

中华金叶榆和水蜡对铅胁迫的生理生态响应*

崔 振¹, 李昌晓¹, 倪细炉², 李 健²

(1. 西南大学 生命科学学院 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715;

2. 宁夏林业科学研究所 种苗生物工程国家重点实验室, 银川 750004)

摘要:【目的】探究铅胁迫对两年生中华金叶榆(*Ulmus pumila* L. cv. jinye)和水蜡(*Ligustrum obtusifolium*)生理生态的影响, 选择适生树种修复中国西部的铅污染地区。【方法】通过将外源铅(三水合乙酸铅)加入到土壤中的方式设置3个铅胁迫处理组 T1, T2 和 T3 并分别施加相当于土壤中铅质量分数为 400, 800 和 1 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 外源铅; 并设置1个不施加外源铅的对照组(CK)。考察铅胁迫对这两个树种的生长、生理、铅耐受能力及铅积累特征的影响。【结果】中华金叶榆和水蜡的株高、生物量、耐性指数、净光合速率随土壤中铅质量分数的增加而下降; 中华金叶榆和水蜡体内的保护酶活性随土壤中铅质量分数的增加呈现先升高后降低的趋势; 中华金叶榆和水蜡幼树根、茎、叶中铅质量分数随着土壤中铅质量分数的增加而相应增加, 且均在各自的 T3 组中达到最大值。【结论】中华金叶榆在土壤中铅质量分数为 800 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对铅的耐受能力和转移能力较好, 适合在中国西部表层铅污染严重地区推广应用。然而, 水蜡在土壤中铅质量分数为 400 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时虽然也具有较高的铅耐受能力, 但相较于中华金叶榆而言, 它的各部分富集和转移铅的能力较差。

关键词: 铅胁迫; 中华金叶榆; 水蜡; 光合参数; 保护酶; 铅耐受能力; 铅积累特征

中图分类号: Q945.79; S718.43

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2018)02-0127-08

重金属污染问题在全球工业化迅猛发展的背景下已成为主要的环境问题之一。重金属可通过生物体的摄食进行富集, 并经过食物链的作用累加在人体中从而危害人类健康^[1]。铅作为常见的重金属污染物之一, 能够通过采矿、冶炼、污水灌溉、加铅汽油和油漆的使用等释放到环境中^[2]。随着中国西部大开发战略的深入实施, 中国西部典型代表城市如重庆市的表层土壤已出现铅的轻度污染现象, 并呈现持续的铅污染累加趋势^[3-4]; 因此当地的铅污染问题亟待解决。铅作为生物体新陈代谢的非必需元素具有难迁移、毒性强的特点, 一旦在土壤中累积会对生物体的生长造成极大影响^[5-6]。研究表明, 一定剂量的铅可影响植物根部对矿质营养元素的吸收, 由此使植物获得的生长所需营养成分减少, 进而限制植物生长, 甚至导致植物死亡^[7-9]。

在当前修复重金属污染土壤的技术中, 植物修复技术因具有治理成本低, 能够美化环境和适用时间长的优点得到广泛应用。植物修复技术是指利用绿色植物转移和容纳污染物, 降低重金属在土壤中的含量和有效性, 达到净化环境的目的^[10]。中华金叶榆(*Ulmus pumila* L. cv. jinye)属榆科(Ulmaceae)树种, 对寒冷和干旱的气候具有很强的适应能力, 同时具有很高的观赏价值和经济价值和耐盐碱能力^[11-12], 在中国东北、西北地区生长良好, 是目前中国西部地区彩叶树种中应用范围最广的一个, 常作为行道树和园林绿化的优良树种。水蜡(*Ligustrum obtusifolium*)为木犀科(Oleaceae)树种, 是重要的园林绿化植物, 兼有抗寒抗旱耐盐碱的优点, 对西部环境的适应能力强^[13-14]。然而, 至今一直未见这两个树种是否适合在铅污染土壤区栽植并应用到西部地区如重庆市的铅污染土壤绿化与生态修复中的相关报道。因此, 本研究以中华金叶榆和水蜡为材料, 考察铅胁迫对两年生的中华金叶榆和水蜡的生长、光合、生理、对铅耐受能力和铅积累特征的影响, 以探明这两个树种是否能够应用于中国西部的铅污染区域的生态修复工作中。

* 收稿日期: 2017-02-14 修回日期: 2018-01-24 网络出版时间: 2017-05-16 11:24

资助项目: 国家国际科技合作专项(No.2015DFA90900); 重庆市林业重点科技攻关项目(渝林科研 2016-8; 渝林科研 2015-6); 中央财政林业科技推广示范项目(渝林科推[2014-10])

第一作者简介: 崔振, 男, 研究方向为环境生态学, E-mail: 547889087@qq.com; 通信作者: 李昌晓, 教授, Lichangx@swu.edu.cn

