

海桐(*Pittosporum tobira*)对污染土壤中镉的耐受和吸收特征

曹霞, 郭朝晖*, 肖细元, 刘亚男, 曾鹏

(中南大学冶金与环境学院环境工程研究所, 长沙 410083)

摘要:通过盆栽实验研究了海桐对土壤中镉(Cd)的耐受和吸收特征。动态取样研究表明,当土壤中Cd含量为 $9.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时可对海桐生长产生促进作用,当Cd含量为 $24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时对海桐产生抑制作用;海桐对污染土壤中Cd有一定吸收能力,吸收量随土壤中Cd含量增加而增加。培养154 d后,与对照处理(土壤Cd含量为 $3.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)相比,当土壤中Cd含量为 $9.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,海桐根、茎、叶干重,叶片中叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量及丙二醛含量没有明显变化;当Cd含量达到 $24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,海桐根、茎、叶干重分别降低了38.7%、5.2%和52.5%,叶片中叶绿素a、叶绿素b及类胡萝卜素含量分别是对照处理的71.3%、68.2%和75%,丙二醛含量为对照处理的1.52倍。研究表明,海桐可作为Cd污染土壤修复的备选植物,在修复土壤的同时改善环境景观。

关键词:镉;景观植物;海桐;丙二醛含量;植物修复

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2015)04-0627-06 doi:10.11654/jaes.2015.04.003

Cadmium Tolerance and Uptake Characteristics in *Pittosporum tobira* in Contaminated Soil

CAO Xia, GUO Zhao-hui*, XIAO Xi-yuan, LIU Ya-nan, ZENG Peng

(Institute of Environmental Engineering, School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the cadmium (Cd) tolerance and uptake characteristics of *Pittosporum tobira* grown in Cd contaminated soil. Results showed that the growth of *Pittosporum tobira* was enhanced at $9.6\text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil, but reduced at $24.6\text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil. *Pittosporum tobira* showed capacity to accumulate Cd, and the Cd content in *Pittosporum tobira* increased with soil Cd content. Compared with the control ($3.6\text{ mg Cd}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil), no significant differences were observed in root, stem and leaf dry biomass and chlorophyll a, chlorophyll b, carotenoid and malondialdehyde (MDA) contents of *Pittosporum tobira* grown in a soil with $9.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ for 154 days. However, in $24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ soil, root, stem and leaf dry biomass reduced by 38.7%, 5.2% and 52.5% over the control, respectively, and the contents of chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid in leaves were 71.3%, 68.2% and 75% of the control, whereas leaf MDA content was 152% of the control. This study suggests that *Pittosporum tobira* can be regarded as a candidate to remediate Cd contaminated soils while improving the scenes of contaminated environment.

Keywords: cadmium; ornamental plant; *Pittosporum tobira*; malondialdehyde content; phytoremediation

土壤中镉(Cd)主要来自于金属矿资源的采选冶炼活动,污水灌溉,过度使用杀虫剂、农药、化肥等^[1]。我国土壤中Cd等重金属污染突出,因而寻求一种环境友好且高效的调控土壤Cd污染的方法具有非常

重要的意义。目前,重金属污染土壤的修复方法主要有化学修复、物理修复和生物修复等。对于小范围的Cd污染土壤可通过化学或物理方法修复,但一般修复成本比较高,且易破坏土壤结构。相比化学和物理修复,生物修复尤其是植物修复是一种绿色、环境友好的修复方法^[2],具有修复成本低、简便易行、安全可靠等优点。近年来,植物修复研究主要集中在超富集植物的筛选上,目前已发现近400种超富集植物^[3],截止2010年,国内外发现的Cd超富集植物超过20

收稿日期:2014-11-11

基金项目:国家自然科学基金面上项目(41271330)

