基于主成分分析法的枫香耐铅性及土壤修复潜力研究

蒋严波[1,2]，凌 忠[2]，韦献东[1,2]，尹建明[2]，凌 威[2]，王凌晖[1]

(1.广西大学林学院，南宁 530004；2.广西北投环保水务集团有限公司，南宁 535000)

摘要：探究枫香(*Liquidambar formosana* Hance)对铅污染土壤的修复作用，为缓解土壤铅危害和枫香在重金属污染地推广种植提供科学参考，以 1 年生枫香幼苗为试材，设置 6 个 Pb^{2+} 浓度(分别为 0，100，300，500，800，1 000 mg/kg)对各 Pb^{2+} 浓度环境下枫香幼苗的生理特性和积累特性进行研究，并采用主成分分析法对枫香的 12 个生理指标进行筛选以及耐性评价。结果表明，随着 Pb^{2+} 的增加，枫香幼苗叶片的生物量、可溶性糖含量、可溶性蛋白含量、游离脯氨酸含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)均呈上升—下降趋势，表现出“低促高抑”；丙二醛(MAD)含量则呈上升趋势；叶绿素 a 和叶绿素 b 均呈下降趋势，但是叶绿素 a 的下降趋势不显著；净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、CO_2 浓度(C_i)和蒸腾速率(T_r)均呈上升—下降趋势。枫香地下部分的铅含量＞地上部分的铅含量，转移系数在 T2、T3 时较大，富集系数与胁迫浓度呈负相关。主成分分析结果表明，提取的 2 个主成分积累贡献率高达 92.462%，说明这 2 个主成分可以反映大部分信息，游离脯氨酸、净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率和 SOD 活性为简化后的 6 个指标。由主成分得分得出，枫香幼苗耐铅性高低排序为 T3＞T4＞T2＞T1＞T5＞T6。综合表明，枫香幼苗对重金属铅具有一定的耐受能力、富集和转移能力，可为重金属污染较重的地区引种枫香和缓解土壤重金属污染作一定的理论依据。

关键词：土壤修复；铅污染；枫香；生理特性；积累特性；主成分分析

中图分类号：X53 **文献标识码**：A **文章编号**：1009-2242(2021)02-0369-08

DOI：10.13870/j.cnki.stbcxb.2021.02.049

Lead Tolerance and Soil Remediation Potential of *Liquidambar formosana* Hance-Based on Principal Component Analysis

JIANG Yanbo[1,2], LING Zhong[2], WEI Xiandong[1,2], YI Jianming[2], LING Wei[2], WANG Linghui[1]

(1.*Forestry College*, *Guangxi University*, *Nanning* 530004;
2.*Guangxi Beitou Environmental Protection & Water Group Co. Ltd.*, *Nanning* 535000)

Abstract: To explore the remediation of *Liquidambar formosana* Hance to lead-contaminated soil and provide scientific reference for the promotion of planting maple in contaminated heavy metals, annual *L. formosana* Hance seedlings were used as test materials, the physiological characteristics and accumulation characteristics of *L. formosana* Hance seedlings under 6 Pb^{2+} concentrations (0, 100, 300, 500, 800, and 1 000 mg/kg) were studied. The principal component analysis method was used to screen the 12 physiological indexes of *L. formosana* Hance and evaluate the tolerance. The results showed that with the increase of Pb^{2+} concentration, the biomass, soluble sugar content, soluble protein content, free proline content, superoxide dismutase (SOD), and peroxidase (POD) of *L. formosana* seedling leaves showed a upward-downward trend, which indicate a “low promotes high suppression” effect. The content of malondialdehyde (MAD) showed an upward trend. Both chlorophyll a and chlorophyll b showed a downward trend, but the downward trend of chlorophyll a was not significant. Net photosynthetic rate (P_n), stomatal conductance (G_s), CO_2 concentration (C_i), and transpiration rate (T_r) all showed an upward-downward trend. The lead content in the underground part of *L. formosana*＞the lead content in the above-ground part, the transfer coefficient was the largest at T2 and T3, and the enrichment coefficient was negatively correlated with the stress concentration. The results of principal component analysis showed that the cumulative contribution rate of the two principal components extracted was as high as 92.462%, indicating that these two principal components can reflect most of the information.

收稿日期：2020-10-25
资助项目：广西研究生教育创新计划项目(YCSW2019037)；国家自然科学基金项目(31360174)
第一作者：蒋严波(1982—)，男，硕士研究生，高级工程师，主要从事生态环境污染防治与修复研究。E-mail：245584024@qq.com
通信作者：王凌晖(1965—)，男，教授，主要从事森林培育研究。E-mail：wanglinghui97@163.com

Free proline, net photosynthetic rate, stoma conductance, intercellular CO_2 concentration, transpiration speed, and SOD activity were the simplified 6 indexes. The principal component scores showed that the lead tolerance of *L. formosana* seedlings is ranked as T3＞T4＞T2＞T1＞T5＞T6. Comprehensively, the *L. formosana* Hance seedlings have certain tolerance, enrichment, and transfer ability to heavy metal lead, and this study provide theoretical basis for introducing *L. formosana* Hance to areas with heavy metal pollution and alleviating soil heavy metal pollution.

