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Pb2+浓度(分别为0,100,300, 500,800,1 000 mg/kg)对各Pb2+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Pb2+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 升一下降趋势，表现出“氐促高抑”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(匕)、气孔导度(***Gs***)、CO2浓度(***C***Q和蒸腾速率(匚)均呈上 升一下降趋势。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92462%，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CO2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/. cnki.stbcxb.2021.02.049

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

JIANG Yanbo1'2, LING Zhong2, WEI Xiandong12, YI Jianming2, LING Wei2, WANG Linghui1

***(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*** Hanceseedlingsunder6Pb2＋ concenraions (0 100 300 500 800 and1000mg/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 ofPb2＋ concentration the biomass solublesugarcontent solubleproteincontent freeprolinecontent superoxidedismutase (SOD) andperoxidase (POD)of***L****．****formosana*** seedlingleavesshowedaupward-downwardtrend whichindicatea “low promotes high suppression”e**f**ect．The content of malondialdehyde (MAD)showedanupwardtrend． Both chlorophyll a and chlorophyll b showed a downward trend , but the downward trend of chlorophyll a was no significan ．Ne phoosynheicrae (***Pn***) somaalconducance (***Gs***) CO2 concenraion (***Ci***) and transpiration rate (***Tr***) all showed an upward-downward trend. The lead content in the underground part of ***L. formosana*** >the lead content in the aboveground part , the transfer coefficient was the largest at T2 and T3 andtheenrichmentcoe**f**icientwasnegativelyco**r**elatedwiththestressconcentration.Theresultsofprincipal componentanalysisshowedthatthecumulativecontributionrateofthetwoprincipalcomponentsextracted wasashighas92.462% indicatingthatthesetwoprincipalcomponentscanreflectmostoftheinformation.

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(1360174)

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](mailto: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](mailto:wanglinghui97@163.com)

Free proline, net photosynthetic rate, stoma conductance, intercellular COZ 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 anda**l**evatngsolheavy metalpo**l**uton.

**Keywords**: soil remediation； lead pollution； ***Liquidambrr formosana*** Hance； physiological characteristics； accumuationcharacteristics； principa componentanaysis

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B。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. Liqui- dambaroideae Harms)枫香属(***Liquidambar*** Linn) 高大落叶乔木□，属第三纪孑遗植物凶，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⑷。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 °C,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(NO3)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(NOs)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. 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 C 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。
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 Mmol/s,分别得出叶片净光合 速率(***P”***)、气孔导度(***G***,)、胞间CO2浓度(***C,***)和蒸腾 速率(八)。
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 °C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***V0.05**),**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***V0.01**)。**从表1可 以看出，在***w***(Pb2+ )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***(Pb2+ )为300 mg/kg时达到最大值，分别为26.87,25.27,52.14 g**；** 在***w***(Pb2+ )为500〜1 000 mg/kg时，地上、地下生 物量下降逐渐下降，在***w*** (Pb2+ )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% **,**1.83%**。**说明高浓度Pb2+ 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***(Pb2+ )为0〜300 mg/kg时，生物量逐 渐升高，说明Pb2+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***V0.01**)；**从图1 可以看出，在***w***(Pb+ )为0〜300 mg/kg时，可溶性蛋白 含量呈极显著增加(***P***V0.01**)**，可溶性糖含量显著增加 ***(P***V0.05**),**当 ***w***(Pbz+ )为 300 mg/kg(T3**)**时均达到最 大值**，**分别为 1 109.3 ***fig/g*** 和 4.47% ；而在 ***w***(Pb2+ **)** 为300〜1000 mg**/**kg 时**，**可溶性蛋白和可溶性糖含 量均呈极显著下降(***P***V0.01),且随着Pb2+的积累**,** 下降幅度增加**，**在***w***(Pb2+ **)为**1 000 mg/kg**(**T6**)**时 值最小**，**分别为309.16 ig**/**g 和3%**。** 铅胁迫对枫香 幼苗的Chla、Chlb影响极显著(***P***V0.01**)。**从图1可 以看出，在***w***(Pb2+ )为0〜1 000 mg/kg时，枫香幼 苗叶片的Chia和Chib均比CK低，其中Chia的降 幅分别为1.10%**，**3.64%**，**2.97%**，**4.71%和17.89%**，**当 ***w***(Pbz+ )为 300 mg/kg(T3)时显著下降(***P***V0.05),当 ***w*** (Pb+ )为1 000 mg/kg**(**T6**)**时呈极显著下降***(P****V* 0.01)；Chlb 的降幅分别为 5.08% ,8.14% ,23.73% **,** 28.53%和 41.51%，当 ***w***(Pb2+ )为 300〜800 mg/kg 时显著下降(***P***V0.05),当 ***w***(Pb2+ )为 1 000 mg/kg (T6)时极显著下降(***P***V0.01**)。**