作者简介:曹霞(1988—),女,硕士研究生,主要从事重金属污染土壤修复研究。E-mail:2904579845@qq.com

*通信作者:郭朝晖 E-mail:zhguo@csu.edu.cn

种,包括印度芥菜(*Brassica juncea*)、天蓝遏兰菜(*Thlaspi caerulescens*)、东南景天(*Sedum alfredii*)^[4]、忍冬(*Lonicera japonica*)^[5]和滇苦菜(*Picris divaricata*)^[6]等。但这些Cd超富集植物生物量较小,生长周期较长,限制了其修复效率^[7]。一些速生、生物量大、观赏性耐性植物开始进入修复植物范畴。如向日葵(*Helianthus annuus*)能够在添加KCl的Cd、Pb污染土壤中正常生长^[8];万寿菊(*Tagetes patula*)可用于修复苯并(a)芘和Cd复合污染土壤^[9];含羞草(*Mimosa pudica*)、白雪姬(*Tradescantia sillamontana*)和树马齿苋(*Portulaca afra*)对Cd均具有较强累积能力,在Cd污染土壤治理中有一定的应用价值^[10]。选用合适的观赏性园林景观植物进行重金属污染土壤修复,不仅能达到修复目的,还可以美化环境。

海桐(*Pittosporum tobira*)为海桐花科海桐花属植物,常绿灌木或小乔木,主要分布于福建、广东、广西、贵州等地。海桐多为园林、行道栽培植物,有研究表明,交通环境下海桐对Ag、Cd、Rb和Sc等有较强的累积特性^[11],其叶片中Cd和Pb的沉积量随交通密度降低而显著降低^[12]。海桐对污泥堆肥土中Cd、Pb的富集能力很弱^[13],而对城市环境中Cd或Pb的吸收累积能力较强^[14]。海桐对Cd的耐受与累积程度如何,是否适用于修复Cd污染土壤,目前还没有系统的研究报告。本文通过室内培养试验,研究海桐对污染土壤中Cd的耐受与吸收特征,探讨其在Cd污染土壤中的应用潜力,以期选用海桐等景观植物修复重金属污染土壤提供科学依据,同时获得较好的生态和景观效应。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物

供试土壤取自湖南衡阳某典型矿冶区周边表层土壤(0~20 cm),将收集的土壤经自然风干后过5 mm筛,从中取小部分土壤过0.85 mm和0.15 mm筛,分析土壤基本理化性质和土壤中Cd含量。供试土壤pH值为7.76,土壤有机质含量为5.05 g·kg⁻¹,速效氮、速效磷和速效钾含量分别为5.60、9.80和15.20 mg·kg⁻¹,Cd含量为3.60 mg·kg⁻¹。供试植物海桐幼苗采自湖南省长沙市一苗木基地,为两年生种苗,株高10 cm左右,海桐幼苗中Cd含量为1.03 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

将供试土壤样品充分混合后装入下口直径为13 cm、上口直径为18 cm、高为17 cm的塑料盆中,每盆

装土3.5 kg。参照我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)和《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350—2007),以Cd(NO₃)₂·4H₂O作为外源Cd,向供试土壤中分别添加0(对照,CK)、6 mg·kg⁻¹(T1)和21 mg·kg⁻¹(T2)的Cd,形成Cd污染土壤系列,每个处理重复4次。保持土壤湿度为田间持水量的70%,平衡15 d后移栽海桐幼苗,每盆移栽大小基本一致的幼苗4株,于2013年7月至2014年2月在温室内进行培养。试验期间,每天光照周期10 h,温室内昼夜温度30℃/20℃。分别在培养56、105、154 d和203 d后进行第1、2、3和4次取样。将每次收获的海桐植株按根、茎、叶分开,依次用自来水和蒸馏水清洗干净后,105℃杀青30 min后在60℃下烘干至恒重。植物样品称重,粉碎备用。

