

大金发藓对土壤多氯联苯污染的生理生态响应

吴启美 周启星*

南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室/天津市城市生态修复与污染防治重点实验室, 天津 300071

摘要 通过微体繁殖技术在多氯联苯(PCBs)污染土壤基质上进行大金发藓(*Polytrichum commune*)的室内培养, 研究了不同浓度(5、10和20 mg·kg⁻¹)低氯PCBs (Aroclor 1242)和高氯PCBs (Aroclor 1254)对大金发藓生理生态指标的影响。经6个月的培养, 大金发藓的密度和盖度分别达93%和50株·cm⁻²以上, PCBs处理组与对照组相比无显著差异, 表明PCBs对大金发藓茎叶碎片再生成新植株体的能力没有产生不利影响。大金发藓鲜质量和株高随低氯PCBs (Aroclor 1242)浓度增加而增加、随高氯PCBs (Aroclor 1254)浓度增加而减小, 但均高于对照, 表明PCBs处理对大金发藓的生长具有一定的促进作用。PCBs处理组大金发藓叶绿素a、b以及叶绿素a + b含量较对照组有所增加, 叶绿素a/b值与对照组相比基本没有变化。PCBs处理组大金发藓膜脂过氧化产物丙二醛含量和超氧化物歧化酶活性与对照组相比无显著差异, 谷胱甘肽含量较对照组显著增加, 表明谷胱甘肽在大金发藓体内活性氧清除过程中起重要作用。总体来看, 大金发藓能在所设浓度的PCBs范围内正常生长, 对PCBs有较强的耐性。

关键词 生理生态响应, 污染, 多氯联苯, 大金发藓

引用格式: 吴启美, 周启星 (2015). 大金发藓对土壤多氯联苯污染的生理生态响应. 植物生态学报, 39, 275–282. doi: 10.17521/cjpe.2015.0027

Eco-physiological responses of *Polytrichum commune* to soil contamination by polychlorinated biphenyls

WU Qi-Mei and ZHOU Qi-Xing*

Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education / Tianjin Key Laboratory of Remediation and Pollution Control for Urban Ecological Environment, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China

Abstract

Aims The objective of this study was to investigate the tolerance of *Polytrichum commune* to soil contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs), and the underlying eco-physiological mechanisms.

Methods *Polytrichum commune* was propagated and cultured in PCBs contaminated soil by means of micro-propagation under laboratory conditions, and eco-physiological variables relating to tolerance to PCBs (Aroclor 1242 and Aroclor 1254) contamination were studied.

Important findings The coverage and density of *P. commune* were higher than 93% and 50 plants·cm⁻² and there was no significant difference between the PCBs treatments and the control. PCBs (Aroclor 1242 and Aroclor 1254) had no adverse effects on the regeneration of gametophyte fragments. The height and fresh mass of *P. commune* increased with an increase in the concentration of Aroclor 1242, and decreased with an increase in the concentration of Aroclor 1254, but they were higher in the PCBs treatment than in the control, indicating that PCBs stimulated the growth of *P. commune*. The contents of chlorophyll (Chl) a, Chl b and Chl a + b in *P. commune* were slight higher in the PCBs treatments than in the control, and the ratio of Chl a/b maintained relatively stable in both the PCBs treatments and the control. The content of malondialdehyde and activity of superoxide dismutase in *P. commune* were not significantly different between the PCBs treatments and the control, whereas the content of glutathione was significantly higher in the PCBs treatments than in the control, indicating that glutathione played a pivotal role in the course of scavenging reactive oxygen species. The study demonstrated that the growth of *P. commune* was not adversely impacted by PCBs contaminated soil at given concentrations, reflecting its tolerance to PCBs.

Key words eco-physiological response, pollution, polychlorinated biphenyls, *Polytrichum commune*

Citation: Wu QM, Zhou QX (2015). Eco-physiological responses of *Polytrichum commune* to soil contamination by polychlorinated biphenyls (PCBs). *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 275–282. doi: 10.17521/cjpe.2015.0027

多氯联苯(PCBs)具有高毒性、生物积累性、环境持久性以及半挥发性(长距离迁移等), 已被列为《关于持久性有机污染物的斯德哥尔摩公约》首先控制和消除的12种有机污染物之一(周启星等, 2004; 周启星和罗义, 2011)。尽管PCBs在世界各国已相继停产且不再使用, 但过去大规模的生产与应用已导致大量PCBs进入环境中。进入环境中的PCBs受到环境中多种因素的影响, 在不同的环境介质间会发生一系列的迁移转化, 土壤是其最终归宿和蓄积库(Ockenden *et al.*, 2003; Dalla Valle *et al.*, 2005)。PCBs等持久性有机污染物(POPs)污染土壤的修复, 已成为当今国际关注的热点(周启星等, 2007; Zhou *et al.*, 2012)。