Keywords: soil remediation; lead pollution; *Liquidambar formosana* Hance; physiological characteristics; accumulation characteristics; principal component analysis

土壤是生态环境的重要组成部分,也是人类赖以生存的重要自然资源之一。近年来,随着工业化的广泛推进与发展,许多重金属及其化学物质进入土壤环境,造成土壤环境每况愈下[1]。铅(Pb)是严重的土壤重金属污染物之一,土壤的铅污染主要是人类活动所致,来源是人类使用含砷酸铅的农药、含铅的油漆、铅弹、汽油等[2];铅由于其隐蔽性、稳定性、毒性和生物富集性,很容易通过食物链进入人体内蓄积,损害人体健康[3-4]。因此,如何缓解土壤铅污染问题,对铅污染土壤进行有效修复已成为研究学者的热点问题之一。在土壤修复技术中,植物修复(phytoremediation)以其低成本、绿色、效果显著和不易引起二次污染等优点逐渐为人们接受。植物修复技术能否成功的关键因素在于选择合适的植物[5],因此了解具有修复潜力的植物在胁迫下的生理响应将有助于评估其在土壤修复中的应用前景,提高植物修复的效率[6]。

枫香(*Liquidambar formosana* Hance)系金缕梅科(Hamamelidaceae)枫香树亚科(Subfam. Liquidambaroideae Harms)枫香属(*Liquidambar* Linn)高大落叶乔木[7],属第三纪孑遗植物[8],其适应性强、生长快、生态效益好,多被用于调整树种结构和开荒,素有"荒山先锋"树种之称,也能在长汀稀土矿废弃地正常生长,是我国重要的乡土树种之一[9]。目前已有学者[10-12]对不同年龄段的枫香对重金属的吸收积累能力进行了相关研究,但鲜有运用主成分分析法与枫香生理和光合指标进行结合分析其抗性的研究。笔者通过盆栽试验,研究枫香树在铅胁迫下的生理、光合指标的变化规律和铅元素的积累特征,旨在对枫香树耐受铅胁迫机理作一些有益的探索,以期为在铅污染区引种枫香和修复铅污染土壤提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验以 1 年生实生枫香(*Liquidambar formosana* Hance)幼苗为试验材料。种子来源广西壮族自治区林业科学研究院,于 2017 年 10 月种植。2018 年 10 月移入广西大学林学院苗圃(108°17′E,22°50′N)进行种植,盆栽整齐排列,每盆保持同样间距,使受光均匀,缓苗 5 个月用于试验。苗圃年平均温度 17.5～23.5 ℃,年降水量 1 300～1 500 mm,年平均湿度 80%,田间持水量 26.70%。供试土壤采自苗圃内(腐殖土∶熟土为 3∶1),自然风干、消毒、粉碎、过筛作为培养基质,每盆土壤 5 kg,并测定其理化值及重金属 Pb 背景值。土壤 PH 5.34,有机质含量 18.89 mg/kg,土壤铅含量 13.43 mg/kg,土壤全氮含量 1.25 mg/kg,全磷含量 0.49 mg/kg,全钾含量 1.37 mg/kg。

1.2 试验设计

根据土壤环境质量标准(GB 15618—1995),采用单因素随机区组设计,使用 $Pb(NO_3)_2$ 制备含铅重金属溶液,每组依次添加 0(T1),100 mg/kg(T2),300 mg/kg(T3),500 mg/kg(T4),800 mg/kg(T5),1 000 mg/kg(T6)的 $Pb(NO_3)_2$ 溶液,将溶液均匀浇灌在 5 kg 土壤中,每个处理 15 株,共计 90 株。2019 年 3 月开始每隔 15 天进行 1 次污灌,在污灌过程中为防止溶液流失,每盆垫上托盘且及时将溶液倒入盆中,试验在苗圃大棚基地持续 150 天(2019 年 3—8 月),期间进行统一的浇灌和除草。试验全程采用大棚内自然光照。

1.3 测定方法

1.3.1 生理指标测定 2019 年 9 月在每个处理中采集多片完整叶子,并放在 4 ℃的冰盒带回实验室,进行指标测定,叶绿素含量采用丙酮—乙醇混合提取法测定[13];丙二醛含量采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定;叶片 SOD 活性采用 NBT(氮蓝四唑)光化还原法,叶片 POD 活性采用愈创木酚法,叶片游离脯氨酸含量采用酸性茚三酮法[14]测定;叶片可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;叶片可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝(G—250)染色法[15]测定。

1.3.2 光合指标测定方法 2019 年 9 月测定光合速率,采用 LI-6400 (LI-COR 公司,USA)便携式光合系统分析仪进行测定,在晴天上午 9:00—11:30,选取顶芽下的功能叶进行测量,每个处理选择 3 株健康的苗木,每株苗木选择 3 片叶子。叶室采用自然光源,气体流速设置 500 μmol/s,分别得出叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)和蒸腾

速率(T_r)。

1.3.3　铅元素含量测定　2019 年 9 月,将枫香植株的根、茎、叶分别用蒸馏水洗净,放入 70 ℃烘箱烘至恒重,粉碎、过筛,采用硫酸双氧水消煮法进行消煮,随后采用火焰原子吸收分光光度法(日本岛津 AA7000 原子吸收光谱仪)测定铅元素含量。

转运系数(TF)=植物地上部分铅含量(mg/kg)/植物地下部分铅含量(mg/kg)

富集系数(BCF)=植物体内铅含量(mg/kg)/土壤中铅含量(mg/kg)

1.4　数据处理与评价方法

多重比较采用 Duncan 检验法;指标的相关性分析采用 Pearson 相关系数评价;数据处理采用 Excel 2016 整理计算,多重比较、相关性分析、主成分分析均采用 SPSS 22.0 软件进行处理,采用 GraphPad Prism 7 软件绘图。运用主成分赋予权重法计算枫香幼苗的耐铅性综合得分,评价其耐铅能力。

