in Toxicology* , 1994 , 4 (2) : 87 — 149.

[2] Wu P , Yang G P , Zhao X K. Polychlorinated biphenyl in marine sediment. *Marine Environmental Science* , 2001 , 20 (3) : 75 — 80.

[3] Zheng H L , Chen J , Deng W J. Polychlorinated biphenyls in soil environment and remediation of PCBs-contaminated soil. *Soils* , 2004 , 36 (1) : 16 — 20.

[4] Chekol T , Vough L R , Chaney R L. Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils : the rhizosphere effect. *Environment International* , 2004 , 30 (6) : 799 — 804.

[5] Wenzel W W , Adriano D C , Salt D , *et al.* Phytoremediation : a plant-microbe-based remediation system. In : Adriano D C , *et al.* , editors. *Bioremediation of Contaminated Soils*. Agronomy Monograph , 1999 , 37 : 457 — 508.

[6] Huang X D , El-Alawi Y , Penrose D M , *et al.* Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. *Environmental Pollution* , 2004 , 130 : 453 — 463.

[7] Luo G H , Wang A G , Guo J Y. Effects of some exogenous factors on superoxide dismutase activity in soybean seedlings. *Acta Phytophysiological Sinica* , 1990 , 16 (3) : 239 — 244.

[8] Tang Z C. Free proline accumulate of plants at adversity condition and probable significance. *Plant Physiology News Report* , 1984 , 1 (1) : 15 — 21.

[9] Chen G Z , Chen G K. Purifying effects of *Avicennia marina* simulated wetland system on sewage. *Marine Environmental Science* , 2000 , 19 (4) : 23 — 26.

[10] Chen G K , Chen G Z. Allocation , circulation and purification effect of nutrient pollutant N in synthetic wastewater in *Avicennia marina* simulated wetland system. *Chinese Journal of Ecology* , 2004 , 23 (6) : 15 — 18.

[11] Chen G K , Chen G Z. Phosphorus cycling in a simulated wastewater-affected mangrove (*Avicennia marina*) wetland system. *Acta Ecologica Sinica* , 2005 , 25 (3) : 627 — 632.

[12] Chen G K , Chen G Z. Distribution , migration and purifying effect of cadmium in artificial *Avicennia marina* wetland system. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2005 , 16 (3) : 550 — 554.

[13] Chu H Y , Chen N C. Tide-tank system simulating mangrove wetland for removal of nutrients and heavy metals from wastewater. *Water Science Technology* , 1998 , 38 (1) : 361 — 368.

[14] Sansanayuth P , Phadungchep A , Ngammontha S , *et al.* Shrimp pond effluent pollution problems and treatment by constructed wetlands. *Water Science Technology* , 1996 , 34 (11) : 93 — 98.

[15] Ye Y , Tam N F Y , Wong Y S. Livestock wastewater treatment by a mangrove pot-cultivation system and the effect of salinity on the nutrient removal efficiency. *Marine Pollution Bulletin* , 2001 , 42 (6) : 513 — 521.

[16] Ramsay M A , Swannell R P J , Shipton W A , *et al.* Effect of bioremediation on the microbial community in oiled mangrove sediments. *Marine Pollution Bulletin* , 2000 , 41 : 413 — 419.