植物修复是一种经济、高效且环境友好型的绿色修复技术。植物修复有机污染物主要是利用植物对有机污染的吸收以及根际圈的降解、固化作用(Alkorta & Garbisu, 2001; Zhou *et al.*, 2011)。研究表明, 通过种植紫苜蓿(*Medicago sativa*)、南瓜(*Cucurbita moschata*)、苇状羊茅(*Festuca arundinacea*)及黑麦草(*Lolium perenne*)等植物, 可以减少土壤环境中PCBs的含量(Chekol *et al.*, 2004; Ding *et al.*, 2011; Tu *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2013; Qin *et al.*, 2014)。植物修复是土壤PCBs污染修复的有效途径之一。然而, 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, 因此筛选对污染物具有更强抗性的植物种类是植物修复PCBs污染土壤的首要任务。

苔藓植物具有特殊的形态结构和生理特性, 是高等植物中最为原始的陆生类群。全世界约有24 000种苔藓植物, 其中可能蕴藏着一些能修复PCBs污染的种类。然而, 关于苔藓植物修复PCBs污染土壤的研究未见报道。苔藓植物没有种子, 主要依靠孢子及无性繁殖体等进行传播与繁殖, 人工引种与栽培研究的滞后影响了其在更多领域的应用。本研究选择苔藓植物中植株较大、世界性分布以及多年生的大金发藓(*Polytrichum commune*)为试验材料, 通过微体繁殖技术在PCBs污染土壤上进行栽培, 研究其对PCBs污染的耐性及生理生态响应, 为利用苔藓植物修复PCBs污染土壤提供理论

基础和科学依据。

1 材料和方法

1.1 实验材料

供试土壤采自广州揭阳市。采集的土壤样品自然风干后压碎, 去杂物后过4 mm筛, 备用。供试苔藓植物大金发藓采自贵阳高坡云顶草场。大金发藓的地上部高约为20 cm, 地下部假根的长度约为17 cm。用剪刀将大金发藓地上绿色部分剪下, 用粉碎机将其粉碎成细小的碎片, 备用。选择二氯、三氯、四氯为主的Aroclor 1242和四氯、五氯、六氯为主的Aroclor 1254作为研究的PCBs污染物。Aroclor 1242和Aroclor 1254产自美国AccuStandard公司, 购于百灵威。丙酮为分析纯。

1.2 实验设计

为对比低氯PCBs (Aroclor 1242)和高氯PCBs (Aroclor 1254)对大金发藓生长的影响是否存在差异, 试验设1个对照(CK)和3个不同浓度的处理, 对照不加PCBs, 其他处理Aroclor 1242和Aroclor 1254的浓度分别为5、10和20 mg·kg⁻¹, 各处理均设3个重复。

实验容器采用直径为15 cm的玻璃培养皿, 每皿装土200 g。将购买的Aroclor 1242和Aroclor 1254分别溶于丙酮溶液并按所设浓度添加到土壤中, 通风橱放置48 h, 充分混匀, 浇水平衡2周, 备用。

大金发藓的培养主要采用撒茎叶法, 将0.8 g茎叶碎片撒播于每个处理组的土表。实验的开始阶段在培养箱中进行, 培养箱的温度为25 °C, 光周期为12 h·d⁻¹。一个月后, 土表已长满由茎叶碎片长成的植株, 将培养皿从培养箱移出, 室内培养。培养6个月后收获植株。

1.3 测定方法

大金发藓盖度、密度、株高及鲜质量的测量: 盖度测量采用15 cm × 15 cm (每个格为1 cm × 1 cm)的样方框盖在培养皿上, 记录网格中大金发藓占有的面积, 然后除以培养皿的面积, 即为培养皿内大金发藓的盖度。密度采用五点取样法对测定单位面积(1 cm × 1 cm)内的大金发藓株数进行计数, 再计算平均值。大金发藓株高用直尺测量, 每个培养皿随

机选取50株大金发藓测量,再计算平均值。将收获后的大金发藓植株,先用自来水冲洗干净后再用去离子水充分漂洗,用滤纸吸干多余的水分后测量其鲜质量。

大金发藓叶绿素含量的测定:根据张宪政(1986)的“丙酮乙醇混合液法”并加以改进。剪取顶端2 cm的大金发藓0.2 g于试管中,加入1:1的丙酮-乙醇混合提取液25 mL,在25 °C下过夜,至样品完全变白。光密度的测定:取上清液用721分光光度计分别在663 nm和645 nm波长下读取光密度,以1:1丙酮-乙醇混合液为空白对照。将测定得到的光密度 D_{663} 和 D_{645} 代入以下计算式:

$$\text{叶绿素a含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{(12.7D_{663} - 2.69D_{645}) \times V}{1000 \times m} \quad (1)$$

$$\text{叶绿素b含量}(\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}) = \frac{(22.91D_{645} - 4.68D_{663}) \times V}{1000 \times m} \quad (2)$$