2　结果与分析

2.1　铅胁迫对枫香幼苗生物量的影响

铅胁迫对枫香幼苗的地下部分生物量影响显著($P<0.05$),对地上部分生物量影响不显著($P>0.05$),对总生物量影响极显著($P<0.01$)。从表 1 可以看出,在 $w(Pb^{2+})$为 0～300 mg/kg 时,地上、地下部分生物量和总生物量逐渐增加,在 $w(Pb^{2+})$为 300 mg/kg 时达到最大值,分别为 26.87,25.27,52.14 g;在 $w(Pb^{2+})$为 500～1 000 mg/kg 时,地上、地下生物量下降逐渐下降,在 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg 时达到最小值,分别为 16.46,16.79,33.25 g,分别比对照降低 26.91%,16.09%,21.83%。说明高浓度 Pb^{2+} 的积累对枫香幼苗的生物量有一定抑制作用,且抑制作用在地上部分表现更为显著。有研究[16]表明,植物体内的重金属积累达到一定阈值时,影响植物正常的代谢和生长,集中表现为植物矮小、生物量减小、生长缓慢、易倒伏、不开花结果等现象。本研究发现,当枫香幼苗在 $w(Pb^{2+})$为 0～300 mg/kg 时,生物量逐渐升高,说明 Pb^{2+} 在某种程度上刺激枫香幼苗的生长,使其长得粗壮,表现出一定的抗性,与前人[17]的研究成果一致。

2.2　铅胁迫对枫香幼苗可溶性糖、可溶性蛋白和叶绿素含量的影响

铅胁迫对枫香幼苗的可溶性糖含量影响显著($P<0.05$),对可溶性蛋白含量影响极显著($P<0.01$);从图 1 可以看出,在 $w(Pb^{2+})$为 0～300 mg/kg 时,可溶性蛋白含量呈极显著增加($P<0.01$),可溶性糖含量显著增加($P<0.05$),当 $w(Pb^{2+})$为 300 mg/kg(T3)时均达到最大值,分别为 1 109.3 μg/g 和 4.47%;而在 $w(Pb^{2+})$为 300～1 000 mg/kg 时,可溶性蛋白和可溶性糖含量均呈极显著下降($P<0.01$),且随着 Pb^{2+} 的积累,下降幅度增加,在 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg(T6)时值最小,分别为 309.16 μg/g 和 3%。铅胁迫对枫香幼苗的 Chla、Chlb 影响极显著($P<0.01$)。从图 1 可以看出,在 $w(Pb^{2+})$为 0～1 000 mg/kg 时,枫香幼苗叶片的 Chla 和 Chlb 均比 CK 低,其中 Chla 的降幅分别为 1.10%,3.64%,2.97%,4.71%和 17.89%,当 $w(Pb^{2+})$为 300 mg/kg(T3)时显著下降($P<0.05$),当 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg(T6)时呈极显著下降($P<0.01$);Chlb 的降幅分别为 5.08%,8.14%,23.73%,28.53%和 41.51%,当 $w(Pb^{2+})$为 300～800 mg/kg 时显著下降($P<0.05$),当 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg(T6)时极显著下降($P<0.01$)。

表 1　不同浓度铅胁迫对枫香幼苗生物量的影响

单位:g

处理	地上部分生物量	地下部分生物量	总生物量
T1	22.52±2.65ABab	20.01±2.46ABa	42.53±4.57Bc
T2	25.58±3.36ABa	22.16±3.54Aab	47.74±5.08Ab
T3	26.87±4.20Aa	25.27±3.61Aa	52.14±6.18Aa
T4	18.64±2.65ABb	21.92±3.13ABa	40.56±3.77Bc
T5	17.45±2.34ABb	20.17±2.06ABa	37.62±2.98BCcb
T6	16.46±3.46Bb	16.79±2.65Ab	33.25±2.60Cd

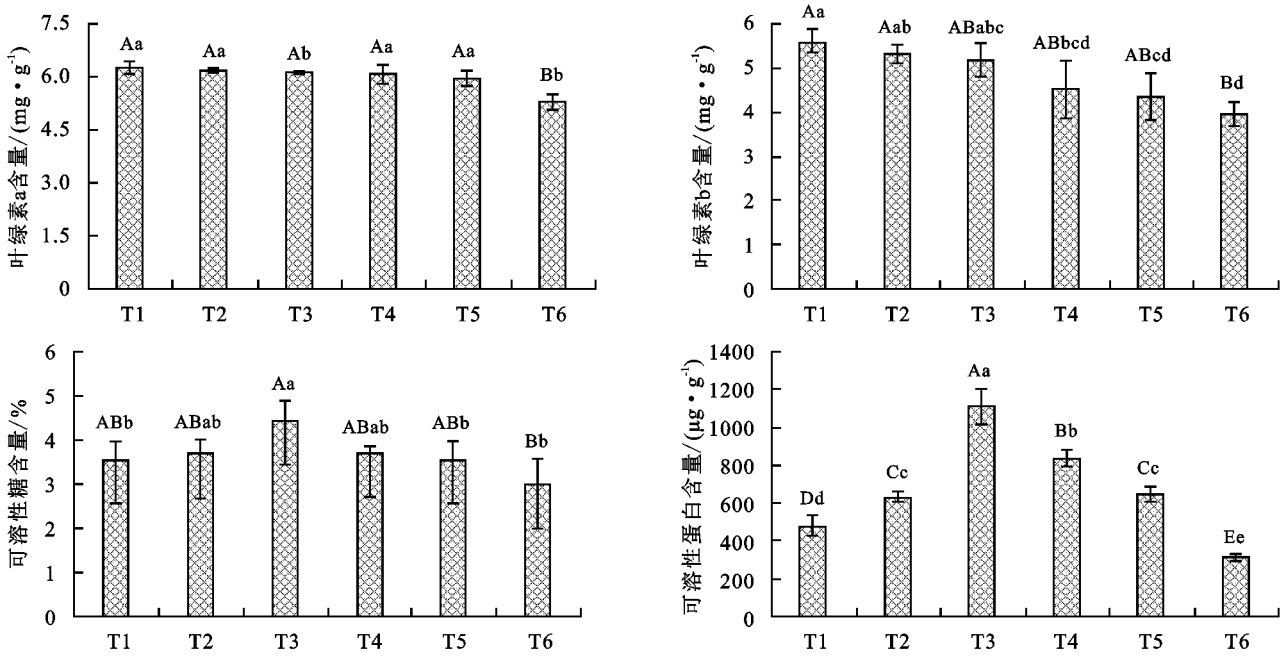
注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示各处理差异显著($P<0.05$);同列不同大写字母表示各处理差异极显著($P<0.01$)。下同。

