

引用格式:

黄筱涵, 宋思情, 龙丽君, 马英姿. 铅锌胁迫对凹叶厚朴幼苗生长及铅锌积累的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2023, 49(6): 667–674.

HUANG X H, SONG S Q, LONG L J, MA Y Z. Effects of lead and zinc stress on the growth and their accumulation characteristics of seedlings of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba*[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2023, 49(6): 667–674.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



铅锌胁迫对凹叶厚朴幼苗生长及铅锌积累的影响

黄筱涵, 宋思情, 龙丽君, 马英姿*

(中南林业科技大学生命科学与技术学院, 湖南 长沙 410004)

摘要:以凹叶厚朴盆栽幼苗为试验对象,设计 Pb、Zn 单一胁迫 200 mg/kg(P1、Z1)、400 mg/kg(P2、Z2)、600 mg/kg (P3、Z3)、800 mg/kg (P4、Z4)及复合胁迫(100+100) mg/kg (M1)、(200+200) mg/kg(M2)、(300+300) mg/kg (M3)、(400+400) mg/kg (M4),以不加 Pb、Zn 处理为对照(CK),共 13 个处理,研究处理 90 d 后凹叶厚朴的生长、生理及铅锌累积变化特征。结果表明:P1、P2、M2 处理可使凹叶厚朴幼苗地径增粗,地上及地下部分干质量增加;P4、Z4 处理下叶片光合色素含量降至最低,复合胁迫下叶片光合色素含量均低于 CK;各胁迫处理下,凹叶厚朴叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性以及可溶性糖、可溶性蛋白及游离脯氨酸含量均高于 CK;在 3 种胁迫方式下,凹叶厚朴叶片丙二醛含量随着胁迫浓度增加均处于上升趋势,P4、Z4、M4 的丙二醛含量分别较对照增加了 41.36%、17.28%、35.80%,植株受损害程度逐渐加深;随着胁迫浓度的增加,植株的地上部分与根部 Pb、Zn 含量均逐渐增加,Pb、Zn 转移系数呈降低趋势,Pb、Zn 主要积累在根部。综合各指标的分析结果,凹叶厚朴对 Pb、Zn 胁迫有较强的耐受性,具有修复 Pb、Zn 污染土壤的应用潜力。

关键词:凹叶厚朴;铅;锌;生长;生理;转移系数

中图分类号: S567.1+1; X53

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2023)06–0667–08

Effects of lead and zinc stress on the growth and their accumulation characteristics of seedlings of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba*

HUANG Xiaohan, SONG Siqing, LONG Lijun, MA Yingzi*

(College of Life Sciences and Technology, Central South University of Forestry & Technology, Changsha, Hunan 410004, China)

Abstract: Pb, Zn single stresses of 200 (P1, Z1), 400 (P2, Z2), 600 (P3, Z3), and 800 (P4, Z4) mg/kg and composite stresses of 100+100(M1), 200+200(M2), 300+300(M3), and 400+400(M4) mg/kg were set in this study using the potted seedlings of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba*, and no Pb, Zn treatment as control(CK). A total of 13 treatments with different concentrations of Pb and Zn were designed to investigate the growth, physiological and lead and zinc accumulation characteristics of Pb and Zn seedlings after 90 d of treatment. The results showed that P1, P2, M2 treatments could increase the diameter, dry masses of above and below ground parts of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* seedlings. The contents of leaf photosynthetic pigments decreased to the lowest under P4 and Z4 treatments, and the contents of leaf photosynthetic pigments under combined stress were lower than that of CK. The activities of superoxide dismutase(SOD) and peroxidase(POD), soluble sugars, soluble proteins and free proline contents of leaves of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba*. were higher than those of CK under all stress treatments. Compared with the control, the malondialdehyde contents of Pb and Zn stresses increased by 41.36%, 17.28% and 35.80%, respectively, with the concentrations of Pb and Zn were 800 mg/kg and the compound concentration was (400+400) mg/kg, and the plants were

收稿日期: 2023–04–23

修回日期: 2023–11–28

基金项目: 湖南省自然科学基金项目(2020JJ4939)