其中, V 为提取液的体积(mL), m 为叶片的质量(g)。

大金发藓超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)及谷胱甘肽(GSH)含量的测定:SOD活性和GSH含量测定使用南京建成生物工程研究所研发的植物组织中SOD测试试剂盒和GSH测试试剂盒,MDA含量测定参考《植物生理学实验指导》(高俊凤,2006)。

1.4 数据处理

采用SPSS 16.0与Origin 8.0对数据进行统计与分析。实验结果均以平均数±标准偏差的形式表示。采用单因素方差分析方法中Duncan多重比较进行多组样本间差异显著性分析,设定显著性水平 $p < 0.05$ 。

2 结果和分析

2.1 PCBs污染对大金发藓茎叶碎片再生能力的影响

撒茎叶法是基于苔藓植物茎叶碎片具有产生新配子体的能力,是一种将苔藓植物体茎碎片撒播于基质表面培养苔藓的方法。许多研究者通过撒茎叶法的方式成功地促进了干旱、半干旱地区苔藓结皮层的形成(贾艳等,2012;田桂泉等,2005)。本研究在撒播大金发藓茎叶碎片后的第7天,对照以及PCBs各浓度处理均出现少量的绿色小芽体。此后,新植株的数量不断增多,一个月后布满整个培养皿(图1),表明大金发藓茎叶碎片具有极强的再生繁殖能力。6个月收获植株时,大金发藓的盖度与密度分别

达到93%和50株·cm⁻²以上,且PCBs处理与对照之间无显著差异(图1,图2)。实验结果表明,不管是低氯PCBs(Aroclor 1242),还是高氯PCBs(Aroclor 1254),对大金发藓茎叶碎片产生新植株的能力均没有影响。因此,可以通过微体繁殖撒茎法在PCBs污染土壤上人工繁殖培养大金发藓。

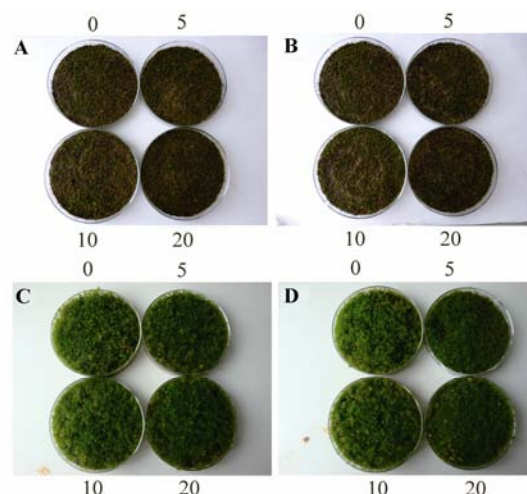


图1 不同浓度(mg·kg⁻¹)多氯联苯(PCBs)污染对大金发藓生长的影响。A, Aroclor 1242污染1个月。B, Aroclor 1254污染1个月。C, Aroclor 1242污染6个月。D, Aroclor 1254污染6个月。

Fig. 1 Effects of different concentration (mg·kg⁻¹) polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination on the growth of *Polydictum commune*. A, Aroclor 1242 contaminated 1 month. B, Aroclor 1254 contaminated 1 month. C, Aroclor 1242 contaminated 6 months. D, Aroclor 1254 contaminated 6 months.

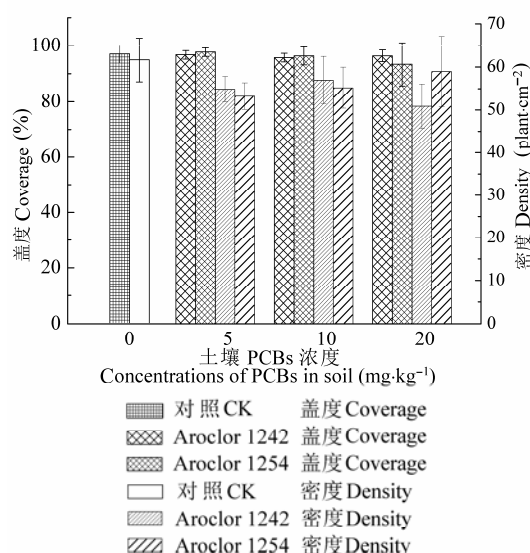


图2 多氯联苯(PCBs)污染对大金发藓盖度和密度的影响(平均值±标准偏差)。

Fig. 2 Effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination on the coverage and density of *Polydictum commune* (mean ± SD).