1.3 测试与分析

从每次收集的海桐样品中取少量新鲜叶片测定其光合色素和丙二醛(MDA)含量。叶片中光合色素含量的测定^[15]:取0.2 g海桐叶片,用不锈钢剪刀剪碎后放入研钵中,加2~3 mL质量分数为95%的乙醇,以SiO₂和CaCO₃为助磨剂研磨,研成匀浆后,再加10 mL 95%的乙醇,继续研磨至组织变白。静置3~5 min,过滤定容至25 mL棕色容量瓶,于665 nm、649 nm和470 nm处测定其吸光度,分别计算叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量。MDA含量的测定^[16]:取0.5 g海桐叶片,用不锈钢剪刀剪碎后放入研钵中,加入5 mL质量分数为5%的三氯乙酸进行研磨,研磨后所得匀浆液在3000 r·min⁻¹下离心10 min。取2 mL上清液与2 mL质量分数为0.67%的硫代巴比妥酸,在100℃水浴上煮沸30 min,冷却再离心一次。取上清液于450、532 nm和600 nm处测定吸光度,计算MDA含量。

土壤基本理化性质的测定参照鲁如坤^[17]的方法:土壤pH值按水土比2.5:1, Mettler Toledo 420 pH计测定;有机质含量采用外加热-K₂Cr₂O₇容量法;土壤中速效氮含量采用碱解扩散-H₂SO₄中和滴定法测定;速效磷含量采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼钼黄比色法测定;速效钾含量采用1.0 mol·L⁻¹ NH₄OAc浸提-火焰光度法测定。供试土壤样品采用HNO₃-HCl-H₂O₂(MDS-8G型多通量密闭微波消解仪)消解;海桐根、茎、叶样品采用HNO₃-HClO₄法消解(体积比为3:1)^[18],消解液中Cd含量采用原子吸收分光光度法(AA-6800,岛津公司)测定。所用试剂均为分析纯或优级纯。分析过程中加入土壤标准物质

(GBW08303)和植物标准物质(GBW07603)进行质量控制。海桐植株中 Cd 的富集系数^[19]和转运系数^[20]按照如下公式计算:

$$\text{富集系数 BC} = \frac{\text{植株地上部分或根部Cd含量}}{\text{土壤中Cd含量}}$$

$$\text{转运系数 TF} = \frac{\text{植株地上部分Cd含量}}{\text{根部Cd含量}}$$

1.4 数据分析

数据分析采用 Excel 2007 软件。显著性检验分析采用 SPSS 13.0 统计软件,利用单因素方差分析(One-way ANOVA)不同处理之间的差异, $P < 0.05$ 为显著性水平。

2 结果与讨论

2.1 不同 Cd 浓度处理下海桐生物量

土壤 Cd 含量对海桐生长影响明显。从图 1 可看出,海桐对土壤 Cd 污染有一个适应过程。培养 56 d 和 105 d 后, T1 和 T2 处理下海桐生物量均低于对照处理; 随培养时间增加, 154 d 后海桐的生长发生明显变化, T1 处理下海桐生物量略高于对照处理, 显著高于 T2 处理, 表明土壤中较低含量 Cd ($9.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对海桐的生长具有一定的促进作用。203 d 后, 土壤 T2 处理下海桐生物量有所减少, 表明土壤中较高含量 Cd ($24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对海桐产生了一定的毒害和生长抑制效应。

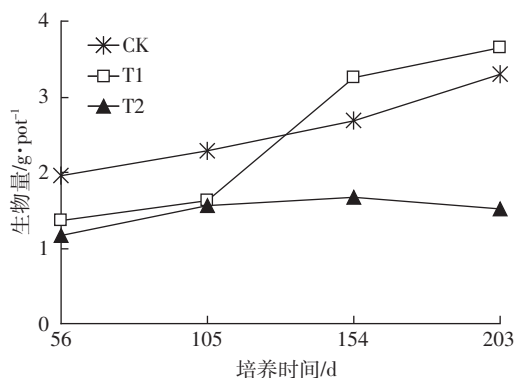
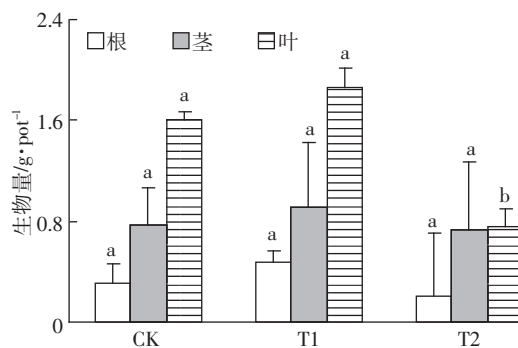