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20170520.1124.020.html>

1 材料与方法

1.1 研究材料和实验设计

选取由银川市森森植物园提供的生长状况良好一致的中华金叶榆和水蜡两年生盆栽苗木做为实验材料。栽培土壤为沙壤土(加入沙的体积分数为 50%~60%)以模拟银川市当地植物生长的土壤类型。土壤中有有机质、全氮、全磷和全钾的质量分数分别为 9.42, 0.56, 0.91 和 20.65 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 碱解氮、有效磷和速效钾的质量分数分别为 76.6, 9.73 和 167.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤的 pH 为 8.7。土壤铅本底质量分数为 31.61 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。2015 年 5 月底, 将沙壤土过 4 mm 孔径筛, 然后将三水合乙酸铅作为外源铅并以溶液形式均匀喷洒于沙壤土内, 充分混合。在此过程中对每种材料各设置 3 个不同程度的铅胁迫处理组 T1, T2 和 T3, 分别施加相当于风干土壤中铅质量分数为 400, 800 和 1 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的外源铅; 同时也各设置 1 个对照组(CK), 土壤中不施加外源铅。上述用于铅胁迫处理的土壤经过 30 d 陈化后, 装入高×内径为 30 cm×30 cm 的塑料桶中, 每桶装土 7.5 kg。每种材料的每个处理组均配有 5 个桶, 桶中准备只栽 1 株植株。于同年 7 月初选取生长基本一致的两种实验材料随机移栽入上述塑料桶中, 置于银川市森森植物园种苗生物工程国家重点实验室实验基地中棚顶透明、四周开敞的实验大棚下, 在常规田间浇水管理 90 d 后进行研究指标的测定。

1.2 研究指标

1.2.1 生长和生物量 在生物量测定前, 用直尺测量材料株高。为去除植物表面吸附的重金属, 所收获的植物全株用 20 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙二胺四乙酸二钠溶液浸泡 5 min 并用超纯水洗净。然后, 将植株按根、茎、叶分为 3 部分封装, 放入 80 $^{\circ}\text{C}$ 烘箱, 烘干至恒质量后测量植株各部分的生物量。

1.2.2 光合参数 采用 GFS-3000 便携式光合作用仪(WALZ Co., Germany)测量实验材料的光合参数。以预备实验为基础, 设置的饱和光强为 1 000 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, 叶室温度为 25 $^{\circ}\text{C}$, CO_2 体积分数为 4×10^{-6} 。在光合测定前, 先用饱和光对植物叶片进行 30 min 光诱导。光合参数的测定时间为 9:00—11:00。以实验材料植株顶端往下数第 3 或第 4 片健康成熟的功能叶片中部作为测量位置。测定的主要光合参数包括净光合速率、气孔导度、胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率, 并参照文献[15]计算气孔限制值。

1.2.3 保护酶活性 取植株相同叶位的叶片测定保护酶活性, 其中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性的定义及测定、计算的具体方法参考文献[16], 而抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的定义及测定、计算的具体方法参考文献[17]。

1.2.4 植物体中的铅质量分数 将 1.2.1 部分所述的烘干样品使用球磨仪粉碎, 称取粉碎后的样品 0.050 g 使用微波消解仪(Leeman SW-4, Germany)进行消解, 采用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES, Thermo-Fisher iCAP 6300, UK)测量消解液中二价铅离子的质量浓度, 并计算烘干样品中铅的质量分数(单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

1.3 参数计算

参照 Wilkins^[18]的方法计算植物对重金属的耐性指数, 具体公式为 $V_{\text{TI}} = [(V_{\text{LR}} + V_{\text{LS}} + V_{\text{WS}} + V_{\text{WR}}) / 4] \times 100\%$ 。式中: V_{TI} 为耐性指数; V_{LR} , V_{LS} , V_{WS} 和 V_{WR} 分别为铅胁迫处理组平均总根长、主茎高度增长量、地上部分和根的平均生物量与对照组相应指标的比值。植物将铅转移到地上部分的能力用转移系数来表示, 该系数等于植物地上部分含铅量与植物根中含铅量的比值^[19]。

1.4 数据处理

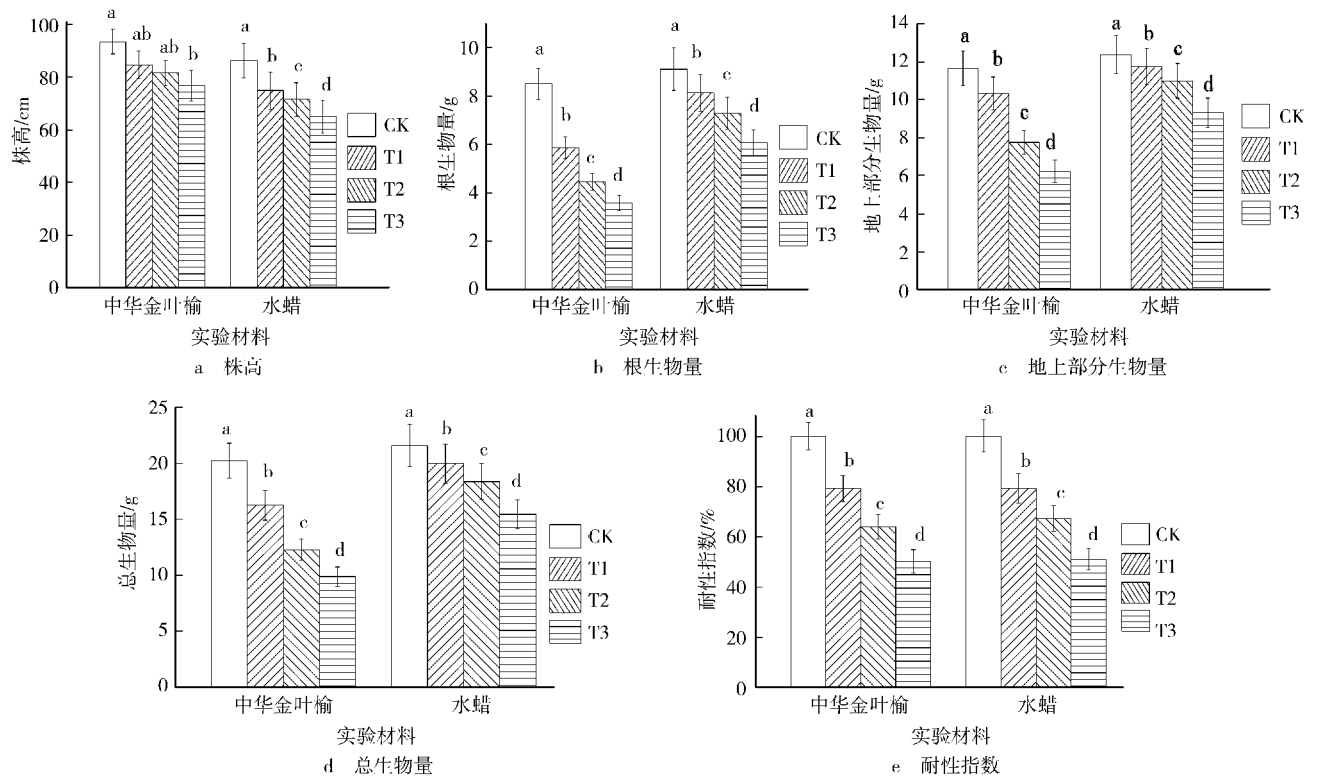
用 Excel 2010 软件对研究指标数据进行初步整理计算, 以“平均值±标准误”表示。用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)以研究铅胁迫对两种实验材料各研究指标的影响; 并采用 Duncan 法对各处理组的研究指标数据进行多重比较; 当 $p < 0.05$ 时, 统计结果具有统计学意义。用 Origin 8.5 软件进行作图。