叶绿素含量是植物光合强度的一个重要指标[18]。本研究结果表明,铅胁迫降低了枫香叶片叶绿素含量,其重要原因可能是枫香受到重金属胁迫后,叶片叶绿体结构受到毒害,直接干扰叶绿素的生物合成[19];也有研究[20]发现,Pb^{2+} 可以通过增加叶绿素酶等活性加快叶绿素降解速率。可溶性糖作为光合作用的产物,不仅为植物提供能量,还是参与植物体渗透调节不可缺少的一部分;可溶性蛋白也是植物体内重要的渗透调节物质,其含量大小可表现出植物代谢的强弱,逆境下的植物体会通过主动积累,改善植物渗透平衡[21]。本研究发现,铅胁迫下枫香幼苗的可溶性糖和可溶性糖含量先增加后减小,可能是因为在逆境情况下的一种应急反应,当 Pb^{2+} 积累达到一定浓度时,可溶性蛋白和可溶性糖的合成受阻,抑制植物体渗透调节,从而影响植物生长。

2.3　铅胁迫对枫香幼苗丙二醛(MDA)、游离脯氨酸(Pro)含量和抗氧化酶活性的影响

铅胁迫对枫香幼苗的 MDA、Pro、SOD 和 POD 影响均呈极显著($P<0.01$)。从图 2 可以看出,在

$w(Pb^{2+})$为 0～800 mg/kg 时，枫香幼苗的 MDA 逐渐增加，在 $w(Pb^{2+})$为 800 mg/kg(T5)时最大，且与 CK 差异极显著($P<0.01$)；在 $w(Pb^{2+})$为 800～1 000 mg/kg 时趋于稳定，T5 与 T6 处理差异不显著($P>0.05$)。在 $w(Pb^{2+})$为 0～300 mg/kg 时，枫香幼苗的 Pro 逐渐增加，在 $w(Pb^{2+})$为 300 mg/kg(T3)时最大，为 442.64 μg/g，且与 CK 存在极显著差异($P<0.01$)；在 $w(Pb^{2+})$为 300～1 000 mg/kg 范围内逐渐递减，当 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg(T6)时值最小，为 309.16 μ/g，与 CK 差异显著($P<0.05$)。在 $w(Pb^{2+})$为 0～500 mg/kg 时，枫香幼苗叶片的 SOD、POD 活性逐渐增加，在 $w(Pb^{2+})$为 500 mg/kg(T4)时最大，分别为 784.40 U/g FW 和 231.61 μg/(g·min)，均与 CK 差异极显著($P<0.01$)；在 $w(Pb^{2+})$为 500～1 000 mg/kg 范围内极显著递减，在 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg(T6)时值最小，分别为 501.30 U/g FW 和 105.83 μg/(g·min)，均与对照存在显著差异($P<0.05$)。



注：不同大写字母表示处理间差异极显著($P<0.01$)；不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

图 1 不同浓度铅胁迫对枫香幼苗叶片叶绿素、可溶性糖和可溶性蛋白含量的影响

植物体内的 MDA 是膜脂过氧化重要的产物之一，MDA 含量变化能体现植物受到抗逆境伤害时生物膜的损害程度，当植物遭受胁迫时细胞内会出现大量的 MDA 积累，也是一种受到胁迫的信号[22]。本研究结果表明，铅胁迫下枫香幼苗的 MDA 含量不断增加，说明枫香始终受到 Pb^{2+} 的迫害，与前人[23]的研究结果一致。Pro 是植物体内最重要和有效的渗透调节物质，在逆境胁迫下会迅速积累，通过提高细胞液浓度降低其渗透势，以缓解逆境胁迫[21]。本研究发现，铅胁迫下枫香幼苗的 Pro 含量均先增加后减小，可能在低浓度 Pb^{2+} 环境下增强 Pro 的合成并参与渗透调节，是自我保护的反应，当 Pb^{2+} 积累超过一定范围时，合成受阻，破坏自我调节机制，导致枫香幼苗生长受到影响。在逆境刺激下，植物产生大量的活性氧自由基，时刻威胁细胞性能和生存能力，当重金属离子积累到一定浓度会导致植物枯萎死亡，而 SOD、POD 酶普遍存在于植物体内，能有效清除体内过量的活性氧自由基，提高植物的抗逆性。本研究结果表明，枫香幼苗在铅胁迫下 SOD 和 POD 活性随着 Pb^{2+} 浓度的增加呈“上升—下降”趋势，与前人[24]的研究结果一致，说明在高浓度 Pb^{2+} 下，植物体内出现大量的活性自由基积累，超出 SOD、POD 酶的清除能力，也说明 SOD、POD 保护酶对植物膜系统的保护具有一定局限性。

2.4 铅胁迫对枫香幼苗光合特性的影响

铅胁迫处理对枫香幼苗的 P_n、G_s、C_i 和 T_r 均呈极显著影响($P<0.01$)。从表 2 可以看出，在 $w(Pb^{2+})$为 0～200 mg/kg 时，枫香幼苗的 P_n 呈极显著增加($P<0.01$)；在 $w(Pb^{2+})$为 200～1 000 mg/kg 范围内逐渐降低，当 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg(T6)时值最小，为 4.64 μmol/(m²·s)，与各处理差异极显著($P<0.01$)。在 $w(Pb^{2+})$为 0～200 mg/kg 范围内，枫香幼苗的 G_s、C_i 和 T_r 平稳下降($P>0.05$)；在 $w(Pb^{2+})$为 200～300 mg/kg 范围内显著($P<0.05$)或极显著增加($P<0.01$)；在 $w(Pb^{2+})$为 300～1 000 mg/kg 范围内逐渐降低，均在 $w(Pb^{2+})$为 1 000 mg/kg(T6)时值最小，分别为 0.05 mmol/(m²·s)，234.73 μmol/mol 和 0.89 mmol/(m²·s)，均与 CK 差异极显著($P<0.01$)。