2.2 大金发藓生长对PCBs污染的响应

资料显示, PCBs污染会导致植物出现毒害症状, 如叶片萎黄、叶缘卷曲和坏死等(Weber & Mrozek, 1979; Zeeb *et al.*, 2006)。本研究表明, 大金发藓生长过程中, 无论是暴露于低氯PCBs (Aroclor 1242), 还是暴露于高氯PCBs (Aroclor 1254), 从外观上看生长状况良好, 没有出现明显的毒害症状。

从大金发藓的鲜质量和株高来看, 低氯的PCBs (Aroclor 1242)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 其鲜质量分别比对照组增加了3.62%、1.39%和41.06%, 株高分别比对照增加了-1.26%、10.03%和33.64%。高氯的PCBs (Aroclor 1254)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 其鲜质量分别比对照增加了74.06%、19.57%和9.95%, 株高分别比对照增加了41.03%、14.11%和6.24% (图3)。可见, 在所设浓度范围内, PCBs对大

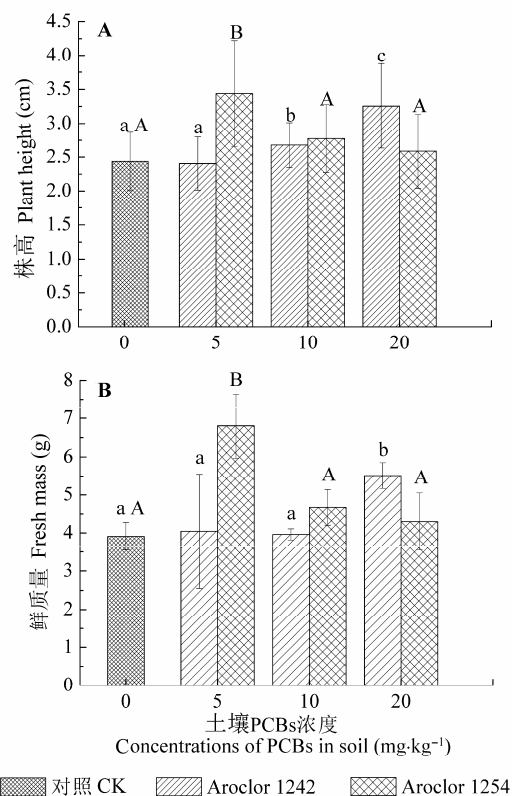


图3 多氯联苯(PCBs)污染对大金发藓株高(A)和鲜质量(B)的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示Aroclor 1242不同处理间差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母表示Aroclor 1254处理间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 3 Effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination on the height (A) and fresh mass (B) of *Polytrichum commune* (mean \pm SD). Different lowercase letters indicate significant differences among different Aroclor 1242 treatments ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among different Aroclor 1254 treatments ($p < 0.05$).

金发藓的生长不仅没有抑制作用, 总体上反而表现出促进作用。

2.3 大金发藓叶绿素含量对PCBs污染的响应

表1表明, 低氯PCBs (Aroclor 1242)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 叶绿素(Chl) a分别比对照增加了19.71%、9.60%和28.04%, Chl b则分别比对照增加了18.98%、8.51%和25.85%, Chl a + b分别比对照增加了19.51%、9.29%和27.42%, Chl a/b分别比对照增加了0.67%、1.03%和1.91%; 高氯PCBs (Aroclor 1254)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 其Chl a分别比对照增加了9.99%、19.39%和1.50%, Chl b分别比对照增加了7.18%、19.56%和-1.25%, Chl a + b分别比对照增加了9.20%、19.44%和0.72%, Chl a/b值分别比对照增加了2.66%、-0.12%和2.79%。

2.4 大金发藓MDA含量对PCBs污染的响应

本研究表明, 与对照相比, 各浓度组大金发藓MDA含量均有所增加(图4)。低氯PCBs (Aroclor 1242)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 大金发藓MDA含量分别为对照的100.54%、111.63%和116.58%。高氯PCBs (Aroclor 1254)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 大金发藓MDA含量分别为对照的114.06%、106.95%和100.06%。可见, 无论是低氯PCBs处理, 还是高氯PCBs处理, 大金发藓MDA含量增加的幅度都比较小, 差异均未达到显著性水平(图4)。

2.5 大金发藓SOD酶活性与GSH含量对PCBs污染的响应

在本研究中, 低氯PCBs (Aroclor 1242)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 大金发藓SOD活性为对照的100.63%、102.18%和82.95%; 高氯PCBs (Aroclor 1254)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 大金发藓SOD活性为对照的96.47%、112.20%和90.15%。可见, 无论是低氯PCBs处理, 还是高氯PCBs处理, 大金发藓SOD活性增高或降低的幅度都比较小, 差异均未达到显著性水平(图5A)。

研究还表明, 低氯PCBs (Aroclor 1242)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 大金发藓GSH含量分别比对照增加了1.59%、123.03%和67.06%; 高氯PCBs (Aroclor 1254)浓度为5、10和20 mg·kg⁻¹时, 大金发藓GSH含量分别比对照增加了71.69%、152.90%和134.41%。除了低氯PCBs (Aroclor 1242) 5 mg·kg⁻¹处理外, Aroclor 1242的其余浓度处理与高氯PCBs (Aroclor 1254)的所有浓度处理下, 大金发藓GSH含

表1 多氯联苯(PCBs)污染对大金发藓叶绿素含量的影响(平均值±标准偏差)

 Table 1 Effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination on the content of chlorophyll (Chl) in *Polytichum commune* (mean ± SD)