2 结果

2.1 对生长和生物量的影响

如图 1a 所示, 中华金叶榆 CK, T1 和 T2 组的株高无统计学意义上的差异, 而 T3 组的株高明显较 CK 组的更低(为 CK 组株高的 82%), 在 $p < 0.05$ 水平上具有统计学意义。中华金叶榆 T3 组根系、地上部分以及总的生

物量在 4 个处理组的相应指标中均为最小值,且与 CK 组这些指标的差异均具有统计学意义($p < 0.05$)(图 1b-d)。铅胁迫对水蜡的株高增长和生物量积累也具有抑制作用(图 1a-d);水蜡 T1, T2 和 T3 组的株高、根系、地上部分以及总的生物量与 CK 组的这几项指标相比均有统计学意义上的降低($p < 0.05$),且 T3 处理组的这 4 项指标均为最小值。随着土壤中铅质量分数的增加,中华金叶榆和水蜡的耐性指数均呈现降低趋势,且各处理组该项指标间的差异均具有统计学意义($p < 0.05$);中华金叶榆 T1, T2 和 T3 组的耐性指数比 CK 组的耐性指数分别降低了 21%, 36% 和 50%;水蜡 T1, T2 和 T3 组的耐性指数比 CK 组的耐性指数分别降低了 21%, 33% 和 49%(图 1e)。



注:不同小写字母表示同一实验材料的各处理组数据间有统计学意义上的差异($p < 0.05$),下同。

图 1 铅胁迫对中华金叶榆和水蜡株高、生物量和耐性指数的影响

Fig. 1 Effects of lead stress on plant height, biomass, and tolerance index of *U. pumila* "Jinye" and *L. obtusifolium*

2.2 对光合参数的影响

如图 2a 所示,随着土壤中铅质量分数的增加,中华金叶榆和水蜡的净光合速率呈明显下降趋势。中华金叶榆 T1, T2 和 T3 组的净光合速率与 CK 组的净光合速率相比分别下降了 17%, 38% 和 41%,且与 CK 组净光合速率的差异均具有统计学意义($p < 0.05$);同样地,水蜡 T1, T2 和 T3 组的净光合速率与 CK 组的净光合速率相比分别下降了 31%, 49% 和 64%,且与 CK 组净光合速率的差异均具有统计学意义($p < 0.05$)。

中华金叶榆和水蜡的气孔导度和蒸腾速率随土壤铅质量分数的增大均呈下降趋势(图 2b-c)。中华金叶榆和水蜡的各处理组这两项指标间均有统计学意义上的差异($p < 0.05$)。

图 2d-e 显示,中华金叶榆的胞间 CO_2 浓度随土壤中铅质量分数的增加而降低,气孔限制值则呈现上升趋势,其中 T1 和 T2 组的胞间 CO_2 浓度和气孔限制值无统计学意义上的差异($p < 0.05$)。水蜡的胞间 CO_2 浓度随土壤中铅质量分数的增加先降低后升高;相反地,水蜡的气孔限制值则随土壤中铅质量分数的增加先升高后降低。水蜡的 T1 和 T2 组胞间 CO_2 浓度较 CK 组的更低, T3 组胞间 CO_2 浓度较 CK 组的更高, 3 个铅胁迫处理组与 CK 组相比在该项指标上的差异具有统计学意义($p < 0.05$)。此外,水蜡 T1 和 T2 组的气孔限制值较 CK 组的更高, T3 组气孔限制值较 CK 组的更低, 3 个铅胁迫处理组与 CK 组相比在该项指标上的差异也具有统计学意义($p < 0.05$)(图 2d-e)。