作者简介: 黄筱涵(1998—),女,陕西安康人,硕士研究生,主要从事植物生物学研究,1281926427@qq.com; *通信作者,马英姿,博士,教授,主要从事植物生物学研究,ma_yingzi@163.com

gradually damaged. With the increase of stress concentration, the Pb and Zn contents of both above-ground parts and roots of the plant gradually increased, but Pb and Zn mainly accumulated in the roots, and the Pb and Zn transport factors showed a decreasing trend. The analysis of all indicators showed that Pb and Zn stresses were highly tolerated by *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* and had potential for remediation of Pb and Zn contaminated soil.

Keywords: *Magnolia officinalis* subsp. *biloba*; lead; zinc; growth; physiology; transfer factor

铅(Pb)可影响植物生理代谢过程,当其体内Pb积累量超过一定限度时,可抑制植物生长发育,甚至导致植物死亡^[1]。锌(Zn)是Pb的伴生金属,也是植物生长发育的必需元素,但植物对Zn的需求量一般为20~80 mg/kg^[2],超过植物所需量就会对自身及其所生存的环境产生危害^[3];因此,如何有效修复铅锌污染土壤已成为当前亟需解决的问题。植物修复技术是利用植物及共存微生物体系来移除、降低、降解或固定环境中污染物^[4],具有经济、安全、高效等优势。修复植物应当具备生物量大、根系发达及耐高浓度重金属等特点,目前已报道过的乔木如杨树^[5]、八仙花(*Hydrangea macrophylla*)^[6]、香樟(*Cinnamomum camphora*)^[7]等,灌木如盐肤木(*Rhus chinensis*)^[8]、山苍子(*Litsea cubeba*)^[9]、伞房决明(*Cassia corymbosa*)^[10]等,草本如野胡萝卜(*Daucus carota*)^[11]、大叶落地生根(*Kalanchoe daigremontiana*)^[12]等都具有良好的修复功能。

凹叶厚朴(*Magnolia officinalis* subsp. *biloba*)为木兰科(Magnoliaceae)木兰属(*Magnolia*)高大落叶乔木,其树形高大,根系发达,适应性强,在退耕还林和水土保持等造林工程中被广泛培育,对生态环境治理有重要作用^[13]。调查^[14]发现,凹叶厚朴在重金属矿区有零星分布;也有研究^[15]表明,凹叶厚朴可耐高浓度镉胁迫。关于凹叶厚朴的研究主要集中在造林技术^[16]、组织培养^[17]、有效成分的作用^[18]等方面,对于其抗逆性等生态适应性的研究较少。笔者主要研究Pb、Zn胁迫下凹叶厚朴盆栽幼苗生长、生理及重金属含量特征的变化规律,探讨凹叶厚朴对重金属胁迫的耐受性和累积特征,旨在为科学评估凹叶厚朴在生态恢复领域的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料

选用湖南省道县一年生凹叶厚朴幼苗为试验对象。将清洗干燥后的细沙、泥炭土和珍珠岩按照4:2:1(体积比)制成混合基质,每盆装2.25 kg基

质,每盆栽植1株幼苗,植株平均苗高为(45.04±3.77) cm,平均地径为(8.00±0.98) mm。

1.2 方法

1.2.1 试验设计

Pb、Zn浓度梯度设置参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准》^[19]及预实验。Pb(NO₃)₂·Zn(NO₃)₂·6H₂O胁迫梯度为200、400、600、800 mg/kg,分别标为P1、P2、P3、P4和Z1、Z2、Z3、Z4;Pb、Zn复合胁迫梯度为(100+100)、(200+200)、(300+300)、(400+400) mg/kg,分别标记为M1、M2、M3、M4;以不加Pb、Zn处理为对照(CK),共13个处理,每个处理9盆。试验在中南林业科技大学校内试验基地进行。将凹叶厚朴幼苗置于75%自然光照下培养,待凹叶厚朴幼苗适应环境并稳定生长后,加入相应浓度的Pb、Zn溶液,进行胁迫处理。试验过程中每日观察并记录植株生长情况,每隔2~3 d浇入适量蒸馏水,每月每盆施入5 g复合肥。培养环境白天平均温度为32.5 °C,夜间平均温度为23.7 °C,处理90 d后收获并取样测定其生长、生理及重金属累积指标。