污染物 Pollutant	浓度 Concentration ($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	Chl a ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	处理/对照 Treatment / control (%)	Chl b ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	处理/对照 Treatment / control (%)	Chl a + b ($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)	处理/对照 Treatment / control (%)	Chl a / b	处理/对照 Treatment / Control (%)
CK		$2.32 \pm 0.13^{\text{aA}}$	100.00	$0.92 \pm 0.05^{\text{aA}}$	100.00	$3.23 \pm 0.18^{\text{aA}}$	100.00	$2.52 \pm 0.01^{\text{aA}}$	100.00
Aroclor 1242	5	$2.78 \pm 0.29^{\text{ab}}$	119.71	$1.09 \pm 0.12^{\text{a}}$	118.98	$3.87 \pm 0.41^{\text{a}}$	119.51	$2.54 \pm 0.02^{\text{a}}$	100.67
	10	$2.54 \pm 0.10^{\text{ab}}$	109.60	$1.00 \pm 0.05^{\text{a}}$	108.51	$3.54 \pm 0.15^{\text{a}}$	109.29	$2.55 \pm 0.03^{\text{a}}$	101.03
	20	$2.97 \pm 0.54^{\text{b}}$	128.04	$1.16 \pm 0.22^{\text{a}}$	125.85	$4.12 \pm 0.76^{\text{a}}$	127.42	$2.57 \pm 0.04^{\text{a}}$	101.91
Aroclor 1254	5	$2.55 \pm 0.16^{\text{AB}}$	109.99	$0.99 \pm 0.07^{\text{AB}}$	107.18	$3.53 \pm 0.22^{\text{AB}}$	109.20	$2.59 \pm 0.03^{\text{B}}$	102.66
	10	$2.77 \pm 0.33^{\text{B}}$	119.39	$1.10 \pm 0.13^{\text{B}}$	119.56	$3.86 \pm 0.46^{\text{B}}$	119.44	$2.52 \pm 0.03^{\text{A}}$	99.88
	20	$2.35 \pm 0.02^{\text{A}}$	101.50	$0.91 \pm 0.01^{\text{A}}$	98.75	$3.26 \pm 0.03^{\text{A}}$	100.72	$2.59 \pm 0.00^{\text{B}}$	102.79

不同小写字母表示Aroclor 1242不同处理间差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示Aroclor 1254处理间差异显著($p < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant differences among different Aroclor 1242 treatments ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among different Aroclor 1254 treatments ($p < 0.05$).

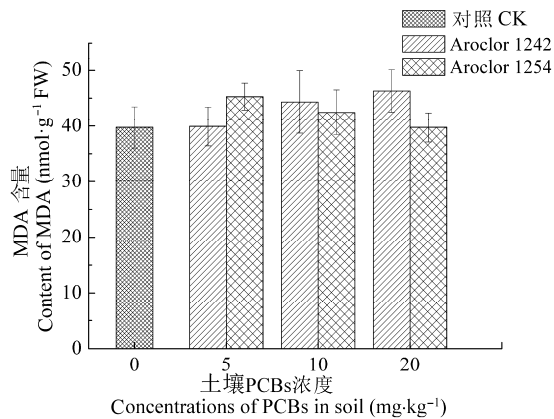


图4 多氯联苯(PCBs)污染对大金发藓丙二醛(MDA)含量的影响(平均值±标准偏差)。

Fig. 4 Effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination on the content of malondialdehyde (MDA) in *Polytichum commune* (mean ± SD).

量与对照的差异均达到显著性水平(图5B)。

3 讨论

低浓度污染物刺激植物生长, 而高浓度抑制植物生长并导致植物死亡, 是污染物作用于植物生长的一种普遍现象(Kauss & Hutchinson, 1975; Maliszewska-Kordybach & Smreczak, 2000; 刘亚云等, 2006, 2007a; 周启星等, 2004)。低浓度的PCBs刺激了维管植物秋茄树(*Kandelia candel*)和桐花树(*Aegiceras corniculatum*)的生长。而高浓度的PCBs会抑制植物生长(Chekol *et al.*, 2004; Zeeb *et al.*, 2006)。较高浓度的PCBs抑制高羊茅(*Festuca elata*)地上部分的鲜质量, 而对其根质量没有显著的影响