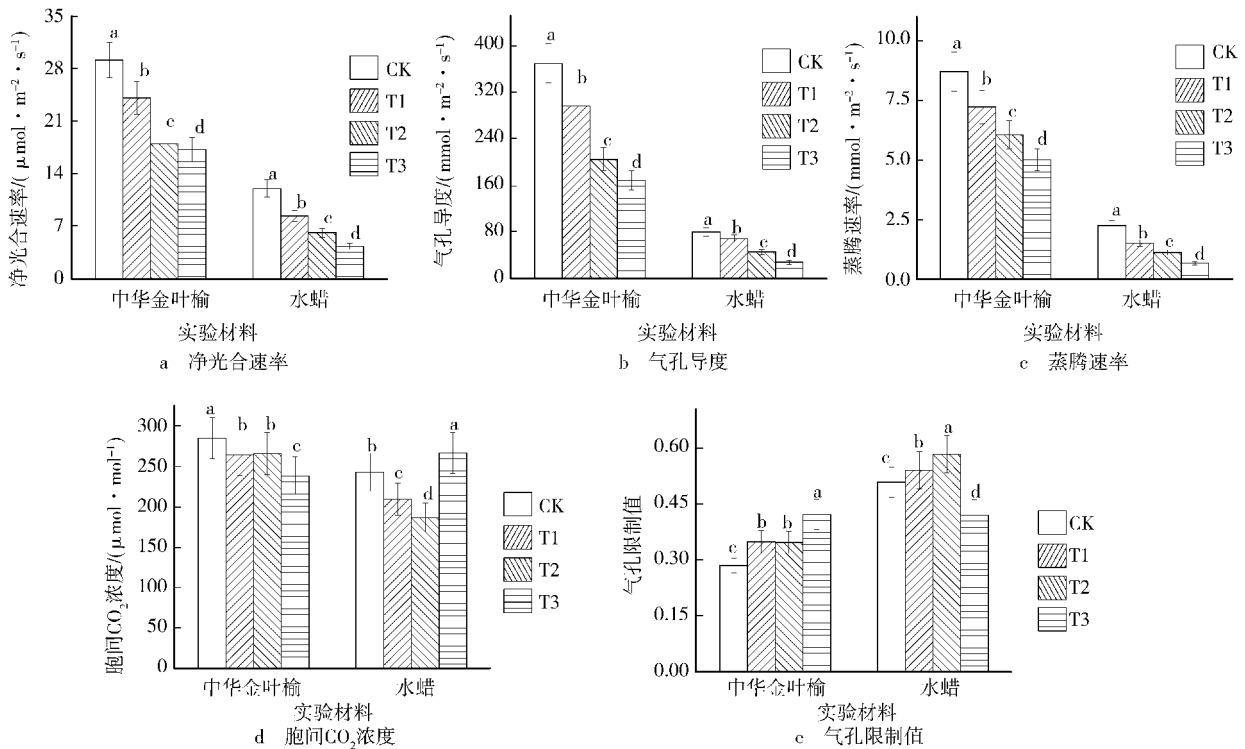


图 2 铅胁迫对中华金叶榆和水蜡光合参数的影响

Fig. 2 Effects of lead stress on photosynthetic parameters of *U. pumila* "Jinye" and *L. obtusifolium*

2.3 对保护酶活性的影响

图 3a-d 显示:随土壤中铅质量分数的增加,中华金叶榆和水蜡叶片中保护酶活性均呈现先升高后降低的趋势。中华金叶榆 T2 组叶片 SOD, POD 和 APX 活性分别为 CK 组的这 3 项指标的 338%, 247% 和 699%, 在 4 个处理组的这 3 项指标中均为最大值;同样地,中华金叶榆 T1 组叶片 CAT 活性大于其他 3 个处理组的 CAT 活性。此外,水蜡 T1 组叶片 SOD, POD, CAT, APX 活性分别为 CK 组的这 4 项指标的 426%, 257%, 176% 和 178%, 在 4 个处理组的这 4 项指标中均为最大值。