1.2.2 生长指标的测定

胁迫90 d后,用数显游标卡尺测量植株出土1 cm处的直径,即地径;用直尺测量植株地径处至顶芽的距离,即株高。

胁迫90 d后,将幼苗从土壤痕迹处剪开,分为地上部分和根,洗净擦干,放入烘箱中烘干至恒重,称取并记录各部分质量,按照文献^[20]的方法计算植株耐性系数。

1.2.3 生理指标的测定

取不同处理植株相同部位生长良好的叶片,测定相关生理生化指标。光合色素含量测定采用95%乙醇法^[21];超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑光还原法^[21];过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚显色法^[22];过氧化氢酶(CAT)活性测定

采用紫外吸收比色法^[23]；可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法^[21]；丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸法^[21]；可溶性糖含量测定采用蒽酮比色法^[21]；游离脯氨酸含量测定采用酸性茚三酮法^[24]。

1.2.4 铅锌含量及转移系数的测定

胁迫 90 d 后, 将植物地上部分和根部分开, 洗净后烘干至恒重, 用粉碎机粉碎, 过筛(孔径 0.25 mm)后称取 0.500 g 粉碎的植物样品置于容器中, 依次加入浓硝酸和高氯酸, 摇匀后静置过夜, 置于电热板上进行消解。消解完成后用去离子水过滤定容于容量瓶中, 利用火焰原子吸收分光光度计测定 Pb、Zn 含量^[25]。按照文献^[26]的方法计算转移系数。

1.3 数据处理

采用 Excel 2003 进行数据处理及图表绘制; 运用 SPSS 20.0 进行单因素 ANOVA 方差分析, 选用

Duncan 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 铅锌胁迫对凹叶厚朴幼苗生长的影响

由表 1 可知, 在 Pb 胁迫下, 植株株高随胁迫浓度的增大而变矮, 地径、地上部分干质量、地下部分干质量则表现为先增后减的变化趋势, 在 P3 处理时, 各生长指标显著低于对照。Zn 胁迫下, 株高和地径随胁迫浓度的增加表现为“低促高抑”的变化趋势, Z3 处理时, 株高、地径为 4 个处理的最大值; 单株地上部分干质量、地下部分干质量在 P4、Z4、M4 处理下降至最低, 其中, Z4 处理下, 这 2 个指标值相较于对照分别减小了 15.67%、48.53%。Pb、Zn 复合胁迫下, 株高、地径、地上及地下部分干质量与单一 Pb 胁迫下植株变化趋势一致。

表 1 铅锌胁迫下凹叶厚朴幼苗的株高、地径、生物量及耐性系数

Table 1 Plant heights, ground diameters, biomasses and patience factors of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* seedlings under lead and zinc stress

处理	株高/cm	地径/mm	单株地上部分干质量/g	单株地下部分干质量/g	耐性系数
CK	(50.00±2.00)a	(9.81±0.17)bc	(16.53±0.02)e	(3.73±0.02)c	
P1	(42.80±0.20)d	(9.90±0.94)bc	(17.19±0.03)d	(3.94±0.02)b	(1.04±0.00)c
P2	(42.50±1.00)d	(11.01±0.60)a	(18.21±0.03)b	(5.68±0.09)a	(1.18±0.01)b
P3	(38.50±1.50)g	(8.22±0.09)d	(15.02±0.03)g	(3.15±0.04)d	(0.90±0.00)g
P4	(36.50±0.50)h	(8.13±0.11)d	(9.42±0.03)k	(1.94±0.02)i	(0.56±0.00)k
Z1	(40.60±0.36)ef	(9.48±0.09)c	(16.41±0.03)e	(2.66±0.02)f	(0.94±0.00)f
Z2	(42.25±0.75)de	(9.83±0.55)bc	(17.56±0.01)c	(3.22±0.01)d	(1.03±0.00)d
Z3	(47.25±1.25)b	(10.51±0.07)ab	(16.45±0.05)e	(2.44±0.08)g	(0.93±0.01)f
Z4	(39.50±1.50)fg	(9.47±0.11)c	(13.94±0.53)h	(1.92±0.02)i	(0.78±0.03)i
M1	(45.50±1.50)bc	(9.82±0.90)bc	(15.84±0.01)f	(3.69±0.10)c	(0.96±0.00)e
M2	(45.13±0.78)c	(11.14±0.13)a	(21.30±0.04)a	(5.71±0.04)a	(1.33±0.00)a
M3	(39.85±0.15)fg	(8.69±0.08)d	(13.33±0.01)i	(2.94±0.01)e	(0.80±0.00)h
M4	(38.25±0.25)gh	(8.06±0.03)d	(10.49±0.03)j	(2.04±0.02)h	(0.62±0.00)j