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］**；**也有研究际〕发现，Pb2+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Pb2+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**。**

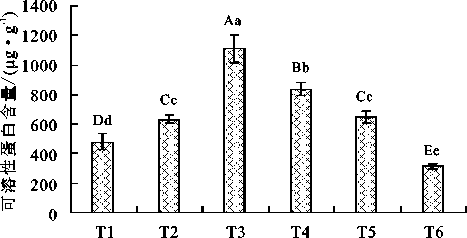
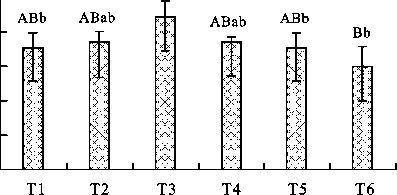
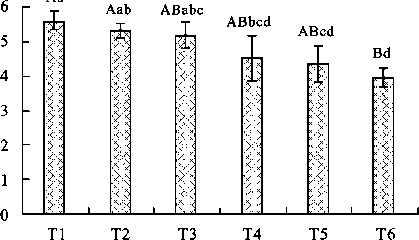
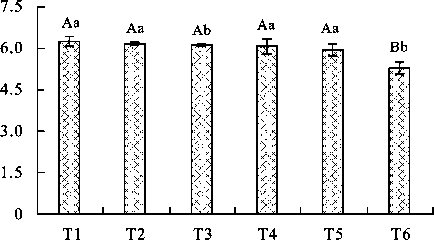
**2.3**铅胁迫对枫香幼苗丙二醛**(MDA**)、游离脯氨酸 **(Pro)**含量和抗氧化酶活性的影响

铅胁迫对枫香幼苗的MDA.Pro.SOD和POD 影响均呈极显著(***P***V0.01**)。**从图2可以看出，在***w***(Pb2+ )为0〜800 mg/kg时，枫香幼苗的MDA 逐渐增加*，*在***w***(Pb2+ **)**为800 mg/kg(T5)时最大*，*且 与CK差异极显著(***P***V0.01)；在***w***(Pb2+ )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***(Pb2+ )为 0〜300 mg/kg 时，枫香 幼苗的Pro逐渐增加，在***w*** (Pb2+ **)**为300 mg/kg (T3)时最大**，为**442.64 gg/g**，**且与CK存在极显著差 异(***P***V0.01)；在 ***w***(Pb2+ )为 300 〜1 000 mg/kg 范 围内逐渐递减**，** 当 ***w*(**Pb2+ **)** 为 1000 mg**/**kg**(**T6**)** 时 值最小，为309.16 g/g,与CK差异显著(***P***<0.05**)。** 在 ***w*(**Pb2+ **)** 为 0〜500 mg**/**kg 时**，** 枫香幼 苗 叶片 的 SOD、POD活性逐渐增加，在***w***(Pb2+ )为500 mg/kg (T4)时最大，分别为 784.40 U/g FW 和 231.61 gg/ (g **•** min**)，**均与CK差异极显著***(P*** <0.01**)；**在 ***w*(**Pb2+ **)**为500〜1000 mg**/**kg 范围内 极显著递减 在 ***w*(**Pb2+ **)** 为 1000 mg**/**kg**(**T6**)** 时值最 小**，** 分别 为 501.30 U/g FW 和 105.83 gg/(g **•** min**)，**均与对照 存在显著差异(***P***V0.05**)。**

Aa

5 4 3 2 1 0

%、\*如樂堂块丘



注：不同大写字母表示处理间差异极显著(***F*** <0.01)；不同小写字母表示处理间差异显著(***F*** <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 Pb2＋ 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 Pb2＋ 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Pb2+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 Pb2+浓度的增加呈**“**上升**一**下降”趋势，与前人如的 研究结果一致**，** 说明在高浓度 Pb2＋ 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****”****G****、****C****i*和***T****r*均呈极 显著影响(***P***V0.01**)。**从表2可以看出，在***w***(Pbz+ )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+ )为200〜1 000 mg/kg范围内逐渐降 低，当 ***w***(Pbz+ )为 1 000 mg/kg(T6)时值最小，为 4.64 gmol/(mz **•** s**)，**与各处理差异极显著(***P***<0.01**)。**在 ***w***(Pbz+ )为0〜200 mg/kg范围内，枫香幼苗的*Gs* ***C****i*和 ***T****”*平稳下降(***P***〉0.05)；在 ***w***(Pbz+ )为 200〜300 mg/kg 范围内显著(***P***V0.05)或极显著增加(***P***V0.01)；在 ***w***(Pb2+ )为300〜1 000 mg/kg范围内逐渐降低，均 在***w***(Pb2+ )为1 000 mg/kg**(**T6)时值最小，分别为 0.05 mmol/(mz **•** s) , 234.73 pmol/mol 和 0.89 mmol/ (mz **•** s**),**均与CK差异极显著(***P***<0.01**).**

