

沙文沛,杜瑞卿,杨建伟,等. 铅胁迫下香樟幼苗生理生长的变化及对铅的富集特征[J]. 江苏农业科学,2015,43(10):242-244.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2015.10.080

# 铅胁迫下香樟幼苗生理生长的变化及对铅的富集特征

沙文沛,杜瑞卿,杨建伟,张征田,梁咪咪

(南阳师范学院生命科学与技术学院,河南南阳 473061)

**摘要:**选取香樟幼苗为试验对象,在土壤中添加 5 个不同浓度的铅(Pb)进行盆栽,测量了香樟幼苗生物量等 8 个生理生长指标。结果表明,随着土壤 Pb 浓度的升高,香樟幼苗生物量、株高、叶绿素含量、净光合速率随之降低,SOD、POD、CAT、MDA 随之升高。土壤 Pb 浓度与香樟幼苗生长生理指标间存在极显著的回归关系。根是香樟幼苗对铅最主要的分布部位。土壤中 Pb 浓度为 1 045 mg/kg 是重要的临界值,当土壤 Pb 浓度高于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗不能正常生长,不能保持最高的转移系数,不能最有效改良土壤。

**关键词:**铅(Pb);香樟幼苗;土壤污染;生长指标;生理指标;富集特征

**中图分类号:** Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2015)10-0242-03

随着工农业生产的发展,铅(Pb)污染日益严重,铅通过食物链对人类生命健康造成极大伤害。铅污染土壤的治理和修复成为当前亟需解决的问题。传统的铅污染治理成本高,不但影响土壤结构,而且治理面积小,不能从根本上解决问题。利用植物对铅的吸收富集能力进行铅污染治理的植物修复技术成本低、对环境破坏小、能够进行大面积推广,具有广阔的应用前景<sup>[1-3]</sup>。采用超富集植物对重金属污染土壤进行修复,由于生物量低、生长缓慢、易受杂草竞争性威胁等原因导致实际应用受到限制<sup>[4-5]</sup>。国内外相继开展了木本植物修复重金属污染土壤研究,木本植物修复重金属污染土壤具有生物量大,生长周期长,根系、茎、枝、叶面积较大,吸收积累重金属能力强,不参与食物链循环等优点<sup>[6-8]</sup>。香樟(*Cinnamomum camphora* L.)属樟科樟属常绿木本植物,是我国重要的材用和特种经济树种,具有重要的生态价值、经济价值,也是各地园林栽培中应用极为普遍的绿化树种之一,在少数地区用于尾矿的植被恢复。本试验利用香樟作为植物修复的备选植物,初步研究土壤中添加不同含量 Pb 对香樟幼苗生理生长的影响以及 Pb 在香樟幼苗体内的富集分布规律,旨在为利用木本植物进行环境修复提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

2014 年 4 月上旬取南阳师范学院校园花房温室室内 20 cm 高、长势一致的 5 月龄香樟幼苗作为材料,用自来水、纯水多次冲洗幼苗。Pb 胁迫处理:在高约 50 cm、直径 30 cm 的塑料桶中装 10 kg 干土(黄棕壤土,pH 值为 6.5,Pb 本底含量为 45 mg/kg,取自河南省南阳市郊区农田土壤),根据干土质量

及 GB 15618—2008《土壤环境质量标准》,结合当地重金属高度污染区的实际情况<sup>[9]</sup>,按照大跨度、多梯度、高污染的原则,向土壤中添加纯  $Pb^{2+}$  [用  $Pb(CH_3COOH)_2 \cdot 3H_2O$  配制,AR],在包含土壤本底 Pb 含量的基础上,分别设置:45(1 组,对照组)、545(2 组)、1 045(3 组)、2 045(4 组)、3 045 mg/kg(5 组)5 个 Pb 胁迫处理,平衡 1 周。将香樟幼苗栽植于 5 个 Pb 浓度处理土壤中,每桶 5 株,待植株成活后每桶保留 3 株并移出室外(其余幼苗回埋桶内土壤中)。将试验桶放置于南阳师范学院花房内。晴天接受自然光照,雨天于遮雨棚内避雨,每周补充 1 次纯水,确保土壤湿度基本保持在适宜水分条件下,每处理重复 3 次。50 d 后测定香樟幼苗各项生理指标。9 月下旬起苗,测定各处理下香樟生物量以及根、茎、叶各部位 Pb 含量。