图 1 不同 Cd 处理对海桐整株生物量的影响

Figure 1 Effect of soil Cd on total dry biomass of *Pittosporum tobira*

对培养 154 d 收集的海桐样品根、茎、叶含量进行统计分析, 从图 2 可看出, T1 处理下海桐根、茎、叶干重与对照相比分别增加 55%、18% 和 16%, T2 处理下根、茎、叶干重较对照处理分别降低 38.7%、5.2% 和 52.5%。T1 处理下海桐根、茎、叶干重与 CK 相比无显著性差异 ($P > 0.05$)。T2 处理下海桐叶片干重与 CK 处

理有显著差异 ($P < 0.05$)。上述结果表明, 土壤中较低 Cd 含量能促进海桐植株生长, 而较高 Cd 含量却有明显的抑制作用, 这与 Yu 等^[21]的研究结果相一致。但从海桐的生长特征来看, 海桐在较高 Cd 含量处理下仍能保持正常生长, 说明其对土壤中 Cd 具有较强耐受能力。



不同小写字母代表不同处理组差异性显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters mean significant difference between treatments at 0.05 level

图 2 培养 154 d 后不同 Cd 处理对海桐根、茎、叶生物量的影响

Figure 2 Effects of soil Cd on root, stem and leaf dry biomass of *Pittosporum tobira* after 154-day of Cd treatments

2.2 海桐叶片中光合色素和丙二醛含量

植物叶片中光合色素在光能的吸收、传递和转换中起着重要作用, 而植物光合作用对重金属胁迫非常敏感^[22]。从图 3 可看出, 在 56 d 时, 海桐处于生长适应期, 其叶片中的叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量高低顺序为 $T2 > CK > T1$, 随着培养时间的增加, CK 和 T1 处理下海桐叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 含量呈增加趋势, 而类胡萝卜素含量没有明显变化。说明 Cd 对海桐的毒害是一个长期累积的过程, 较短时间的 Cd 胁迫不足以影响叶片中叶绿素生物合成的相关酶活性。培养 154 d 后, T1 处理下海桐叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量与 CK 处理相近, 表明 T1 处理下 Cd 含量在海桐的耐受阈值范围内, 海桐可通过调节自身的生理代谢来缓解 Cd 毒害。T2 处理下海桐的叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量随着培养时间的增加呈明显降低趋势, 培养 154 d 后 T2 处理下海桐叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量分别是 CK 处理下的 71.3%、68.2%、75%, 与培养 56 d 后取样相比, T2 处理下叶片的叶绿素 (叶绿素 a + 叶绿素 b) 含量降低了 54.78%, 说明较高 Cd 处理条件下长时间的胁迫对海桐光合作用产生了一定的抑制作用, 这

与其生物量减少的结果相一致。有研究表明,Cd 可与叶绿体中蛋白质上的-SH 等结合或取代其中的 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Mg^{2+} 等元素,破坏叶绿素体结构和功能活性^[23]。但总的来看,海桐在较高含量 Cd 胁迫下也能保持正常的生理活动,对污染土壤中 Cd 仍具有较强的忍耐能力。