- [17] Ke L, Wang W Q, Wong T W Y, *et al.* Removal of pyrene from contaminated sediments by mangrove microcosms. *Chemosphere*, 2003, 51: 25—34.
- [18] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, *et al.* Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management*, 1995, 19: 81—97.
- [19] Ye Y, Lu C Y, Tan F Y. Studies on differences in growth and physiological responses to water logging between *Bruguiera gymnorhiza* and *Kandelia candel*. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21 (10): 1654—1661.
- [20] Zhang Z L. Plant physiology experiment direction (The second edition). Beijing: Higher Education Press, 1990. 12—14.
- [21] Liu Z Q, Zhang S C. Plant resistance physiology. Beijing: China Agriculture Press, 1994. 371—372.
- [22] Zou Q. Plant physiology and biochemistry experiment direction. Beijing: China Agriculture Press, 2000. 96—97.
- [23] Chen G K, Chen G Z, Wong Y S. Effect of synthetic wastewater on *Avicennia marina* growing under simulated tidal conditions. *Marine Environmental Science*, 2003, 22 (3): 39—43.
- [24] Chen G Z, Ma H, Wong Y S, *et al.* The effects of treating synthetic municipal wastewater on *Aegiceras corniculatum* under simulated tidal condition. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 1998, 37 (supplement 2): 186—190.
- [25] Chen C P, Wang W Q, Lin P. Influences of salinity on the growth and some eco-physiological characteristics of mangrove species, *Sonneratia apetala* seedlings. *Chinese Bulletin of Botany*, 2000, 17 (5): 457—461.
- [26] Wang W Q, Lin P. Influence of substrate salinity on the growth of mangrove species of *Bruguiera gymnorhiza* Seedling. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1999, 38 (2): 273—279.
- [27] Yang S C, Wu Q. Effect of Cd on growth and physiological characteristics of *Aegiceras corniculatum* seedlings. *Marine Environmental science*, 2003, 22 (1): 38—42.
- [28] Zheng F Z, Lin P, Zheng W J. Study on the tolerance of *Kandelia Candel* mangrove seedlings to cadmium. *Acta Ecologica Sinica*, 1994, 14 (4): 408—414.
- [29] Li M, Chen G Z. Effect of oil wastewater on some eco-physiological indexes of *Kandelia candel* seedlings. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20 (3): 528—532.
- [30] Wang X F, Chen G Z, Xu X L. Physi-ecological responses of *Avicennia marina* to oil treatment. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (6): 1095—1100.
- [31] Lu Z Q, Zheng W J, Ma L *et al.* Effect of Naphthalene and Pyrene on hypocotyl germination and growth of mangrove plant *Kandelia candel* (L.) Druce. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2005, 44 (4): 580—583.
- [32] McCann J H, Greenberg B M, Solomon K R. The effect of creosote on the growth of an axenic culture of *Myriophyllum spicatum* L. *Aquatic Toxicology*, 2000, 50: 267—276.
- [33] Huang X D, McConkey B J, Babu S T, *et al.* Mechanisms of photoinduced toxicity of photomodified anthracene to plants: Inhibition of photosynthesis in the aquatic higher plants *Lemna gibba* (duck weed). *Environment Toxicology Chemistry*, 1997, 16: 1707—1715.
- [34] Marwood C A, Solomon K R, Greenberg B W. Chlorophyll fluorescence as a bioindicator of effects on growth in aquatic macrophytes from mixtures of PAHs. *Environment Toxicology Chemistry*, 2001, 20: 890—898.
- [35] Lei Z X, Lin P. Relationship between the dynamics of water potential in twig of *Kandelia Candel* and ecological factors. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1996, 35 (2): 276—282.
- [36] Zheng H L, Lin P. The effect of salinity on membrane protection system for various organs of *ageiceras corniculatum* Seedling. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1995, 34 (4): 629—633.
- [37] Zheng H L, Lin P. Some Physiological Responses of *Avicennia marina* to Salinity. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1997, 36 (1): 135—139.
- [38] Ma J H, Zheng H L, Zhang C G *et al.* Effects of salinity on protein, H_2O_2 content and lipid peroxidation in *Kandelia candel* and *Aegiceras coniculatum* seedlings. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2002, 41 (3): 354—358.
- [39] Wang W Q, Lin P. Study on the membrane lipid peroxidation of the leaves of *Kandelia candel* seedlings to long-term and short-term salinity. *Acta Oceanologica Sinica*, 2000, 22 (3): 49—54.
- [40] Zheng W J, Lin P. Effect of salinity on the growth characteristics and water metabolism of seedlings of *Kandelia Candel*. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 1990, 29 (5): 575—579.
- [41] Zheng W J, Lin P. Influences of salinity on the growth and some eco-physiological characteristics of mangrove species *B sexangula* seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1992, 3 (1): 9—14.
- [42] Sun J, Zheng W J, Zhao H. Effect of Naphthalene intimidation on seedling germ ination and antioxidantase in *Avicennia marina*. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2005, 44 (3): 433—436.

[43] Zhu G L , Deng X W , Zuo W N. Mensuration of free proline contents in plant. Plant Physiology News Report ,1983 1 (1) 35 — 37.

[44] Liu P ,Yang Y A. Effects of molybdenum and boron on membrane lipid peroxidation and endogenous protective systems of soybean leaves. Acta Botanica Sinica ,2000 42 (5) :461 — 466.

[45] Wang Z. Plant physiology. Beijing :China Agriculture Press 2000.

[46] Yu M ,Xiao H D ,Chen Y J ,*et al.* Effect of boron and molybdenum on the contents of soluble sugars and free proline in seashore paspalum. Acta Agromonica Sinica ,2004 30 (8) 847 — 848.

[47] Zheng Y S ,Zheng R M ,Yao Q D. Effects of salt stress on physiology and biochemistry in the leaves of *Dend rocalamus oldhami* on the coast. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition) ,2003 32 (4) :478 — 481.

参考文献：

[2] 吴萍 杨桂朋 赵学坤. 海洋沉积物中的多氯联苯. 海洋环境科学 2001 20 (3) 75 ~ 80

[3] 郑海龙 陈杰 邓文靖. 土壤环境中的多氯联苯 (PCBs)及其修复技术. 土壤 ,2004 ,36 (1) 16 ~ 20.

[7] 罗广华 王爱国 郭俊颜. 几种外源因子对大豆幼苗 SOD 活性的影响. 植物生理学报 ,1990 ,16 (3) 239 ~ 244.

[8] 汤章诚. 逆境条件下植物脯氨酸的累积及其可能的意义. 植物生理学通讯 ,1984 ,1 (1) 15 ~ 21.

[9] 陈桂珠 陈桂葵. 白骨壤模拟湿地系统对污水的净化效应. 海洋环境科学 ,2000 ,19 (4) 23 ~ 26.

[10] 陈桂葵 陈桂珠. 白骨壤模拟湿地系统中氮的分配、循环及其净化效应. 生态学杂志 2004 23 (6) 15 ~ 18.