植物叶片的 P_n 是衡量植物光合作用能力强弱的重要指标,人们通过对植物光合速率的测定来诊断植物是否遭受环境胁迫。通常认为,胁迫环境下光合作用降低的主要因子包括气孔限制和非气孔限制;气孔限制指由胁迫引起的气孔关闭,导致 CO_2 供应受阻,进而影响光合作用,表现为胁迫下植物光合速率与胞间 CO_2 浓度值(C_i)和气孔导度(G_s)呈正相关;非气孔限制主要指叶肉细胞光合活性受到抑制,从而影响植物的光合作用,主要表现为植物净光合速率(P_n)降低,伴随着胞间 CO_2 浓度值(C_i)增加。本试验中,当铅浓度≤300 mg/kg 时,枫香幼苗的净光合速率(P_n)显著高于对照,说明气孔导度(G_s)仍然维持着正常的光合作用,此时没有限制光合作用;当铅浓度>300 mg/kg 时,净光合速率(P_n)降低,伴随着胞间 CO_2 浓度值(C_i)和气孔导度(G_s)降低。因此,可判定高浓度铅胁迫下枫香幼苗的光合作用的抑制可能是由气孔限制引起。当植物在受到低浓度重金属胁迫时,会通过气孔调节的方式来提高空气中 CO_2 的利用率以抵御逆境,促进植物生长[25];随着铅胁迫浓度的增加,各光合指标出现明显的下降,说明植物通过降低气孔张开程度减少消耗来适应胁迫环境,这也是植物对外界污染物的一种保护性适应现象。当 Pb^{2+} 积累到一定量时,会严重损害叶片的气孔结构,这时限制植物光合作用因素就由气孔因素转变为非气孔因素[26],此时叶绿体膜系统的受损和类囊体的破坏是导致光合作用下降的重要因素[27]。

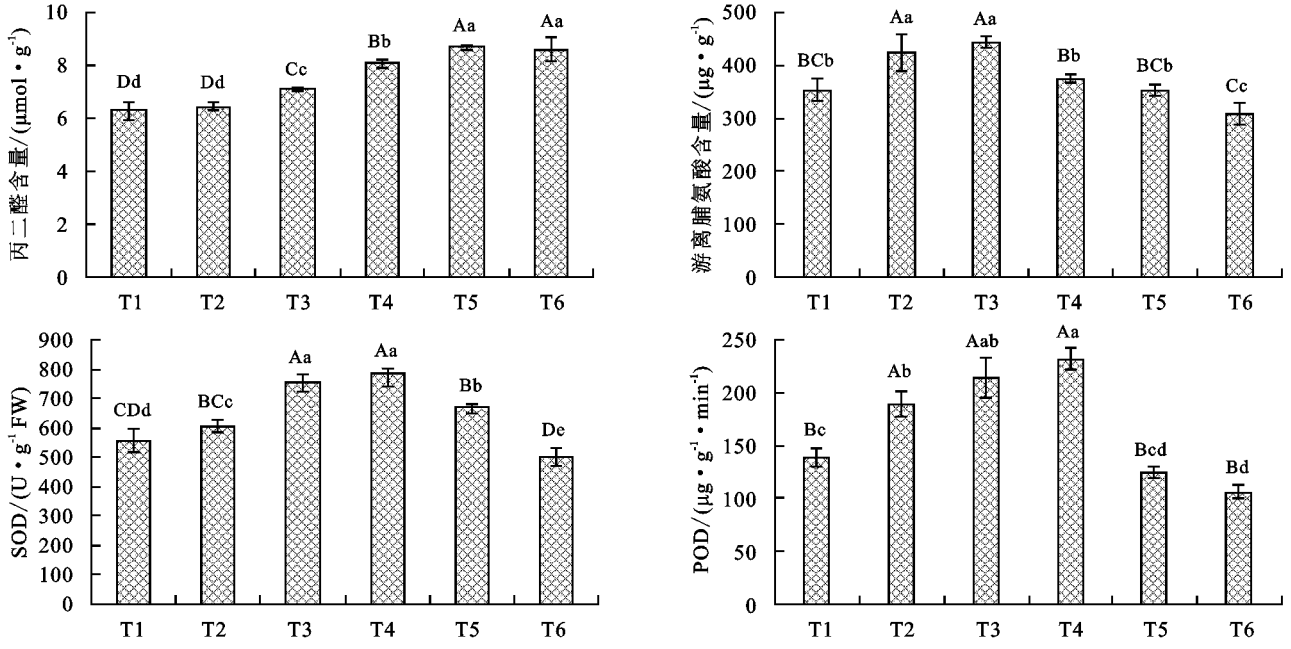


图 2　不同浓度铅胁迫对枫香幼苗叶片 MDA、Pro、抗氧化酶活性的影响

表 2　不同浓度铅胁迫对枫香幼苗叶片光合特性的影响

处理	P_n/(μmol·m^{-2}·s^{-1})	G_s/(mmol·m^{-2}·s^{-1})	C_i/(μmol·mol^{-1})	T_r/(mmol·m^{-2}·s^{-1})
T1	8.36±0.20Bc	0.21±0.01Bb	370.02±19.93Ab	1.98±0.10Bb
T2	9.38±0.06Aa	0.20±0.01Bb	364.23±10.64Aab	1.93±0.10Bb
T3	8.76±0.39Bb	0.23±0.01Aa	398.99±18.61Aa	2.22±0.05Aa
T4	6.60±0.13Cd	0.15±0.01Cc	310.12±13.50Bc	1.44±0.11Cc
T5	5.60±0.05De	0.10±0.01Dd	270.00±19.15BCd	1.01±0.03Dd
T6	4.64±0.21Ef	0.05±0.01Ee	234.37±15.87Ce	0.89±0.02Dd