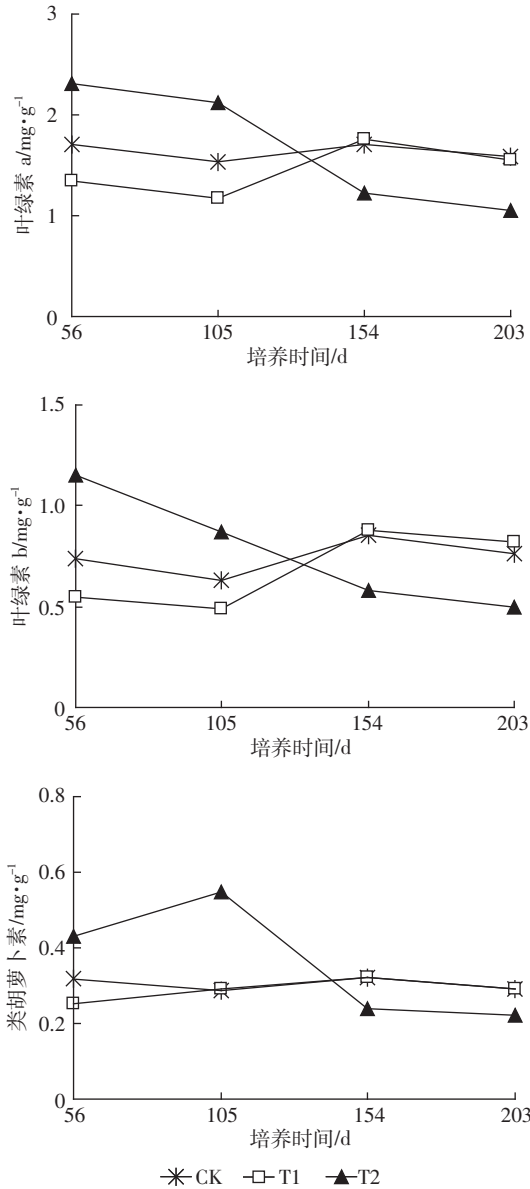


图3 不同 Cd 处理对海桐叶片中光合色素含量的影响

Figure 3 Effect of soil Cd on photosynthetic pigment content in *Pittosporum tobira* leaves

一般来说,植物细胞膜被认为是受重金属伤害的基本位点,MDA 是膜质氧化的产物,其含量可反应膜质过氧化、植物衰老或遭受逆境伤害程度^[24]。从图 4 可看出,培养 56 d 和 105 d 后,CK 处理下海桐叶片中 MDA 含量高于 T1 和 T2 处理;但随着培养时间增加,

154 d 后,T1 和 T2 处理下海桐叶片中 MDA 含量与 CK 处理相当,随着培养时间的进一步延长,203 d 后 T2 处理下海桐叶片中 MDA 含量已经明显高于 CK 和 T1 处理,T2 处理下海桐叶片中 MDA 含量较对照处理增加了 52%。从 MDA 含量变化过程也可以看出,Cd 对海桐的毒害是一个长期作用的结果,土壤中 Cd 含量达到 $24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,Cd 对海桐产生了一定的毒害作用。有研究表明,Cd 胁迫可诱导植物产生大量的 ROS(O_2^- , OH^- 和 H_2O_2),导致膜质过氧化,从而使膜系统结构功能遭受破坏,减少细胞膜的选择透过性^[25]。其原因可能是在 Cd 长时间胁迫下,植物能通过提高细胞抗氧化防御系统忍受由少量 Cd 诱导产生的活性氧自由基的伤害,而较高含量 Cd 长时间作用则会破坏植物抗氧化防御系统,迅速降低植物体内相关抗氧化酶活性,进而导致细胞死亡^[26]。本研究结果表明,T2 处理下较高 Cd 含量诱导海桐叶片产生较高含量 MDA,对海桐的生理产生了一定的毒害作用。

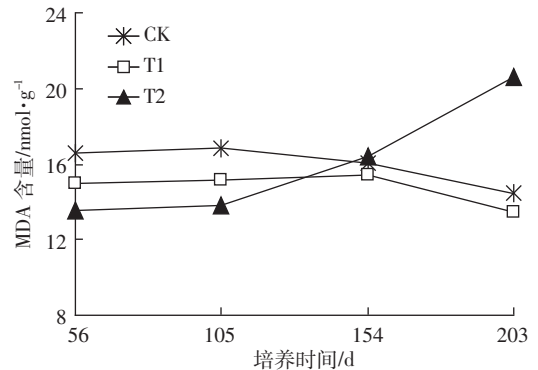


图4 不同 Cd 处理对海桐叶片中丙二醛含量的影响

Figure 4 Effect of soil Cd on malondialdehyde content in *Pittosporum tobira* leaves