### 1.2 测定指标及方法

于当年 9 月下旬起苗,分别用自来水冲洗根、茎、叶,再用蒸馏水冲洗 3 遍,沥去水分,120 ℃下烘至恒质量,各部分干质量之和即为单株生物量,求平均值。香樟幼苗植株起苗后,立即用直尺测量植株高度,求平均值。采用浸提法<sup>[10]</sup>测定叶绿素含量。采用 TPS-1 便携式光合仪(英国 PP Systems 公司)测定净光合速率( $P_n$ ):幼苗在 Pb 污染土壤中生长 50 d 后,于每天 10:00 左右测定中上部未受害正常叶片的  $P_n$ ,连续测定 3 d,每处理重复测定 5 张叶片,求平均值。幼苗在 Pb 污染土壤中生长 50 d 后采集叶片,测定各项生理指标:采用高锰酸滴定法测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性;采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定丙二醛(MDA)含量<sup>[10-11]</sup>。起苗后分别用自来水冲洗香樟根、茎、叶,再用蒸馏水冲洗 3 遍,沥去水分,120 ℃下烘至恒质量。将烘干后的植物磨碎,过筛(筛孔直径为 1.4 mm),每种样品称取 0.2 g,加  $HNO_3-H_2O_2$ (4:1)消化、定容、保存,用 AAS-400 型原子吸收分光光度计测定样品中 Pb 含量。

### 1.3 统计处理

对不同组别不同指标进行方差分析。根据方差分析结

收稿日期:2014-10-22

基金项目:国家自然科学基金(编号:31100511)。

作者简介:沙文沛(1990—),女,河南南阳人,硕士研究生,主要从事植物生理生态学教学与研究工作。E-mail:821889512@qq.com。

通信作者:杨建伟,教授,主要从事植物生理生态学研究。E-mail:1994226615@qq.com。

果,将 5 个试验组分为三大污染类别:无污染、轻度污染、重度污染,按照香樟幼苗生长生理指标进行判别分析。分析土壤 Pb 浓度与香樟幼苗生长生理指标间的函数关系。转移系数(*TF*)计算公式如下:

$$TF = G_p / C_s。$$

式中:*G<sub>p</sub>* 表示植物中 Pb 含量,mg/kg;*C<sub>s</sub>* 表示土壤中 Pb 含量,mg/kg。

2 结果与分析

2.1 铅胁迫对香樟幼苗生长指标的影响

表 1 表明,随着土壤 Pb 浓度的升高,香樟幼苗生物量、株高呈下降趋势,香樟幼苗生长状况恶化,当土壤 Pb 浓度大于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗生物量、株高显著下降。与对照组相比,当 Pb 含量为 2 045、3 045 mg/kg 时,植株高度分别下降了 23.0%、37.9%,生物量分别下降了 31.4%、52.6%。方差分析表明,各组香樟幼苗生物量、株高均与对照差异显著。

表 1 不同 Pb 浓度下香樟幼苗生长指标

Pb 浓度 (mg/kg)	生物量 (g)	株高 (cm)	香樟幼苗 生长状况
45 (CK)	9.43 ± 0.77a	78.33 ± 1.25a	绿色枝条粗壮、长势良好
545	9.42 ± 0.12b	74.67 ± 1.25b	绿色枝条粗壮、长势良好
1 045	6.83 ± 0.68c	69.33 ± 2.05c	绿色枝条较瘦弱、长势一般
2 045	6.47 ± 0.30c	60.33 ± 2.05d	绿色枝条较瘦弱、长势较差
3 045	4.47 ± 0.25d	48.67 ± 2.49e	绿色枝条较瘦弱、长势很差