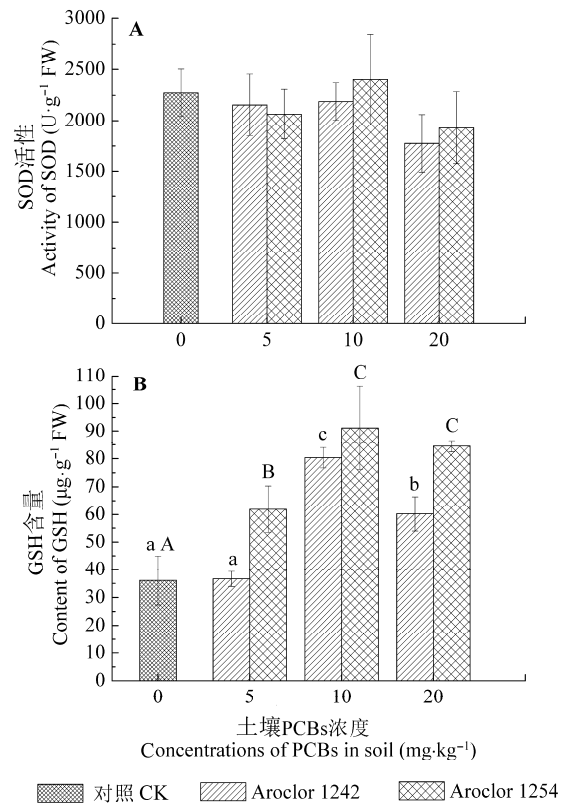


图5 多氯联苯(PCBs)污染对大金发藓超氧化物歧化酶(SOD)活性(A)和谷胱甘肽(GSH)含量(B)的影响(平均值±标准偏差)。不同小写字母表示Aroclor 1242不同处理间差异显著($p < 0.05$); 不同大写字母表示Aroclor 1254处理间差异显著($p < 0.05$)。

Fig. 5 Effects of polychlorinated biphenyls (PCBs) contamination on superoxide dismutase (SOD) activity (A) and glutathione (GSH) content (B) in *Polytichum commune* (mean ± SD). Different lowercase letters indicate significant differences among different Aroclor 1242 treatments ($p < 0.05$). Different capital letters indicate significant differences among different Aroclor 1254 treatments ($p < 0.05$).

(Weber & Mrozek, 1979)。PCBs污染导致豆科植物紫苜蓿根以及地上部干质量的减少(Chekol *et al.*, 2004)。Zeeb等(2006)的研究表明, Aroclor 1260浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时, *Cucurbita pepo* var. *Senator*的鲜质量较对照降低。本研究中, 无论是低氯PCBs (Aroclor 1242)还是高氯PCBs (Aroclor 1254)处理, 大金发藓鲜质量和株高均高于对照。PCBs对大金发藓生长的促进作用可能是因其具有与植物生长激素(如生长素和赤霉素)类似的环状结构, 起到了与生长激素相似的作用, 从而促进其生长。实验结果显示PCBs浓度达 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 仍没有抑制大金发藓生长, 可以推测大金发藓能耐受更高浓度的PCBs污染, 符合污染耐性种的生态特征。PCBs对大金发藓的促进作用, 除了与浓度有关, 还与其含氯的比例有关。低氯PCBs (Aroclor 1242)和高氯PCBs (Aroclor 1254)对大金发藓生长的影响不一样。总体上看, 大金发藓的株高和鲜质量随着低氯PCBs (Aroclor 1242)浓度的增加呈升高趋势, 在Aroclor 1242为 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大值。在所设浓度范围内, Aroclor 1242为 $20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时对大金发藓生长的促进作用最大。与低氯PCBs (Aroclor 1242)处理的情况不同, 大金发藓的株高和鲜质量随着高氯PCBs (Aroclor 1254)浓度的增加则呈下降趋势, 在Aroclor 1254为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时为最大值。在所设浓度范围内, 高氯的Aroclor 1254促进大金发藓生长的最佳浓度为 $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。可见, 大金发藓对低氯的Aroclor 1242的耐受浓度高于高氯的Aroclor 1254。

Chl是植物进行光合作用的主要色素, 具有捕获光能并驱动电子转移到反应中心的功能, 其含量的变化既可反映植物叶片光合作用能力的强弱, 也可以反映逆境胁迫下植物组织、器官的受损程度与衰老状况。Chl含量和Chl a/b值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。当植物受到污染胁迫时, 植物叶片中Chl含量一般会降低, 而Chl a/b值会升高或降低。不过, 对耐性较强的植物来说, Chl含量降低较缓慢, Chl a/b值的变化较平稳(Huang *et al.*, 2004)。周佳佳等(2013)就6种PCBs (0.05、0.1和 $0.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)对油菜(*Brassica campestris*) Chl含量的影响进行了研究, 结果表明: 油菜Chl含量受到PCBs的抑制, 导致其不能保持相对正常的光合色素水平, 耐受性较差; 不同种类PCBs对油菜Chl合成的抑制程度不同。刘亚云等