同列数据不同小写字母处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

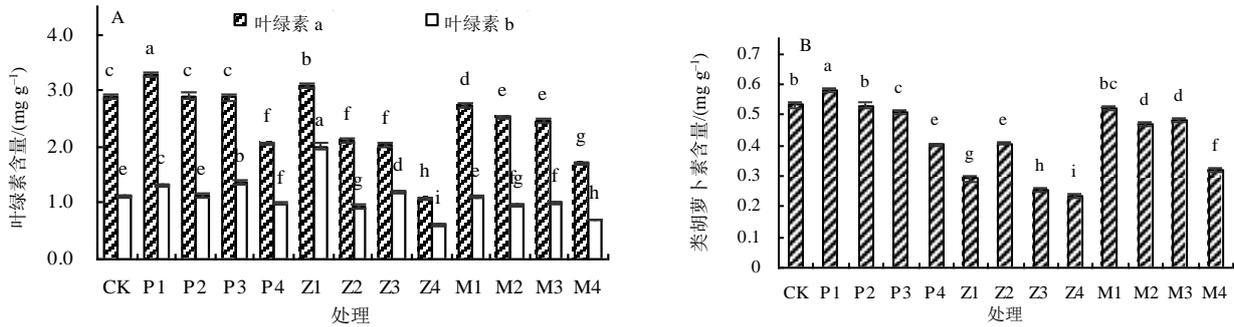
由表 1 可知, 在 Pb、Zn 单一及复合胁迫下, 耐性系数随胁迫浓度增大表现为先增加后减小的变化趋势, 分别在 P2、Z2、M2 处理下达到最大值, 且耐性系数均大于 1, 说明低浓度 Pb、Zn 处理对植株生长有一定的促进作用。P4、Z4、M4 处理的耐性系数最小, 仅为 0.56、0.78、0.62, 说明此浓度下凹叶厚朴的生长受到了显著抑制, 且高浓度 Pb 处理对植株的抑制作用更强。

2.2 铅锌胁迫对凹叶厚朴叶片光合色素含量的影响

由图 1 可知, 在 Pb 胁迫下, 凹叶厚朴叶片叶绿素 a 及类胡萝卜素含量随胁迫浓度增大而减少, P1 处理时, 二者含量最高, 且均显著高于对照; 在 P4 处理下, 叶绿素 b 含量较 CK 显著降低 11.02%。在 Zn 胁迫下, 叶绿素 a、叶绿素 b 含量随胁迫浓度增大总体呈下降趋势; 类胡萝卜素含量则随 Zn 浓度的增加先增大后减小, 在 Z2 处理时最高。在 Pb、

Zn 复合胁迫下, 叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量随胁迫浓度增大而降低, 在 M4 处理下, 光合