[11] 陈桂葵 陈桂珠. 白骨壤模拟湿地系统中磷的分配循环及其净化效应. 生态学报 2005 ,25 (3) 627 ~ 632.

[12] 陈桂葵 陈桂珠. 镉在白骨壤模拟湿地系统中的分布、迁移及净化效应. 应用生态学报 2005 16 (3) 550 ~ 554.

[19] 叶勇 卢昌义 谭凤仪. 木榄和秋茄对水渍的生长与生理反应的比较研究. 生态学报 ,2001 21 (10) 1654 ~ 1661.

[20] 张志良. 植物生理学实验指导 (第二版) . 北京 :高等教育出版社 ,1990. 12 ~ 14

[21] 刘祖祺 ,张石城. 植物抗性生理学. 北京 :中国农业出版社 ,1994. 371 ~ 372

[22] 邹琦. 植物生理生化实验指导. 北京 :中国农业出版社 2000. 96 ~ 97.

[23] 陈桂葵 陈桂珠 黄玉山. 人工污水对白骨壤生长的影响. 海洋环境科学 2003 ,22 (3) 39 ~ 43

[24] 陈桂珠 马骅 黄玉山 等. 人工污水对桐花树的生长影响. 中山大学学报 (自然科学版) ,1998 37 (增刊 2) 186 ~ 190.

[25] 陈长平 王文卿 林鹏. 盐度对无瓣海桑幼苗的生长和某些生理生态特性的影响. 植物学通报 2000 17 (5) 457 ~ 461.

[26] 王文卿 林鹏. 盐度对红树植物木榄生长的影响. 厦门大学学报 (自然科学版) ,1999 38 (2) 273 ~ 279.

[27] 杨盛昌 吴琦. Cd 对桐花树幼苗生长及某些生理特性的影响. 海洋环境科学 2003 22 (1) 38 ~ 42.

[28] 郑逢中 林鹏 郑文教. 红树植物秋茄幼苗对镉耐性的研究. 生态学报 ,1994 14 (4) 408 ~ 414.

[29] 李玫 陈桂珠. 含油废水对秋茄幼苗的几个生理生态指标的影响. 生态学报 2000 20 (3) 528 ~ 532.

[30] 王雪峰 陈桂珠 许夏玲. 白骨壤对石油污染的生理生态响应. 生态学报 2005 25 (6) :1095 ~ 1100.

[31] 陆志强 郑文教 马丽. 不同浓度萘和芘处理对红树植物秋茄胚轴萌发和幼苗生长的影响. 厦门大学学报 (自然科学版) 2005 44 (4) : 580 ~ 583.

[33] 雷泽湘 林鹏. 秋茄幼枝水势动态及其与生态因子的关系. 厦门大学学报 (自然科学版) ,1996 35 (2) 276 ~ 282.

[34] 郑海雷 林鹏. 盐度对桐花树幼苗根茎叶膜保护系统的影响. 厦门大学学报 (自然科学版) ,1995 34 (4) 629 ~ 633.

[35] 郑海雷 林鹏. 红树植物白骨壤对盐度的某些生理反应. 厦门大学学报 (自然科学版) ,1997 36 (1) 135 ~ 139.

[36] 马建华 郑海雷 张春光. 盐度对秋茄和桐花树幼苗蛋白质、H₂O₂ 及脂质过氧化作用的影响. 厦门大学学报 (自然科学版) 2002 41 (3) : 354 ~ 358.

[37] 王文卿 林鹏. 不同盐胁迫时间下秋茄幼苗叶片膜脂过氧化作用的研究. 海洋学报 2000 ,22 (3) 49 ~ 54.

[38] 郑文教 林鹏. 盐度对秋茄幼苗的生长和水分代谢效应. 厦门大学学报 (自然科学版) ,1990 29 (5) 575 ~ 579.

[39] 郑文教 林鹏. 盐度对红树植物海莲幼苗的生长和某些生理生态特性的影响. 应用生态学报 ,1992 3 (1) 9 ~ 14.

[40] 孙娟 郑文教 赵胡. 萘胁迫对白骨壤种苗萌生及抗氧化作用的影响. 厦门大学学报 (自然科学版) 2005 44 (3) 433 ~ 436.

[41] 朱广廉 邓兴旺 左卫能. 植物体内游离脯氨酸的测定. 植物生理学通讯 ,1983 1 (1) :35 ~ 37.

[44] 刘鹏 杨玉爱. 钼、硼对大豆叶片膜脂过氧化及体内保护系统的影响. 植物学报 ,2000 42 (5) :461 ~ 466.

[45] 王忠主编. 植物生理学,北京 :中国农业出版社. 2000

[46] 喻敏 萧洪东 陈跃进 等. 硼钼对低温下海滨雀稗可溶性糖和游离脯氨酸含量的影响. 作物学报 2004 30 (8) 847 ~ 848.

[47] 郑郁善 郑容妹 姚庆端. 盐分胁迫对沿海沙地绿竹生理生化的效应. 福建农林大学学报 (自然科学版) 2003 32 (4) 478 ~ 481.