2.5　枫香幼苗对铅的转移系数和富集系数

由表 3 可知,随着铅胁迫浓度的增加,植物地上部分和地下部分的铅含量均出现不同程度的增加,在 T6 处理时积累量达到最大,且均表现为地下部分含铅量>地上部分含铅量,说明枫香幼苗主要通过根系富集铅离子。由转移系数(TF)和富集系数(BCF)可以发现,枫香幼苗对铅的转移系数规律不明显,变化范围为 0.17~0.29,均<1,在 T2 和 T3 处理时较大,分别为 0.29 和 0.26;而枫香幼苗对铅的富集系数随着胁迫浓度的增加整体呈现下降趋势,可能是因为铅胁迫浓度过大,使得植物体内叶绿素含量和酶活性降低,进而影响植物的富集能力。

根据植物对重金属的吸收、转移和积累机制的不同,植物对重金属的耐受机制有 3 种:富集、根部囤积

和规避[28]。其中,富集型植物指能够主动吸收和富集土壤中的重金属元素,并表现出较强的向上转移能力,例如拟南芥、凤眼莲和龙葵可作为 Pb、Cd 和 Zn 的超富集植物[29]。根部囤积型植物被动吸收土壤中的重金属元素进入体内,但大量的金属元素被囤积在根部,只有少量的重金属元素被输送到地上部分,以减少对植物生理系统的损害,TF 一般<1。

有研究[30]表明,东方香蒲对 Pb 的转移系数为 0.37~0.53,属根部囤积型植物;规避型植物虽然生长在重金属含量非常高的环境中,但它们能够通过某些机制抵制植物根系对重金属的吸收,只有少量的重金属被吸收。

表 3 不同浓度铅胁迫对枫香幼苗转移系数和富集系数的影响

处理	地下部分铅含量/(mg·kg^{-1})	地上部分铅含量/(mg·kg^{-1})	转移系数 TF	富集系数 BCF
T1	69.88±6.07Dd	12.09±1.31Ee	0.17±0.03Bb	0.074±0.004Aa
T2	280.39±21.00Dd	80.73±7.64Ee	0.29±0.06Aa	0.049±0.003Bb
T3	815.23±32.89Cc	208.84±30.73Dd	0.26±0.03Aa	0.051±0.003Bb
T4	1540.65±144.39Bb	277.32±11.09Cc	0.18±0.02Bb	0.042±0.003Bb
T5	2542.53±147.80Aa	382.03±14.71Bb	0.15±0.01Bb	0.039±0.002Bb
T6	2954.53±77.49Aa	503.61±32.13Aa	0.17±0.01Bb	0.033±0.001Cc

2.6 铅胁迫下枫香幼苗各指标的 Pearson 相关性分析

采用 Pearson 法相关性对枫香幼苗的 15 项指标耐性指数进行分析。由表 4 可知,枫香幼苗根、茎、叶的含铅量与 MAD 呈极显著正相关(相关系数 r=0.811 4),与叶绿素和光合指标均呈显著或极显著负相关(相关系数 r=0.917 2),说明枫香幼苗的根、茎、叶在蓄积 Pb^{2+} 时,这些指标的响应最为显著。

由表 4 可知,各指标之间均存在不同程度的相关性,表明 15 项指标所提供的信息发生了相互重叠,而植物对重金属的耐性是一种综合性状的表现,所以直接利用某一单项指标对枫香幼苗的耐铅性进行评价是具有一定的片面性,无法准确评价供试材料的耐铅能力[31]。

表 4 铅胁迫对枫香幼苗生各指标变化的 Pearson 相关性

指标	Bio	SP	SS	MAD	Pro	POD	SOD	chla	chlb	P_n	G_s	C_i	T_r	Pb(Ag)	Pb(Ug)
Bio	1														
SP	0.751	1													
SS	0.900	0.942	1												
MAD	−0.725	−0.157	−0.424	1											
Pro	0.962	0.818	0.895	−0.569	1										
POD	0.688	0.824	0.731	−0.317	0.772	1									
SOD	0.473	0.907	0.742	0.086	0.597	0.828	1								
chla	0.715	0.530	0.665	−0.705	0.672	0.565	0.482	1							
chlb	0.777	0.294	0.557	−0.968	0.628	0.357	0.068	0.835	1						
P_n	0.913	0.471	0.684	−0.927	0.832	0.559	0.223	0.809	0.941	1					
G_s	0.906	0.595	0.790	−0.873	0.792	0.609	0.374	0.861	0.937	0.944	1				
C_i	0.927	0.624	0.821	−0.853	0.808	0.598	0.370	0.809	0.915	0.933	0.994	1			
T_r	0.918	0.575	0.780	−0.879	0.787	0.583	0.304	0.754	0.914	0.935	0.983	0.993	1		
Pb(Ag)	−0.691	−0.220	−0.455	0.955	−0.559	−0.382	−0.068	−0.863	−0.977	−0.908	−0.893	−0.849	−0.847	1	
Pb(Ug)	−0.782	−0.316	−0.542	0.973	−0.654	−0.482	−0.126	−0.832	−0.979	−0.954	−0.938	−0.908	−0.916	0.983	1