植物叶片的***P****”*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CO2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CO2浓度值（***C****,*）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CO2浓度值*（Ct）*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****”*）显著高于对照，说明气孔导度（***G****s*）仍然维持着 ＞300 mg/kg时，净光合速率（***P****”*）降低，伴随着胞间 CO2浓度值（***C****,*）和气孔导度（***G***,）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CO2的 利用率以抵御逆境， 促进植物生长［5］；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 ＋ 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［6］， 此 时叶绿体膜系统的 受 损和 类囊体的

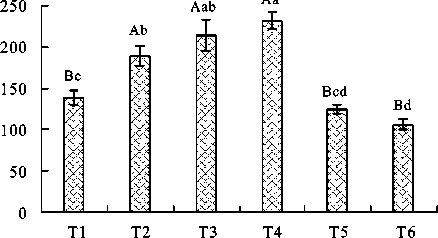
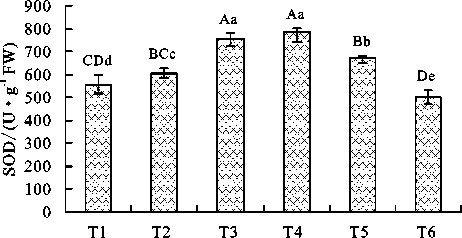
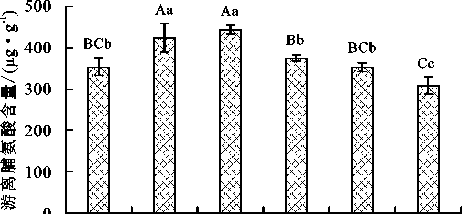
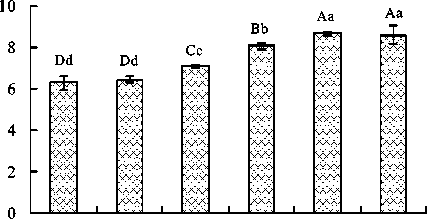
正常的光合作用 ， 此时没有限制光 合作用 ；当 铅浓度

T1 T2 T3 T4 T5 T6

破坏是导致光合作用下降的重要因素［7］。

T1 T2 T3 T4 T5

T6



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 | ***Pn***/  (jumol • m-2 • s-1) | ***Gs***/  (mmol • m-2 • s-1) | ***Ci***/  (#mol • mol-1) | ***Tr/***  (mmol • m-2 • s-1) |
| T1 | 8.36±0.0Bc | 0.1±0.01Bb | 370.02±19.93Ab | 1.98±0.10Bb |
| T | 9.38±0.06Aa | 0.0±0.01Bb | 364.3±10.64Aab | 1.93±0.10Bb |
| T3 | 8.76±0.39Bb | 0.3±0.01Aa | 398.99±18.61Aa | 222士 025Aa |
| 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 | 27020±1925BCd | 1.01±0.03Dd |
| T6 | 4.64±0.1Ef | 0.05±0.01Ee | 23427±1527Ce | 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 0.9和 0.6；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*** —般<1**。**

有研究a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*** = 0.8114**），**与叶绿素和光合指标均呈显著或极显著负 相关（相关系数*广*= 0.917 2）,说明枫香幼苗的根、茎**、** 叶在蓄积Pb2+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 | chia | chib | ***Pn*** | ***Gs C*** | |  | 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 |  |  |  |  |  |  |  |  |
| chia | 0.715 | 0.530 | 0.665 | —0.705 | 0.672 | 0.565 | 0.482 | 1 |  |  |  |  |  |  |  |
| chib | 0.777 | 0.294 | 0.557 | —0.968 | 0.628 | 0.357 | 0.068 | 0.835 | 1 |  |  |  |  |  |  |
| ***Pn*** | 0.913 | 0.471 | 0.684 | —0.927 | 0.832 | 0.559 | 0.223 | 0.809 | 0.941 | 1 |  |  |  |  |  |
| ***Gs*** | 0.906 | 0.595 | 0.790 | —0.873 | 0.792 | 0.609 | 0.374 | 0.861 | 0.937 | 0.944 | 1 |  |  |  |  |
| ***C*** | 0.927 | 0.624 | 0.821 | —0.853 | 0.808 | 0.598 | 0.370 | 0.809 | 0.915 | 0.933 | 0.994 | 1 |  |  |  |
| ***Tr*** | 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：Bi。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；Pr。为游离脯氨酸含量；POD为POD活性；SOD为SOD 活性；chia为叶绿素a含量；chib为叶绿素b含量；***P”***为净光合速率；***G,***为气扎导度；***C,***为胞间CO2浓度；*丁****，***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***“*** = 0.05时，***”*** = 0.811 4, \*表示显著相关（***P***<0.05）；***“*** = 0.01时，***”*** = 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****”、*