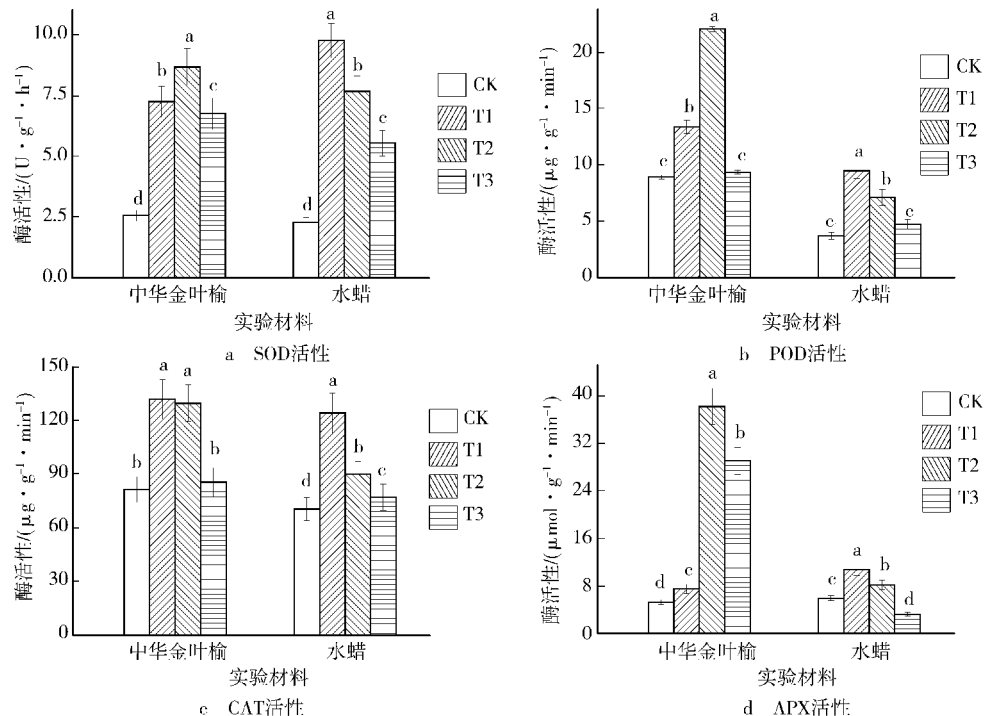


图 3 铅胁迫对中华金叶榆和水蜡保护酶活性的影响

Fig. 3 Effects of lead stress on activities of protective enzymes of *U. pumila* "Jinye" and *L. obtusifolium*

2.4 根、茎、叶中的铅质量分数

图 4a-c 显示:中华金叶榆和水蜡的根、茎、叶中累积的铅质量分数随着土壤铅质量分数的增加而增加,且两种实验材料这 3 项指标均在 T3 组中达到最大值。中华金叶榆 T3 组根、茎和叶累积的铅质量分数分别为 285.35,

27.09, 21.06 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而水蜡 T3 组根、茎、叶累积的铅质量分数分别为 248.65, 12.11, 2.52 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。中华金叶榆和水蜡的 T1, T2 和 T3 组中均为根的铅质量分数最高, 茎的的铅质量分数次之, 叶的铅质量分数最低; 并且在同一铅胁迫处理下, 中华金叶榆各部分累积的铅质量分数均比水蜡各部分的更高。图 4d 显示, 中华金叶榆和水蜡的转移系数随土壤中铅质量分数的增加呈现先升高后降低的趋势; 中华金叶榆 T1 组的铅转移系数为 0.161, 达到最大值; 水蜡 T2 组的铅转移系数为 0.197, 达到最大值。

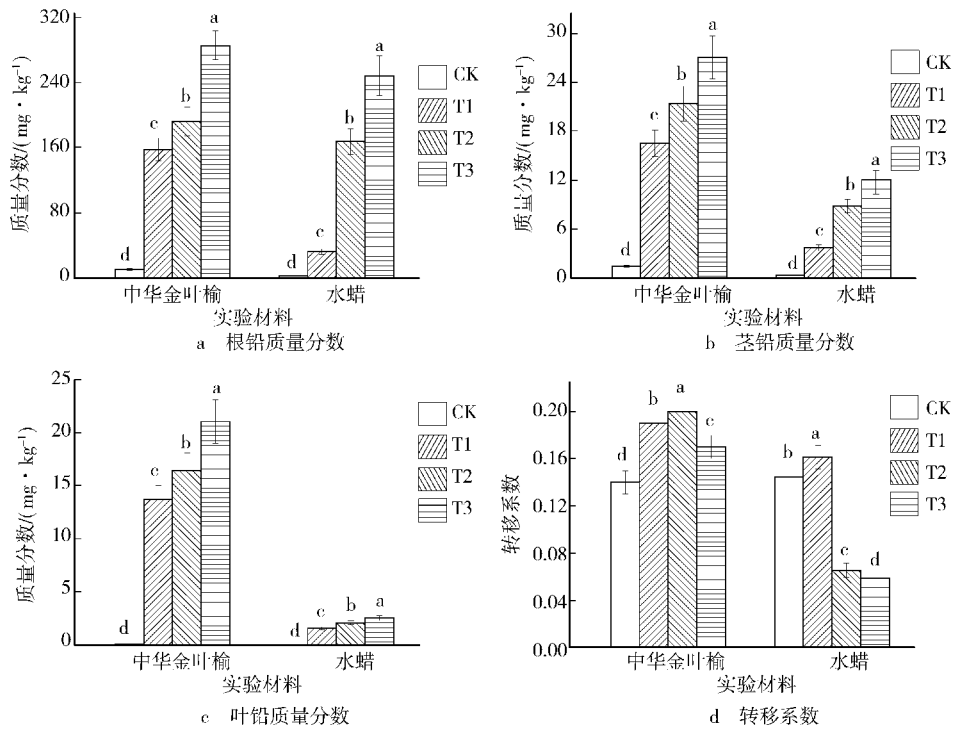


图 4 中华金叶榆和水蜡根、茎、叶中铅质量分数及转移系数

Fig. 4 Lead mass fraction in root, stem, and leaf of *U. pumila* "Jinye" and *L. obtusifolium* and their translocation factors

3 讨论和结论

3.1 铅胁迫对中华金叶榆和水蜡生长和生物量的影响

存在于土壤环境中的重金属污染物如铅可被植物根部的吸收作用富集在植物体内^[20]。当植物体内的含铅量超过一定阈值时会对植物体产生危害作用, 最直观的表现在于植物体生长由此产生的变化。本研究中, 随土壤中铅质量分数的增加, 生长 90 d 的中华金叶榆和水蜡生物量和株高均呈现下降趋势, 这与前人对生长在铅土壤中茶树(*Camellia sinensis*)、沉香木(*Excoecaria agallocha*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)^[21-23]的研究结果一致。土壤中铅质量分数过高时抑制中华金叶榆和水蜡的生长, 造成植物体根部吸收和运输营养物质的能力降低, 根部生长受到抑制, 导致植物地上部分的光合作用受限, 对植物产生毒害作用^[24]。