注:Bio 为生物量;SP 为可溶性蛋白含量;SS 为可溶性糖含量;MAD 为丙二醛含量;Pro 为游离脯氨酸含量;POD 为 POD 活性;SOD 为 SOD 活性;chla 为叶绿素 a 含量;chlb 为叶绿素 b 含量;P_n 为净光合速率;G_s 为气孔导度;C_i 为胞间 CO_2 浓度;T_r 为蒸腾速率;Pb(AG)为地上部分含铅量;Pb(UG)为地下部分含铅量;相关系数临界值 a=0.05 时,r=0.811 4,* 表示显著相关(P<0.05);a=0.01 时,r=0.917 2,** 表示极显著相关(P<0.01)。

2.7 铅胁迫下枫香幼苗生理指标的主成分分析

主成分分析是在损失较少信息的前提下将多项指标转化为较少的综合指标。由表 5 对枫香幼苗的 12 个生理指标进行主成分分析可得,其中前 2 个主成分贡献率分别为 72.433%和 20.029%,累计贡献率高达 92.462%,能比较完整地代表 12 个指标的绝大部分信息。

第 1 主成分贡献特征向量较大的有 Pro、P_n、G_s、C_i 和 T_r,特征值 8.692,贡献率 72.433%,第 1 主成分指标(5 个)占总指标数(12 个)的 41.67%,由表

4 可知这 5 个指标之间均具有极显著相关性($P<0.01$)。据此说明,第 1 主成分主要反映叶片的 4 项光合指标与 1 项生理指标的综合作用特征,随着铅浓度的变化,枫香幼苗叶片的光合作用发生适应性的变化,并与部分生理指标形成连锁反应,这些指标很大程度上反映枫香幼苗对铅胁迫的响应;第 2 主成分特征向量较大的有 SOD,特征值 2.403,贡献率 20.029%,说明第 2 主成分主要由 SOD 活性指标所决定。由此,可初步作为 2 个新的相互独立的综合指标对枫香幼苗耐铅能力进行评价。

表 5　耐铅性因子负荷矩阵和特征向量矩阵

指标变量	因子负荷		特征向量	
	第 1 主成分	第 2 主成分	第 1 主成分	第 2 主成分
可溶性蛋白(SP)	0.735	0.658	0.249	0.424
可溶性糖(SS)	0.878	0.379	0.298	0.244
丙二醛(MDA)	−0.780	0.610	−0.265	0.394
游离脯氨酸(Pro)	0.899	0.227	0.305	0.146
POD	0.737	0.517	0.250	0.334
SOD	0.532	0.816	0.180	0.526
叶绿素 a(chla)	0.859	−0.093	0.291	−0.060
叶绿素 b(chlb)	0.857	−0.504	0.291	−0.325
净光合速率(P_n)	0.931	−0.307	0.316	−0.198
气孔导度(G_s)	0.974	−0.192	0.330	−0.124
胞间 CO_2 浓度(C_i)	0.971	−0.169	0.329	−0.109
蒸腾速率(T_r)	0.951	−0.221	0.323	−0.143
特征值	8.692	2.403		
方差贡献率	72.433	20.029		
累计贡献率	72.433	92.462		

PC1 和 PC2 有关的各因素荷载系数见图 3。除 MAD 以外,其余指标均较为聚集,说明各指标对铅胁迫的响应各有侧重,从而使得它们所提供的信息发生重叠。因此,用任何的单一指标评价枫香幼苗的耐铅性都有片面性,所以直接用这些单一指标对枫香幼苗的耐铅性的强弱,则不能准确的评价枫香幼苗对重金属铅的适应性。

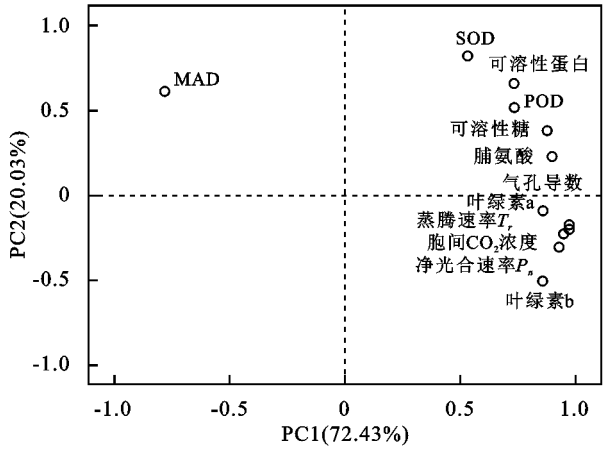


图 3　与 PC1 和 PC2 有关的各因素载荷系数

2.8　枫香幼苗耐铅性综合评价

根据各综合指标的标准化特征向量值及各单项指标的标准化值,可得到 2 个主成分与原 12 项指标的线性组合方程。

第 1 主成分:

$$Y(1)=0.249X_1+0.298X_2-0.265X_3+\cdots+0.323X_{12}$$

第 2 主成分:

$$Y(2)=0.424X_1+0.244X_2+0.394X_3+\cdots-0.143X_{12}$$

利用各指标标准化后的值带入方程得出表 6 的主成分得分,各处理的得分值 T3>T4>T2>T1>T5>T6。由此可得,在枫香幼苗各指标的综合值在 T3($w(Pb^{2+})=300$ mg/kg)处理时最大,也可说明枫香幼苗具有一定的耐铅性。

表 6　枫香幼苗耐铅性的主成分得分值

处理	排序	综合得分	成分得分	
			Ⅰ	Ⅱ
T1	4	−1.127	1.204	−2.331
T2	3	0.791	1.831	−1.040
T3	1	4.623	3.484	1.139
T4	2	2.068	0.248	1.820
T5	5	−1.209	−2.053	0.844
T6	6	−5.146	−4.715	−0.431

3　结 论

(1)植物抗污染能力涉及体内多种代谢过程,用单一指标评价难免存在片面性。本试验通过主成分分析法将 13 个单项生理指标综合成新的、相互独立的 2 个综合指标,可得出枫香的 Pro、SOD、P_n、G_s、C_i、T_r 6 个生理指标可作为评价耐铅性的主要指标;最后根据主成分得分值排序可得,枫香幼苗在 T3、T4、T2 下各指标均比 CK 较好,说明枫香在 Pb^{2+} 浓度为 0～500 mg/kg 的土壤下仍然可以良好生长,其具有一定的耐铅性。