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著(*P* < 0.05)。下表同。

2.2 Pb 胁迫对香樟幼苗生理活动的影响

表 2 表明,随着 Pb 浓度的升高,香樟幼苗的光合速率、叶绿素含量均呈下降趋势,当 Pb 浓度大于 1 045 mg/kg 时,香

表 2 不同 Pb 浓度对香樟幼苗生理指标的影响

Pb 浓度 (mg/kg)	叶绿素总量 (mg/g)	<i>P<sub>n</sub></i> [μmol/(m <sup>2</sup> · s)]	SOD 活性 (U/g)	POD 活性 [U/(g · min)]	CAT 活性 [mg/(g · min)]	MDA 含量 (μmol/g)
45 (CK)	1.47 ± 0.06a	15.61 ± 0.45a	276.36 ± 43.49a	116.15 ± 6.50a	11.53 ± 0.45a	0.85 ± 0.06a
545	1.37 ± 0.07a	13.38 ± 0.67b	628.23 ± 36.85b	209.53 ± 2.96b	41.99 ± 6.61a	0.89 ± 0.04a
1 045	1.19 ± 0.08b	11.55 ± 0.49c	929.97 ± 57.54c	549.90 ± 28.08c	386.06 ± 62.56b	1.11 ± 0.07b
2 045	1.04 ± 0.06c	10.24 ± 0.27c	1137.09 ± 52.80d	583.27 ± 21.76cd	481.88 ± 46.94c	1.20 ± 0.13b
3 045	0.94 ± 0.05c	7.81 ± 0.46d	1019.90 ± 4.67c	629.52 ± 64.74d	646.88 ± 21.45d	1.89 ± 0.07c

表 3 土壤 Pb 浓度(*X*)与香樟幼苗生长生理指标(*Y*)间的回归方程

指标	回归方程	回归方程显著性	回归系数显著性
生物量( <i>Y</i> <sub>1</sub> )	<i>Y</i> <sub>1</sub> = 9.575 - 0.002 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	均显著
株高( <i>Y</i> <sub>2</sub> )	<i>Y</i> <sub>2</sub> = 79.578 - 0.01 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	均显著
叶绿素含量( <i>Y</i> <sub>3</sub> )	<i>Y</i> <sub>3</sub> = 1.444 - 0.000 1 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	均显著
<i>P<sub>n</sub></i> ( <i>Y</i> <sub>4</sub> )	<i>Y</i> <sub>4</sub> = 14.966 - 0.002 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	均显著
SOD( <i>Y</i> <sub>5</sub> )	<i>Y</i> <sub>5</sub> = 476.219 + 0.239 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	均显著
POD( <i>Y</i> <sub>6</sub> )	<i>Y</i> <sub>6</sub> = 186.965 + 0.172 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	均显著
CAT( <i>Y</i> <sub>7</sub> )	<i>Y</i> <sub>7</sub> = 18.552 + 0.219 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	常数项不显著, <i>X</i> 系数显著
MDA( <i>Y</i> <sub>8</sub> )	<i>Y</i> <sub>8</sub> = 0.746 + 0.000 1 <i>X</i>	<i>P</i> < 0.000 1	均显著

2.5 Pb 在香樟幼苗体内的富集特征

从表 4 可以看出,随着土壤 Pb 浓度的升高,香樟幼苗的根、茎、叶对 Pb 的吸收量也随之升高。不论在何种 Pb 浓度下,根对 Pb 的吸收量均远高于茎、叶对 Pb 的吸收量,根是 Pb

樟幼苗的光合速率、叶绿素含量均显著低于对照。当 Pb 浓度为 3 045 mg/kg 时,香樟幼苗的光合速率与对照相比下降了 49.97%,叶绿素总量下降了 36.05%。当 Pb 浓度大于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗的生存已受到严重影响。保护酶 SOD、POD、CAT 活性与植物的抗性强弱密切相关。随着 Pb 浓度的升高,香樟幼苗体内保护酶 SOD、POD、CAT 活性呈上升趋势,当 Pb 浓度为 2 045 mg/kg 时,SOD 活性达到最高。香樟幼苗体内 POD、CAT 活性随着 Pb 浓度升高持续升高,当 Pb 浓度为 3 045 mg/kg 时,POD、CAT 活性达到最高。随着 Pb 浓度升高,香樟幼苗体内 MDA 含量急剧上升,当 Pb 浓度为 3 045 mg/kg 时,MDA 含量是对照组的 2.2 倍,表明细胞膜系统可能受到了伤害。当土壤 Pb 浓度低于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗对于外来 Pb 胁迫的抵抗和保护响应能力较强,当土壤 Pb 浓度高于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗对于外来 Pb 胁迫的抵抗和保护响应能力下降。