耐性指数能够反应植物对重金属耐性能力的大小。Lux 等人^[25]的研究结果表明: 当耐性指数小于 35 时, 植物对重金属表现为敏感型; 当耐性指数大于 35 并小于 60 时, 植物对重金属表现为中等程度耐受性; 当耐性指数大于 60 时, 植物对重金属表现为高耐受性。本研究发现: 当土壤中铅质量分数分别为 400, 800 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 中华金叶榆耐性指数分别为 CK 组的 79%, 64%, 水蜡耐性指数分别为 CK 组的 79%, 67%; 两者均对铅表现为高耐受性。

3.2 铅胁迫对中华金叶榆和水蜡气体交换参数的影响

光合作用为植物提供能量和物质来源, 对植物的生长发育具有极为重要的作用^[26]。植物的光合组织对外界环境变化较为敏感, 当植物遭受重金属胁迫时, 就会出现如叶绿素结构损坏、气孔关闭等现象, 进而影响植物的光合作用^[27]。Farquhar 等人^[15]报道, 当胞间 CO_2 浓度升高而净光合速率、气孔限制值下降时, 非气孔限制因素会降低植物的光合速率, 而当胞间 CO_2 浓度、净光合速率下降而气孔限制值增大时, 气孔导度的降低成为净光合速率下降的主要原因。在本研究中, 当土壤中铅质量分数分别为 400, 800 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 中华金叶榆和水蜡叶片出现气孔关闭, 导致两者净光合速率下降。而当土壤中铅质量分数为 1 200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 非气孔因素如叶肉细胞受到损伤、类囊体遭到破坏等原因造成水蜡净光合速率的降低。在同等程度铅胁迫处理下, 中华金叶榆的净光合速率始终大于水蜡, 说明中华金叶榆相较于水蜡在光合作用方面对铅有更好的耐受性。

3.3 铅胁迫对中华金叶榆和水蜡叶片保护酶活性的影响

重金属的胁迫作用能够引起植物体内氧自由基的产生^[28]。当植物体内氧自由基产生与清除达不到平衡状

态时,会对植物细胞产生氧化胁迫,造成细胞膜的脂质过氧化作用,对植物细胞产生损伤^[29]。植物体为抵御氧化胁迫进化出一套抗氧化防御机制^[30]。植物的保护酶系统包括超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶、抗坏血酸过氧化物酶等多种抗氧化酶,能够将植物体内产生的超氧阴离子催化形成过氧化氢分子并进而还原成水分子,有效避免植物体内超氧阴离子和过氧化氢分子积累过多而对植物细胞产生危害作用^[31]。与前人的研究结果相一致^[32-34],随着土壤中铅质量分数的增加,中华金叶榆和水蜡体内超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶和抗坏血酸过氧化物酶活性均呈现先增加后降低的趋势。中华金叶榆和水蜡分别在土壤中铅质量分数为 800, 400 mg · kg⁻¹ 时具有最高的保护酶活性,表明此时两者体内具有最佳的保护酶响应与自我保护体制。

3.4 中华金叶榆和水蜡根、茎、叶的铅质量分数及转移系数

植物为避免吸收的重金属对地上部分产生危害常将重金属固定在根部^[35]。本研究中,中华金叶榆和水蜡体内累积的铅质量分数均表现为根内最高,茎内次之,叶内最低,这说明中华金叶榆和水蜡也是采用将铅累积在根部的策略从而避免铅危害地上部分。植物根吸收的重金属在运输过程中会通过细胞间隙和细胞壁向根内部运输至内皮层,内皮层中因存在栓质化和木质化的凯氏带从而阻碍重金属向地上部分转移^[36]。重金属还可通过蒸腾拉力的作用向地上部分的转移,而在本研究中,随土壤中铅质量分数的增加,中华金叶榆和水蜡的蒸腾速率均呈现下降趋势,这对铅向地上部分的转移也起到了限制作用。在相同程度的铅胁迫处理下,中华金叶榆各部分累积的铅质量分数和转移系数比水蜡的更高,说明中华金叶榆具有更高的铅累积能力和向地上部分转移铅的能力。

本研究中,铅胁迫对中华金叶榆和水蜡的生长和光合作用有限制作用,但提高了植物体内的保护酶活性。当土壤中铅质量分数为 800 mg · kg⁻¹ 时,中华金叶榆对铅的耐受能力和转移能力较好,适合在中国西部表层铅污染严重地区推广应用。水蜡在铅质量分数为 400 mg · kg⁻¹ 的土壤中生长期虽然也具有较高的铅耐受能力,但相较于中华金叶榆而言,它的各部分富集和转移铅的能力较差。

参考文献:

- [1] POURRUT B, SFSSFSID M, DUMAT C, et al. Lead uptake, toxicity, and detoxification in plants[J]. *Reviews of Environmental Contamination & Toxicology*, 2011, 213: 113-136.
- [2] SHEN Z, LI X, WANG C, et al. Lead phytoextraction from contaminated soil with high-biomass plant species[J]. *Journal of Environment Quality*, 2002, 31(6): 1893.
- [3] 王博, 夏敦胜, 余晔, 等. 典型沙漠绿洲城市表土磁性特征及环境指示意义[J]. *地球物理学报*, 2014(3): 891-905.
WANG B, XIA D S, YU Y, et al. Magnetic properties of urban soils from typical oasis cities and their environmental implications[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2014(3): 891-905.
- [4] 王幼奇, 白一茹, 王建宇. 基于 GIS 的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征[J]. *环境科学*, 2016(2): 710-716.
WANG X Q, BAI Y R, WANG J Y. Distribution of urban soil heavy metal and pollution evaluation in different functional zones of Yinchuan city[J]. *Environmental Science*, 2016(2): 710-716.
- [5] SHAHID M, ARSGAD M, KAEMMERER M, et al. Long-term field metal extraction by pelargonium: phytoextraction efficiency in relation to plant maturity [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(5): 493-505.
- [6] SCHRECK E, FOUCAULT Y, SARRET G, et al. Metal and metalloid foliar uptake by various plant species exposed to atmospheric industrial fallout: mechanisms involved for lead[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 427/428(12): 253-262.
- [7] FARGASOVA A. Phytotoxic effects of Cd, Zn, Pb, Cu and Fe on *Sinapis alba* L. seedlings and their accumulation in roots and shoots[J]. *Biologia Plantarum*, 2001, 44(3): 471-473.
- [8] SHARMA P, DUBEY R S. Lead toxicity in plant[J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, 17(1): 35-52.
- [9] WSHSHA M, BINI C, FONTANA S, et al. Toxicity assessment of contaminated soils from a mining area in Northeast Italy by using lipid peroxidation assay[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 113(1): 112-117.
- [10] 胡蝶, 陈文清. 土壤重金属污染现状及植物修复研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(5): 2706-2707.
XU D, CHEN W Q. Research progress on the soil heavy metal pollution status and phytoremediation[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(5): 2706-2707.
- [11] 曹书敏, 杨晴, 杨俊明, 等. 家榆和金叶榆光合·蒸腾及荧光参数对水分胁迫的响应[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(22): 13477-13480.
CAO S M, YANG Q, YANG J M, et al. Research on the response of the photosynthesis, transpiration and fluorescence index of *Ulmus pumila* L. and *Ulmus pumila* cv.

- jinye to water stress[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(22): 13477-13480.
- [12] 段龙飞, 尚爱芹, 杨敏生, 等. 中华金叶榆不同无性系光合特性和叶绿素荧光参数日变化研究[J]. 中国农业科技导报, 2014(6): 21-27.
DUAN L F, SHANG A Q, YANG M S, et al. Studies on diurnal variations of photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of different clones of *Ulmus pumila* cv. 'Zhonghua jinye'[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2014(6): 21-27.
- [13] 闫兴富, 周立彪, 祁金涛. 水蜡树种子的萌发对不同光照强度遮荫的反应[J]. 种子, 2009, 28(1): 40-43.
YAN X F, ZHOU L B, QI J T. Response of seed germination of *Ligustrum obtusifolium* to shading treatments of different light gradients[J]. Seed, 2009, 28(1): 40-43.
- [14] 冯海华. 水蜡树的观赏特性及在城市绿化中的应用[J]. 河北林业科技, 2013(4): 92-93.
FENG H H. Ornamental characteristics and application in urban greening of *Ligustrum obtusifolium*[J]. The Journal of Hebei Forestry Science and Technology, 2013(4): 92-93.
- [15] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Annual Reviews of Plant Physiology, 1982, 33(1): 317-345.
- [16] 李合生, 孙群, 赵世杰. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-261.
LI H S, SUN Q, ZHAO S J. Principle and technology of plant physiological and biochemical experiments [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-261.
- [17] ELAVARTHI S, MARTIN B. Spectrophotometric assays for antioxidant enzymes in plants [J]. Methods in Molecular Biology, 2010, 639: 273-281.
- [18] WILKINS D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth [J]. New Phytologist, 1978, 80(3): 623-633.
- [19] ZACCHINI M, PIETRINI F. Metal tolerance, accumulation and translocation in poplar and willow clones treated with cadmium in hydroponics [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2009, 197(1/2/3/4): 23-34.
- [20] EICK M J, PEAK J D, BRADY P V, et al. Kinetics of lead adsorption/desorption on goethite: residence time effect [J]. Soil Science, 1999, 164(1): 28-39.
- [21] 夏建国, 兰海霞, 吴德勇. 铅胁迫对茶树生长及叶片生理指标的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1): 43-48.
XIA J G, LAN H X, WU D Y. Lead stress on growth of tea trees and physiological index in leaves of Tea [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(1): 43-48.
- [22] YAN Z, TAM N F Y. Effects of lead stress on anti-oxidative enzymes and stress-related hormones in seedlings of *Excoecaria agallocha* Linn [J]. Plant and Soil, 2013, 367(1): 327-338.
- [23] MAHDAVIAN K, GHADERIAN S M, SCHAT H. Pb accumulation, Pb tolerance, antioxidants, thiols, and organic acids in metallicolous and non-metallicolous *Peganum harmala* L. under Pb exposure [J]. Environmental & Experimental Botany, 2016, 126: 21-31.
- [24] GRATAO P L, POLLE A, AZEVEDO R A, et al. Making the life of heavy metal-stressed plants a little easier [J]. Functional Plant Biology, 2005, 32(6): 481-494.
- [25] LUX A, SOTTHIKOVA A, OPATRNA J, et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity [J]. Physiologia Plantarum, 2004, 120(4): 537-545.
- [26] 程建峰, 陈根云, 沈允钢. 植物叶片特征与光合性能的关系 [J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 466-473.
CHENG J F, CHEN G Y, SHEN Y G. Relational analysis of leaf characteristics and photosynthetic capacities of plants [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(4): 466-473.
- [27] BERTRAND M, POIRIER I. Photosynthetic organisms and excess of metals [J]. Photosynthetica, 2005, 43(3): 345-353.
- [28] WANG C, TIAN Y, WANG X, et al. Lead-contaminated soil induced oxidative stress, defense response and its indicative biomarkers in roots of *Vicia faba* seedlings [J]. Ecotoxicology, 2010, 19(6): 1130-1139.
- [29] TRIGUEROS D, MINGORANCE M D, OLIVA S R. Evaluation of the ability of *Nerium oleander* L to remediate Pb-contaminated soils [J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 114(2): 126-133.
- [30] SHAHID M, DUMAT C, POURRUT B, et al. Influence of EDTA and citric acid on lead-induced oxidative stress to *Vicia faba* roots [J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, 14(4): 835-843.
- [31] 严重玲, 洪业汤. Cd, Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响 [J]. 生态学报, 1997, 17(5): 488-492.
YAN C L, HONG Y T. Effect of Cd, Pb stress on scavenging system of activated oxygen in leaves of tobacco [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(5): 488-492.
- [32] 何冰, 何计兴, 何新华, 等. 铅胁迫对杨梅生理特性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1263-1268.
HE B, HE J X, HE X H, et al. Effects of Lead on physiological characteristics of baylerry (*Myrica rubra*) seedlings [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(6): 1263-1268.
- [33] 韩志萍, 杨志红, 吴湘, 等. 铅胁迫对芦竹抗氧化酶活性的影响 [J]. 核农学报, 2010, 24(4): 846-850.