2.3 海桐体内 Cd 的累积与分布特征

海桐对污染土壤中 Cd 具有一定的吸收和累积能力。海桐根、茎、叶中 Cd 吸收和累积量随培养时间和污染土壤 Cd 含量增加而逐渐增加(图 5)。培养 56 d 后,不同 Cd 处理下海桐根、茎、叶中 Cd 含量没有明显区别;培养 105 d 后,其根部 Cd 含量明显大于茎、叶中 Cd 含量,T2 处理下的结果尤为明显,这说明海桐对 Cd 胁迫有一个适应期。有研究表明,植物积累 Cd^{2+} 的机理主要通过细胞壁结合、与有机化合物形成金属螯合物及区室化分布等途径进行解毒^[27]。随着培养时间进一步增加,154 d 后,海桐对土壤 Cd 的吸收和累积发生了明显变化,T2 处理下海桐根、茎、叶中 Cd 含量分别为 21.2 、 26.1 、 $26.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其茎、叶中

Cd 含量高于根部 Cd 含量;204 d 后,Cd 含量在海桐根、茎、叶中的分布特征与培养 154 d 时相一致。研究表明,植物根部吸收的 Cd 可通过木质部维管束逐渐向地上部转移,之后主要沉积于液泡中^[28];但也有研究表明,到达地上部分的 Cd 与细胞壁中纤维素和木质素结合,从而大部分沉积于细胞壁中^[29]。但海桐对 Cd 的吸收和累积机制尚未清楚,有待进一步研究。

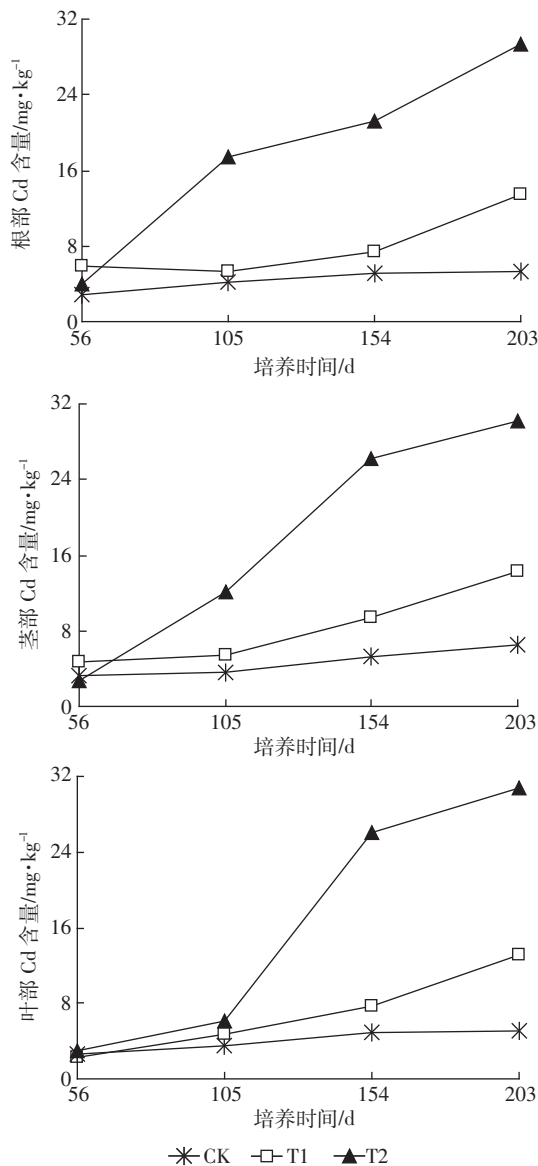


图 5 不同 Cd 处理下海桐根、茎、叶中 Cd 含量

Figure 5 Contents of Cd in roots, stems and leaves of *Pittosporum tobira* grown in Cd contaminated soil