2.3 香樟幼苗生理生长指标的判别分析

依据对香樟幼苗生长指标和生理指标的方差分析结果,将原来的 5 个试验组按照香樟幼苗生长生理受到的危害程度分为三大污染类别:无污染(对照组)、轻度污染(1 组、2 组)、重度污染组(3 组、4 组)。对香樟幼苗生长生理 8 个指标组进行判别分析,结果表明,香樟幼苗生理各指标在三大污染类别上存在显著差异,三大类正确判别率为 100%,说明将土壤 Pb 浓度划分为无污染、轻度污染、重度污染三大类别是合理的。

2.4 土壤 Pb 浓度与香樟幼苗生理指标间的回归关系

表 3 表明,香樟生长生理各指标生物量、株高、叶绿素含量、*P<sub>n</sub>* 与 Pb 浓度存在负回归关系,SOD、POD、CAT、MDA 与 Pb 浓度存在正回归关系。

最主要的分布部位,叶片中 Pb 的分布量最低。当 Pb 浓度高于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗根、茎、叶各部分以及整株对 Pb 的吸收量都变化不大,转移系数明显下降,除土壤 Pb 浓度为 45 mg/kg 外,当土壤 Pb 浓度为 1 045 mg/kg 时转移系数在各

表 4 香樟幼苗根、茎、叶各部分的生物量及 Pb 吸收富集情况

Pb 浓度 (mg/kg)	根			茎			叶			整株		
	Pb 含量 (mg/kg)	Pb 分布量 (mg/kg)	转移 系数	Pb 含量 (mg/kg)	Pb 分布量 (mg/kg)	转移 系数	Pb 含量 (mg/kg)	Pb 分布量 (mg/kg)	转移 系数	Pb 含量 (mg/kg)	Pb 分布量 (mg/kg)	转移 系数
45(CK)	8.837	0.03	0.196	4.908	0.01	0.109	3.194	0.01	0.071	5.30	0.05	0.118
545	18.973	0.04	0.035	7.300	0.03	0.013	3.782	0.01	0.007	8.69	0.08	0.016
1 045	76.353	0.10	0.073	13.436	0.03	0.013	7.519	0.02	0.007	22.59	0.15	0.022
2 045	88.160	0.10	0.043	16.375	0.04	0.008	8.514	0.03	0.004	25.00	0.16	0.012
3 045	131.533	0.12	0.043	18.253	0.04	0.006	10.296	0.02	0.003	39.28	0.18	0.013

处理组中均最大,说明土壤 Pb 浓度为 1 045 mg/kg 是重要的临界值。

3 结论与讨论

本研究表明,随着土壤 Pb 浓度的增大,香樟幼苗的生长指标(生物量、株高)和叶绿素含量、 $P_n$  逐渐减小,但 SOD、POD、CAT、MDA 含量增大。当土壤 Pb 浓度不高于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗自身抵抗 Pb 胁迫的适应能力较强,能够进行正常的生理活动。当土壤 Pb 浓度高于 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗自身抵抗 Pb 胁迫的能力下降,正常生理活动受到影响。香樟幼苗生长生理各指标在无污染、轻度污染、重度污染三大类别的正确判别率为 100%,说明土壤 Pb 污染浓度划分正确,较好地反映了香樟幼苗生长生理变化特征。香樟生长生理各指标与土壤 Pb 浓度存在极显著的回归关系,土壤 Pb 浓度变化对香樟生长生理各指标存在极显著影响。香樟幼苗根、茎、叶中的 Pb 含量随土壤 Pb 浓度升高而升高,但根是最主要的吸收部位。除无污染情况外,当土壤 Pb 浓度为 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗根、茎、叶以及幼苗整株的 Pb 转移系数最高。土壤 Pb 浓度为 1 045 mg/kg 具有重要的临界值意义,当土壤 Pb 浓度高于 1 045 mg/kg,香樟幼苗既不能很好地生长,又不能保持最高的转移系数,有效改良土壤。秦普丰等研究表明,当土壤中 Pb 浓度高于 1 000 mg/kg 时,严重抑制棉花、水稻幼苗生长发育,植株矮小且严重受害<sup>[12]</sup>。本研究表明,随着土壤 Pb 浓度升高,香樟幼苗高度、生物量显著降低。邱永祥等研究表明,Pb 处理降低了植株的光合能力,光合速率下降,光效率降低,Pb 破坏了植物的超微结构,导致叶绿体解体<sup>[13]</sup>。本研究表明,随土壤 Pb 浓度的升高,香樟幼苗平均植株高度、单株生物量、叶绿素含量、净光合速率明显下降。