(2007b)的研究则表明, 秋茄树和桐花树对PCBs具有一定的耐性, 尽管PCBs (0.18、0.9、1.8和 $2.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)降低了秋茄树和桐花树的Chl含量, 但均高于对照的75%; Chl a/b值均有不同程度的升高, 但升高幅度均未超过对照组的15%。可见, 不同植物对PCBs的耐性是不同的。在本研究所设浓度范围内, 总体上看, 各浓度处理Chl a、Chl b和Chl a + b值均高于对照组, Chl a/b值的变化幅度较小, 仅为对照的-0.12%–2.79%之间。不论是低氯PCBs (Aroclor 1242), 还是高氯PCBs (Aroclor 1254), 均没有抑制大金发藓Chl的合成, 反而具有一定的促进作用。可见, 大金发藓在PCBs污染胁迫下仍保持相对正常的光合色素水平, 表明其对PCBs具有一定的污染耐性。也就是说, PCBs促进大金发藓Chl的合成, 在某种程度上可以解释PCBs处理大金发藓株高和鲜质量较对照组有所增加的现象。

MDA是膜脂过氧化的产物之一, 其含量往往能反映植物细胞膜过氧化的程度以及植物对逆境条件反应的强弱。在本研究所设的浓度范围内, PCBs处理大金发藓的MDA含量较对照有所升高, 但差异未达到显著水平, 表明大金发藓细胞膜可能受到了一定程度的损伤, 但膜脂过氧化程度不高, 细胞的受害程度较小。大金发藓MDA含量对低氯PCBs (Aroclor 1242)和高氯PCBs (Aroclor 1254)污染的响应不同。各种逆境胁迫会引起苔藓植物体内活性氧浓度的积累而导致氧化胁迫, 使苔藓植物组织受到伤害或加速苔藓植物的衰老。然而, 苔藓植物在长期的进化过程中, 形成了各种清除和降低活性氧的保护机制, 主要包括抗氧化酶系统(如SOD、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)等)和非酶抗氧化系统(如GSH等)两大系统。SOD是苔藓抗氧化系统中一种最重要的抗氧化酶, 可清除超氧阴离子自由基。无论是低氯PCBs处理, 还是高氯PCBs处理, 大金发藓的SOD活性增高或降低的幅度都比较小, 与对照相比差异不显著性。GSH是植物体内产生的主要内源性抗氧化剂, 能清除生物体内的自由基从而解除毒害。除了低氯PCBs (Aroclor 1242) $5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 处理外, Aroclor 1242其余浓度处理与高氯PCBs (Aroclor 1254)所有浓度处理的大金发藓GSH含量与对照的差异均达到显著性水平。可见, 大金发藓在PCBs引起的氧化胁迫应答过程中, 可能通过调动抗氧化物质GSH来清除活性氧和氧自由基, 减缓

和抵御细胞的伤害。

基金项目 国家自然科学基金委员会-广东省人民政府联合基金重点项目(U1133006)、国家自然科学基金面上项目(31170473)和国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA101403-2)。