重金属在植物体内的吸收分布特征是选择耐性物种的重要指标。从表 1 可发现,不同 Cd 处理下海桐植株对 Cd 的富集系数随着培养时间的增加而增加,且 T1 和 T2 处理下的富集系数较 CK 小。在整个

培养期间,海桐体内的转运系数都能保持在一个较高水平,尤其在培养后期(154 d 后)转运系数都在 1.0 左右,这表明海桐能有效地将吸收的 Cd 运输到地上部,海桐体内可能存在较好的运输和解毒机制以应对重金属 Cd 的胁迫。

表 1 Cd 在海桐体内的富集系数(BC)和转运系数(TF)

培养时间/d Culture day	处理 Treatment	BC		TF
		根 Roots	茎叶 Stems and leaves	
56	CK	0.80	0.80	1.00
	T1	0.60	0.37	0.61
	T2	0.16	0.11	0.70
105	CK	1.16	1.00	0.86
	T1	0.55	0.53	0.96
	T2	0.42	0.71	0.53
154	CK	1.41	1.37	0.96
	T1	0.77	0.91	1.21
	T2	0.94	1.12	1.20
203	CK	1.48	1.60	1.08
	T1	1.41	1.42	1.01
	T2	1.20	1.24	1.04

3 结论

(1)污染土壤中 Cd 对海桐生长影响明显。土壤中 Cd 含量为 $9.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,与对照处理(土壤中 Cd 含量为 $3.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)相比,海桐生物量、叶片中叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量和丙二醛含量没有发生明显变化。当土壤中 Cd 含量为 $24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,海桐的生物量、叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量均明显下降,丙二醛含量明显增加。但海桐在较高含量 Cd 处理下都能正常生长,说明海桐对污染土壤中 Cd 有一定的耐受能力。

(2)海桐对土壤中 Cd 有一定的累积和转运能力。海桐植株中 Cd 含量随土壤 Cd 含量的增加而增加。在培养前期,海桐吸收的 Cd 主要累积在根部,随着培养时间的延长,海桐体内 Cd 逐渐向地上部转移,154 d 时,Cd 在海桐体内的分布特征为茎 $\approx$ 叶 $>$ 根。

参考文献:

- [1] Ha H, Olson J R, Bian L, et al. Analysis of heavy metal sources in soil using kriging interpolation on principal components[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(9):4999-5007.
- [2] Chen Y, Shen Z, Li X. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in