色素含量最低, 且显著低于对照, 较对照分别减小了 40.75%、37.75%、40.29%。



不同字母示同一指标处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

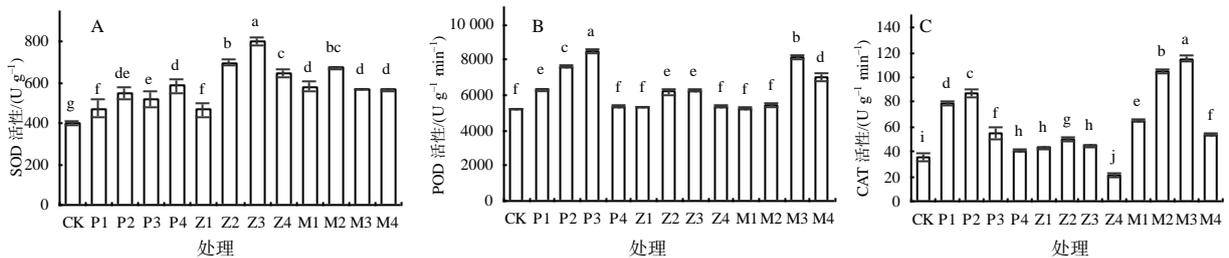
图 1 铅锌胁迫下凹叶厚朴叶片中的光合色素含量

Fig. 1 Photosynthetic pigment contents of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* leaves under lead and zinc stress

2.3 铅锌胁迫对凹叶厚朴叶片抗氧化酶活性的影响

由图 2-A 可知, 随着 Pb 浓度的增加, SOD 活性在 P4 时最高, 在 P3 时略有降低, 但活性仍高于对照。在 Zn 及 Pb、Zn 复合胁迫下, SOD 活性在 Z3、M2 处理下最高, 各处理 SOD 活性均显著高于对照。由图 2-B 可知, 在 Pb、Zn 单一及复合胁迫

下, 各处理的 POD 活性均高于对照, 分别在 P3、Z3、M3 时最高。由图 2-C 可知, 在 Pb、Zn 单一及复合胁迫下, CAT 活性分别在 P2、Z2、M3 时 CAT 活性最大; 仅 Z4 处理下, CAT 活性显著低于对照, 较对照降低了 40.35%。



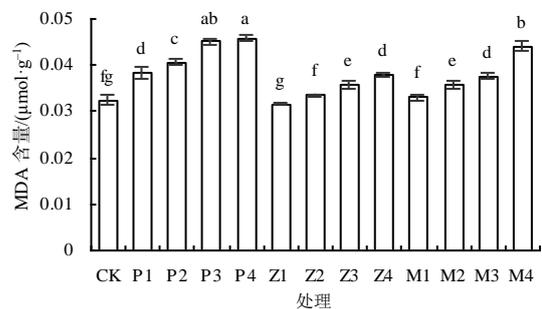
不同字母示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

图 2 铅锌胁迫下凹叶厚朴叶片中的 SOD、POD、CAT 活性

Fig. 2 SOD, POD and CAT activities of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* leaves under lead and zinc stress

2.4 铅锌胁迫对凹叶厚朴叶片丙二醛含量的影响

由图 3 可知, 在 Pb、Zn 单一及复合胁迫下, MDA 含量随胁迫浓度的增大而增加, P4、Z4 和 M4 处理的丙二醛含量分别较对照增加了 41.36%、17.28%、35.80%, 说明凹叶厚朴幼苗受到了铅锌不同程度的伤害, 且随着胁迫浓度的增加, 对植株的伤害程度不断加深, 仅 Z1 处理的 MDA 含量略低于对照, 较对照降低了 2.47%。Z1、Z2、M1 处理时, 叶片 MDA 含量与 CK 的差异不显著。



不同字母示处理间的差异有统计学意义(P<0.05)。

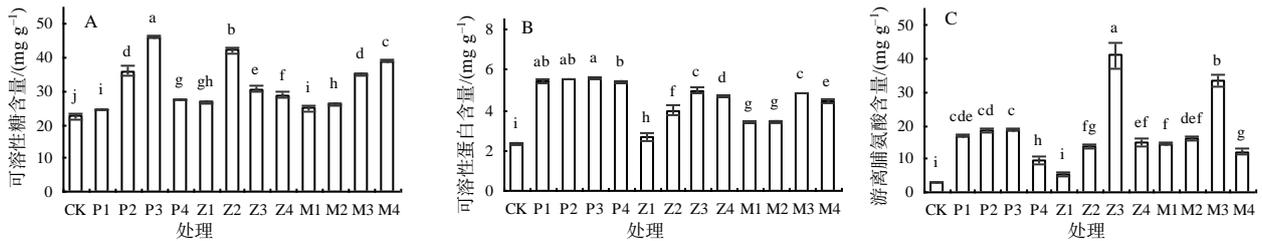
图 3 铅锌胁迫下凹叶厚朴叶片中的 MDA 含量

Fig. 3 Contents of MDA in leaves of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* under lead and zinc stress