正常情况下,细胞内自由基的产生和清除处于动态平衡状态,自由基水平很低,不会伤害细胞。当植物受到胁迫时,平衡会被打破,自由基累积过多,会伤害细胞<sup>[14]</sup>。植物体内 SOD、POD、CAT 协同构成的保护酶系统可以消除在逆境条件下植物体内增加的  $O_2^-$ 、 $\cdot OH$  等自由基,减轻植物受伤害的程度。丙二醛(MDA)是植物组织在逆境下遭受氧化胁迫发生膜脂过氧化作用的产物,其浓度高低是反映细胞质膜过氧化程度的重要指标。本研究表明,当土壤 Pb 浓度为 1 045 mg/kg 时,香樟幼苗的丙二醛(MDA)含量显著增高,提示植物受胁迫伤害加重。

土壤中的 Pb 主要以难溶性化合物存在,导致 Pb 的迁移性、生物吸收有效性都大大降低。植物对 Pb 的吸收与积累程

度决定于环境中 Pb 的浓度、土壤条件、植物叶片大小等。植物吸收的 Pb 主要累积在根部,只有少数 Pb 转移到地上部分。

参考文献:

[1] 韦朝阳,陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报,2001,21(7):1196-1203.

[2] 徐惠凤,杨成林,王丽妍,等. 铅胁迫对金盏银盘的生长及其根系耐性的影响[J]. 东北林业大学学报,2011,39(1):52-53,61.

[3] Jensen J K, Holm P E, Nejrup J, et al. The potential of willow for remediation of heavy metal polluted calcareous urban soils[J]. Environmental Pollution,2009,157(3):931-937.

[4] 阿衣古丽·艾力亚斯,玉米提·哈力克,塔依尔江·艾山,等. 乌鲁木齐市主要绿化树种重金属累积能力比较[J]. 东北林业大学学报,2014,42(5):18-21.

[5] 鲁绍伟,高琛,杨新兵,等. 北京市不同污染区主要绿化树种对土壤重金属的富集能力[J]. 东北林业大学学报,2014,42(5):22-26.

[6] Syc M, Pohorely M, Kamenikova P, et al. Willow trees from heavy metals phytoextraction as energy crops[J]. Biomass & Bioenergy, 2012,37:106-113.

[7] Vervaeke P, Tack F, Navez F, et al. Fate of heavy metals during fixed bed downdraft gasification of willow wood harvested from contaminated sites[J]. Biomass and Bioenergy,2006,30(1):58-65.

[8] Bonanno G, Cirelli G L, Toscano A, et al. Heavy metal content in ash of energy crops growing in sewage-contaminated natural wetlands: potential applications in agriculture and forestry[J]. The Science of the Total Environment,2013,452:349-354.

[9] 张征田,夏敏,彭宇,等. 河南南阳不同生境土壤重金属含量及其对拟水狼蛛生物学特性的影响[J]. 昆虫学报,2009,52(9):994-999.

[10] 刘萍,李明军. 植物生理学实验技术[M]. 北京:科学出版社,2007:125-127.

[11] 张志良,瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京:高等教育出版社,2003:274-276.

[12] 秦普丰,铁柏清,周细红,等. 铅与镉对棉花和水稻萌发及生长的影响[J]. 湖南农业大学学报:自然科学版,2000,26(3):205-207.

[13] 邱永祥,蔡南通,吴秋云,等. 铅对叶菜用甘薯根系生长及植株光合作用的影响[J]. 浙江农业学报,2006,18(6):429-432.

[14] 李磊,马立华,蔡宇,等. 重金属污染下 3 种灌木的生理响应及生长量变化分析[J]. 东北林业大学学报,2010,38(7):19-21,28.