- HAN Z P, YANG Z H, WU X, et al. Effects of lead stress on antioxidant enzymes activities in *Arundo donax* Linn [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2010, 24(4): 846-850.
- [34] 邹朋, 王进鑫, 张青, 等. 水分和铅交互胁迫对侧柏幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(1): 125-129.
- ZOU P, WANG J X, ZHANG Q, et al. Effects of interactive stress of drought and lead on antioxidant enzyme activity of *Platycladus orientalis* seedlings[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(1): 125-129.
- [35] STOLTZ E, GREGER M. Accumulation properties of As, Cd, Cu, Pb and Zn by four wetland plant species growing on submerged mine tailings[J]. Environmental and Experimental Botany, 2002, 47(3): 271-280.
- [36] SEREGIN I V, SHPIGUN L K, LVANOV V B. Distribution and toxic effects of cadmium and lead on maize roots [J]. Russian Journal of Plant Physiology, 2004, 51(4): 525-533.

Physiological Ecological Responses of *Ulmus pumila* “Jinye” and *Ligustrum obtusifolium* to Lead Stress

CUI Zhen¹, LI Changxiao¹, NI Xilu², LI Jian²

(1. Key Laboratory of Eco-Environments of the Three Gorges Reservoir Region of Ministry of Education, School of Life Science, Southwest University, Chongqing 400715; 2. The State Key Laboratory of Seedling Bioengineering, Ningxia Forestry Institute, Yinchuan 750004, China)

Abstract: [Purposes] In order to reveal the physiological ecological responses of two years old *Ulmus pumila* “Jinye” and *Ligustrum obtusifolium* saplings to lead stress and provide reference for repair lead pollution in the western region of China. [Methods] Three different kinds of lead treatment were applied which include T1 (400 mg · kg⁻¹), T2 (800 mg · kg⁻¹), T3 (1 200 mg · kg⁻¹) through adding exogenous lead to the soil; set up the control group CK (0 mg · kg⁻¹, control) no exogenous additions. The effects of growth, physiology, capacity of lead tolerance, characteristics lead accumulation of *U. pumila* “Jinye” and *L. obtusifolium* seedlings was investigated under lead stress. [Findings] The plant height, biomass, tolerance index, net photosynthetic rate of *U. pumila* “Jinye” and *L. obtusifolium* decreased with the lead mass fraction in soil raised. The activities of protective enzymes in leaves of *U. pumila* “Jinye” and *L. obtusifolium* presented the same trends. Activities of superoxide dismutase, peroxidase, catalase, and ascorbate peroxidase raised at first, then decreased with the lead mass fraction in soil raised. Lead mass fraction of root, stem and leaf of *U. pumila* “Jinye” and *L. obtusifolium* reached the peak at T3. [Conclusions] *U. pumila* “Jinye” seedlings had a high capacity of growth adaptation, tolerance and translocation under 800 mg · kg⁻¹ lead stress, so *U. pumila* “Jinye” had more considerable potential application to those lead contaminated areas in the western region of China. *L. obtusifolium* seedlings had a high capacity of growth adaptation, tolerance under 400 mg · kg⁻¹ lead stress, but had a worse capacity of lead accumulation and lead translocation contrast with *U. pumila* “Jinye”.

Keywords: lead stress; *Ulmus pumila* “Jinye”; *Ligustrum obtusifolium*; photosynthetic parameters; protective enzymes; capacity of lead tolerance; characteristics lead accumulation

(责任编辑 方 兴)