- the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(10):1553–1565.
- [3] Sun Y, Zhou Q, Wang L, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2–3):808–814.
- [4] Padmavathiamma P K, Li L Y. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 184(1–4):105–126.
- [5] Liu Z, He X, Chen W, et al. Accumulation and tolerance characteristics of cadmium in a potential hyperaccumulator: *Lonicera japonica* Thunb[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1–3):170–175.
- [6] Tang Y. Zn and Cd hyperaccumulating characteristics of *Picris divaricata* Vant.[J]. *International Journal of Environment and Pollution*, 2009, 31(1–2):26–38.
- [7] Smits E, Freeman J. Environmental cleanup using plants: biotechnological advances and ecological considerations[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(4):203–210.
- [8] Hao X, Zhou D, Li D, et al. Growth, cadmium and zinc accumulation of ornamental sunflower(*Helianthus annuus* L.) in contaminated soil with different amendments[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(5):631–639.
- [9] Sun Y, Zhou Q, Xu Y, et al. Phytoremediation for co-contaminated soils of benzo[a]pyrene(B[a]P) and heavy metals using ornamental plant *Tagetes patula*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186(2–3):2075–2082.
- [10] 燕傲蕾, 吴亭亭, 王友保, 等. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性[J]. *生态学报*, 2010(9):2491–2498.
YAN Ao-lei, WU Ting-ting, WANG You-bao, et al. The characteristics of cadmium to tolerance and accumulation in three kinds of ornamental plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010(9):2491–2498.
- [11] Rucandio M I, Petit-Domínguez M D, Fidalgo-Hijano C, et al. Biomonitoring of chemical elements in an urban environment using arboreal and bush plant species[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2011, 18(1):51–63.
- [12] Palmieri R M, La Pera L, Di Bella G. Simultaneous determination of Cd(II), Cu(II), Pb(II) and Zn(II) by derivative stripping chronopotentiometry in *Pitiosporum tobira* leaves: A measurement of local atmospheric pollution in Messina (Sicily, Italy)[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(8):1161–1168.
- [13] 刘忠良, 田晓军, 龚萍, 等. 污泥堆肥农中重金属在海桐中的积累效应[J]. *广东微量元素科学*, 2009, 16(9):34–38.
LIU Zhong-liang, TIAN Xiao-jun, Gong Ping et al. Adsorption of heavy metals by *Pitiosporum tobira* from mixed soils containing composted sewage sludge[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 2009, 16(9):34–38.
- [14] 汪有良. 园林灌木对城市环境中镉和铅吸收积累作用研究[J]. *北方园艺*, 2010(10):103–106.
WANG You-liang. Study on the absorption and accumulation of garden shrubs to cadmium and lead in urban environment[J]. *Northern Horticulture*, 2010(10):103–106.
- [15] Mobin M, Khan N A. Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard(*Brassica juncea*) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(5):601–610.
- [16] 张志良, 胡伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004:274–277.
ZHANG Zhi-liang, HU Wei-jing. Laboratory guide of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2004:274–277.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999:150–194.
LU Ru-kun. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999:150–194.
- [18] Sun Y, Zhou Q, Diao C. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(5):1103–1110.
- [19] Tanhan P, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, et al. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.) King & Robinson][J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2):323–329.
- [20] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (*Brassicaceae*) [J]. *New Phytologist*, 1994, 127(1):61–68.
- [21] Yu Z, Zhou Q. Growth responses and cadmium accumulation of *Mirabilis jalapa* L. under interaction between cadmium and phosphorus [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 167(1–3):38–43.
- [22] Ekmekçi Y, Tanyolaç D, Ayhan B. Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2008, 165(6):600–611.
- [23] Sun S C, Wang H X, Li Q R. Preliminary studies on physiological changes and injury mechanism in aquatic vascular plants treated with cadmium[J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 1985, 11(2):113–121.
- [24] Çelekli A, Kapı M, Bozkurt H. Effect of cadmium on biomass, pigmentation, malondialdehyde, and proline of *scenedesmus quadricauda* var. *logician* [J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2013, 91(5):571–576.
- [25] Yan C G, Hong Y T, Fu S Z. Effect of Cd, Pb stress on scavenging system of activated oxygen in leaves of tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5):488–492.
- [26] Soudek P, Petrová Š, Vaňková R, et al. Accumulation of heavy metals using *Sorghum* sp.[J]. *Chemosphere*, 2014, 104(2):15–24.
- [27] 仇硕, 张敏, 孙延东, 等. 植物重金属镉(Cd²⁺)吸收、运输、积累及耐性机理研究进展[J]. *西北植物学报*, 2006(12):2615–2622.
QIU Shuo, ZHANG Min, SUN Yan-dong, et al. Research advances in the mechanisms of Cd²⁺ uptake, transport, accumulation and tolerance in plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006(12):2615–2622.
- [28] Jabeen R, Ahmad A, Iqbal M. Phytoremediation of heavy metals: Physiological and molecular mechanisms[J]. *The Botanical Review*, 2009, 75(4):339–364.
- [29] Nishizono H, Ichikawa H, Suzuki S, et al. The role of the root cell wall in the heavy metal tolerance of *Athyrium yokoscense* [J]. *Plant and Soil*, 1987, 101(1):15–20.