***G****,*、***C****,*和 八，特征值& 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*** < 001)。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

— 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***Pn***) | 0.931 | -0.307 | 0.316 | -0.198 |
| 气孔导度(***G***,) | 0.974 | -0.192 | 0.330 | -0.124 |
| 胞间CO：浓度(***C***) | 0.971 | -0.169 | 0.329 | -0.109 |
| 蒸腾速率(***Tr***) | 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。

SOD

**1.0**

**0.5**

**-0.5**

MAD

°可溶性蛋白

:POD

可溶性糖O 脯氨酸。

气孔导数 叶绿素a° 蒸腾速率7； °启

胞间CO?浓度o 净光合速率巴

叶绿素b

**-1.0**

**-0.5 0 0.5**

**-1.0**

**PC1(72.43%)**

图**3**与**PC1**和**PC2**有关的各因素载荷系数

**1.0**

**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：

*丫*(1) = 0.249***X***] +0.298***X***2 —0.265***X***3 + 0.323***X***12

第2 主成分：

*丫*(2) = 0.424***X***] +0.244***X***2 +0.394***X***3 + 0.143***X***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***(Pb2+ )=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 | n |
| 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 |

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****”*、***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 Pb2+ 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Pb2+主要蓄积于根部，且最 大的 TF 为029， 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 soilsofpaulowniufortunei (seem)hemsnearaPb/Zn smelterin 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 fl- uativetoxicityanditsassessmentin 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 理响应环境科学学报,2016,36(10)=387(^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 源选择中南林业科技大学学报,2019,39(3)4046.

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

1. 章芹, 薛建辉, 刘成刚 Cd2＋ 与 CTAB 复合污染对枫香 幼苗生长与生理生化特征的影响生态学报，2011, 31(19) 5824-5831
2. 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农业 环境科学学报,2018,37(4) 647-655
3. 施翔,王冬雪,王树凤,等 枫香幼苗对铅胁迫的生理生化 响应与元素分布林业科学研究,2019,32(4):88-95.
4. 杨敏文2快速测定植物叶片叶绿素含量方法的探讨 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

[5]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

1. 郑绍鑫,蒋林,滕维超,等 刨花润楠对硝酸铅胁迫的生长 和生理响应机制林业科技开发,2015,29(3):25-30.
2. 杨艺宁，李琬婷，黄晓霞，等 铅胁迫对洋常春藤生长及生 理特性的影响西部林业科学,2020,49(3):126-131.

[8]许大全.光质对植物生长发育的影响植物生理学 报，201551(8):1217-1234

1. AriagadaC A，Herrera M A，OcampoJA Contribu­tion of arbuscularmycorrhizal and saprobe fungi to the tolerance of Eucalyplus globulus to Pb [J]. Water Air andSoilPo**l**ution 2005 166(14):31-47
2. 杨丹慧 重金属离子对高等植物光合膜结构与功能的 影响植物学通报，1991,8(3):26-29.
3. 李永洁，李进，徐萍，等 黑果枸杞幼苗对干旱胁迫的生 理响应干旱区研究，2014,31(4):756-762.
4. 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福建农业学报，2019, 34(8):905-911
5. 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安徽农学通报，2018,24(6)： 94-96,103
6. 郭晖, 王妞, 张家洋 土壤重金属胁迫 下 3 种 观赏植 物 生理抗性西北林学院学报，2017,32(3):62-66,70.
7. 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

1. 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干旱区研究，2018,35 (4) 929-937
2. 周朝彬,胡庭兴, 胥晓刚, 等 铅胁迫对草木樨叶中叶绿 素含量和几种光合特性的影响四川农业大学学 报,2005,23(4):432-435
3. Baker AJ M Accumulatorsandexcluders-strategies intheresponseofplantstoheavy metals[J] Journalof Plant Nutrition, 1981,3(1/4) ：643-654.
4. McGrathSP, LombiE, GrayC W, et al Field evaluation of Cd and Zn phytoextraction potential by the hyperaccu- mulatorsThlaspicaerulescensand Arabidopsisha**l**er[J] EnvironmentalPo**l**ution,2006,141(1):115-125

[0] 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[]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 指标筛选核农学报，2018,32(3):591-599.