参考文献

- Alkorta I, Garbisu C (2001). Phytoremediation of organic contaminants in soils. *Bioresource Technology*, 79, 273–276.
- Chekol T, Vough LR, Chaney RL (2004). Phytoremediation of polychlorinated biphenyl-contaminated soils: The rhizosphere effect. *Environment International*, 30, 799–804.
- Dalla Valle M, Jurado E, Dachs J, Sweetman AJ, Jones KC (2005). The maximum reservoir capacity of soils for persistent organic pollutants: Implications for global cycling. *Environmental Pollution*, 134, 153–164.
- Ding N, Hayat T, Wang J, Wang HZ, Liu XM, Xu JM (2011). Responses of microbial community in rhizosphere soils when ryegrass was subjected to stress from PCBs. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 1355–1362.
- Gao JF (2006). *Experimental Guidance for Plant Physiology*. Higher Education Press, Beijing. 210–211. (in Chinese) [高俊凤 (2006). 植物生理学实验指导. 高等教育出版社, 北京. 210–211.]
- Huang XD, El-Alawi Y, Penrose DM, Glick BR, Greenberg BM (2004). Responses of three grass species to creosote during phytoremediation. *Environmental Pollution*, 130, 453–463.
- Jia Y, Bai XL, Shan FB, Bai SW, Zhong HR (2012). Experiment of artificially culturing moss crust and its maintenance mechanism. *Journal of Desert Research*, 32, 54–59. (in Chinese with English abstract) [贾艳, 白学良, 单飞彪, 白少伟, 詹洪瑞 (2012). 藓类结皮层人工培养试验和维持机制研究. 中国沙漠, 32, 54–59.]
- Kauss PB, Hutchinson TC (1975). The effects of water-soluble petroleum components on the growth of *Chlorella vulgaris* Beijerinck. *Environmental Pollution*, 9, 157–174.
- Li Y, Liang F, Zhu YF, Wang FP (2013). Phytoremediation of a PCB-contaminated soil by alfalfa and tall fescue single and mixed plants cultivation. *Journal of Soils and Sediments*, 13, 925–931.
- Liu YY, Sun HB, Chen GZ (2006). Effects of polychlorinated biphenyls on the growth of mangrove species, *Aegiceras corniculatum*. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 45(9), 108–112. (in Chinese with English abstract) [刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠 (2006). 多氯联苯(PCBs)污染对桐花树幼苗生长的影响. 中山大学学报(自然科学版), 45(9), 108–112.]
- Liu YY, Sun HB, Chen GZ (2007a). Effects of PCBs on the growth of mangrove species, *Kandelia candel*. *Marine Environmental Science*, 26, 23–27. (in Chinese with English abstract) [刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠 (2007a). 多氯联苯(PCBs)污染对秋茄 *Kandelia candel* 生长的影响. 海洋环境科学, 26, 23–27.]
- Liu YY, Sun HB, Chen GZ, Zhao B, Li WY (2007b). Eco-physiological responses of *Kandelia candel* seedlings to polychlorinated biphenyls (PCBs) treatment. *Acta Ecologica Sinica*, 27, 746–754. (in Chinese with English abstract) [刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠, 赵波, 李伟煜 (2007b). 秋茄(*Kandelia candel*)幼苗对多氯联苯污染的生理生态响应. 生态学报, 27, 746–754.]
- Maliszewska-Kordybach B, Smreczak B (2000). Ecotoxicological activity of soils polluted with polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs)—Effect on plants. *Environmental Technology*, 21, 1099–1110.
- Ockenden WA, Breivik K, Meijer SN, Steinnes E, Sweetman AJ, Jones KC (2003). The global re-cycling of persistent organic pollutants is strongly retarded by soils. *Environmental Pollution*, 121, 75–80.
- Qin H, Brookes PC, Xu JM (2014). *Cucurbita* spp. and *Cucumis sativus* enhance the dissipation of polychlorinated biphenyl congeners by stimulating soil microbial community development. *Environmental Pollution*, 184, 306–312.
- Tian GQ, Bai XL, Xu J, Wang XD (2005). Experimental studies on natural regeneration and artificial cultures of moss crusts on fixed dunes in the Tengger Desert. *Acta Phytocologica Sinica*, 29, 164–169. (in Chinese with English abstract) [田桂泉, 白学良, 徐杰, 王先道 (2005). 腾格里沙漠固定沙丘藓类植物结皮层的自然恢复及人工培养试验研究. 植物生态学报, 29, 164–169.]
- Tu C, Teng Y, Luo YM, Sun XH, Deng SP, Li ZG, Liu WX, Xu ZH (2011). PCB removal, soil enzyme activities, and microbial community structures during the phytoremediation by alfalfa in field soils. *Journal of Soils and Sediments*, 11, 649–656.
- Weber JB, Mrozek E Jr (1979). Polychlorinated biphenyls: Phytotoxicity, absorption and translocation by plants, and inactivation by activated carbon. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 23, 412–417.
- Zeeb BA, Amphlett JS, Rutter A, Reimer KJ (2006). Potential for phytoremediation of polychlorinated biphenyl-(PCB)-contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 8, 199–221.
- Zhang XZ (1986). Plant chlorophyll content determination: Acetone ethanol mixture method. *Journal of Liaoning Agricultural Sciences*, (3), 26–28. (in Chinese) [张宪政 (1986). 植物叶绿素含量测定——丙酮乙醇混合液法. 辽宁农业科学, (3), 26–28.]
- Zhou JJ, Hu LL, Li M, Chen WF, Wang Y, Wang HC (2013). Effects of PCBs pollution on rape (*Brassica campestris*) growth and their accumulation in *Brassica campestris*.

- Journal of Agro-Environment Science*, 32, 1959–1964. (in Chinese with English abstract) [周佳佳, 胡林林, 李敏, 陈为峰, 王莹, 王海翠 (2013). 多氯联苯(PCBs)污染对油菜(*Brassica campestris*)生长的影响及积累效应研究. 农业环境科学学报, 32, 1959–1964.]
- Zhou QX, Cai Z, Zhang ZN, Liu WT (2011). Ecological remediation of hydrocarbon contaminated soils with weed plant. *Journal of Resources and Ecology*, 2, 97–105.
- Zhou QX, Diao CY, Sun YB, Zhou JL (2012). Tolerance, uptake and removal of nitrobenzene by a newly-found remediation species *Mirabilis jalapa* L. *Chemosphere*, 86, 994–1000.
- Zhou QX, Kong FX, Zhu L (2004). *Ecotoxicology*. Science Press, Beijing. (in Chinese) [周启星, 孔繁翔, 朱琳 (2004). 生态毒理学. 科学出版社, 北京.]
- Zhou QX, Luo Y (2011). *Pollution Eco-chemistry*. Science Press, Beijing. 30–35. (in Chinese) [周启星, 罗义 (2011). 污染生态化学. 科学出版社, 北京. 30–35.]
- Zhou QX, Wei SH, Diao CY (2007). Basic principles and researching progresses in ecological remediation of contaminated soils. *Journal of Agro-environment Science*, 26, 419–424. (in Chinese with English abstract) [周启星, 魏树和, 刁春燕 (2007). 污染土壤生态修复基本原理及研究进展. 农业环境科学学报, 26, 419–424.]

责任编辑: 陈保冬 责任编辑: 李 敏