(2)枫香幼苗吸收的 Pb^{2+} 主要蓄积于根部,且最大的 TF 为 0.29,表现出一定的转移能力,可见其属于根部囤积性植物。

(3)综上所述,枫香对于修复土壤铅污染具有一定的应用潜力,可考虑将其用作修复铅污染地区的植物之一。

参考文献:

[1]　Wang J, Zhang C B, Jin Z X. The distribution and phytoavailability of heavy metal fractions in rhizosphere soils of paulowniu fortunei (seem) hems near a Pb/Zn smelter in Guangdong, PR China[J]. Geoderma, 2009, 148(3):299-306.

[2] Pourrut B, Shahid M, Dumat C, et al. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants[J].Reviews of Environmental Contamination and Toxicology,2011,213:113-136.

[3] 秦惠生.铅的环境毒理学[J].环境科学研究,1979(增刊2):86-100.

[4] Hanumanth K G, Pramoda K J. Heavy metal lead in fluative toxicity and its assessment in phytoremediating plants: A review[J].Springer International Publishing,2015,226(10):324-334.

[5] 徐剑锋,王雷,熊瑛,等.土壤重金属污染强化植物修复技术研究进展[J].环境工程技术学报,2017,7(3):366-373.

[6] 胡国涛,杨兴,陈小米,等.速生树种竹柳对重金属胁迫的生理响应[J].环境科学学报,2016,36(10):3870-3875.

[7] 何庆海,杨少宗,李因刚,等.枫香树种群种子与果实表型性状变异分析[J].植物生态学报,2018,42(7):752-763.

[8] 胡文杰,庞宏东,胡兴宜,等.9 年生枫香种源变异及优良种源选择[J].中南林业科技大学学报,2019,39(3):40-46.

[9] 施季森,成铁龙,王洪云.中国枫香育种研究现状[J].林业科技开发,2002(3):17-19.

[10] 章芹,薛建辉,刘成刚.Cd^{2+} 与 CTAB 复合污染对枫香幼苗生长与生理生化特征的影响[J].生态学报,2011,31(19):5824-5831.

[11] 陈顺钰,韩航,薛凌云,等.Pb、Cd 和酸胁迫对枫香种子萌发、幼苗生长及体内抗氧化酶活性的影响[J].农业环境科学学报,2018,37(4):647-655.

[12] 施翔,王冬雪,王树凤,等.枫香幼苗对铅胁迫的生理生化响应与元素分布[J].林业科学研究,2019,32(4):88-95.

[13] 杨敏文.快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨[J].光谱实验室,2002,19(4):478-481.

[14] 陈建勋,王晓峰.植物生理学实验指导[M].广州:华南理工大学出版社,2006:68-69,89-90.

[15] 蔡永萍.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业大学出版社,2014:114-116.

[16] 郑绍鑫,蒋林,滕维超,等.刨花润楠对硝酸铅胁迫的生长和生理响应机制[J].林业科技开发,2015,29(3):25-30.

[17] 杨艺宁,李琬婷,黄晓霞,等.铅胁迫对洋常春藤生长及生理特性的影响[J].西部林业科学,2020,49(3):126-131.

[18] 许大全.光质对植物生长发育的影响[J].植物生理学报,2015,51(8):1217-1234.

[19] Ariagada C A, Herrera M A, Ocampo J A. Contribution of arbuscularmycorrhizal and saprobe fungi to the tolerance of Eucalyplus globulus to Pb[J].Water Air and Soil Pollution,2005,166(14):31-47.

[20] 杨丹慧.重金属离子对高等植物光合膜结构与功能的影响[J].植物学通报,1991,8(3):26-29.

[21] 李永洁,李进,徐萍,等.黑果枸杞幼苗对干旱胁迫的生理响应[J].干旱区研究,2014,31(4):756-762.

[22] 韦献东,陶志华,王艺锦,等.郁闭度对金花茶和山茶的生理特性影响及主成分分析[J].福建农业学报,2019,34(8):905-911.

[23] 谢亚兵,林铃,毕学琴,等.Cd、Pb 单一胁迫对芳樟小苗叶片生理指标的影响[J].安徽农学通报,2018,24(6):94-96,103.

[24] 郭晖,王妞,张家洋.土壤重金属胁迫下 3 种观赏植物生理抗性[J].西北林学院学报,2017,32(3):62-66,70.

[25] 王学华,戴力.作物根系镉滞留作用及其生理生化机制[J].中国农业科学,2016,49(22):4323-4341.

[26] 高冠龙,冯起,张小由,等.植物叶片光合作用的气孔与非气孔限制研究综述[J].干旱区研究,2018,35(4):929-937.

[27] 周朝彬,胡庭兴,胥晓刚,等.铅胁迫对草本樨叶中叶绿素含量和几种光合特性的影响[J].四川农业大学学报,2005,23(4):432-435.

[28] Baker A J M. Accumulators and excluders -strategies in the response of plants to heavy metals[J].Journal of Plant Nutrition,1981,3(1/4):643-654.

[29] McGrath S P, Lombi E, Gray C W, et al. Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccumulators Thlaspi caerulescens and Arabidopsis haller[J].Environmental Pollution,2006,141(1):115-125.

[30] 李永丽,李欣,李硕,等.东方香蒲(*Typha orientalis* Presl)对铅的富集特征及其 EDTA 效应分析[J].生态环境学报,2005,14(4):555-558.

[31] 田小霞,李丽,毛培春,等.马蔺苗期耐镉性分析及鉴定指标筛选[J].核农学报,2018,32(3):591-599.