2.5 铅锌胁迫对凹叶厚朴叶片渗透调节物质含量的影响

由图 4-A 可知, 在单一 Pb、Zn 胁迫下, 可溶性糖含量随胁迫浓度增大表现为先增加后减小的变化趋势, P3、Z2 处理的可溶性糖含量较高。在复合胁迫下, 叶片可溶性糖含量不断增加, 在 M4 处理下达到最大值, 相较于对照增加了 72.39%。由图

4-B、图 4-C 可知, 在 Zn 单一及复合胁迫下, 可溶性蛋白及游离脯氨酸含量随胁迫浓度增大表现为先增加后减小的变化趋势, 分别在 Z3、M3 处理时, 叶片的可溶性蛋白及游离脯氨酸含量最高。在单一 Pb 胁迫下, P1、P2、P3 处理的可溶性蛋白含量差异不显著。除 Z1 处理外, 其余各处理游离脯氨酸含量均显著高于对照。



不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图 4 铅锌胁迫下凹叶厚朴叶片中渗透调节物质的含量

Fig. 4 Contents of osmotic regulators in leaves of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* under lead and zinc stress

2.6 铅锌累积特征

由表 2 可知, 随着 Pb、Zn 胁迫浓度的增加, 凹叶厚朴幼苗地上部分及根的 Pb、Zn 含量逐渐升高, 且根部重金属含量总体高于地上部分, 说明 Pb、Zn 主要积累在凹叶厚朴的根部。单一 Pb 和复合胁迫下, 各处理地上部分和根的 Pb 含量均显著高于对照; P4 处理下, 凹叶厚朴幼苗地上部分和根部

Pb 含量分别达 283.44、1168.13 mg/kg, 分别是对照的 16.85、40.41 倍。单一 Zn 胁迫下, 地上部分和根部 Zn 含量的最大值均出现在 Z4 处理时, 分别是对照的 9.51、19.52 倍。植株各部分 Zn 含量高于 Pb 含量, 这可能与 Zn 是植物的必需元素, 且其可溶性和移动性较强有关。

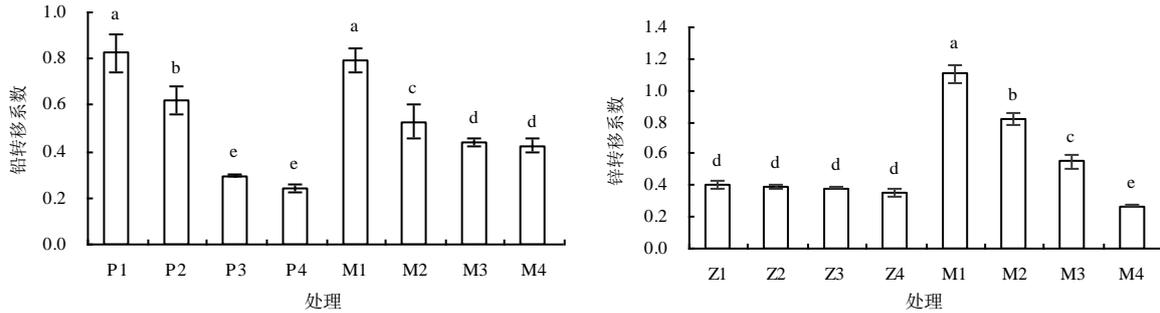
表 2 凹叶厚朴地上部分及根系的铅锌积累量

Table 2 Accumulation of lead and zinc in the above-ground parts and root system of <i>Magnolia officinalis</i> subsp. <i>biloba</i> mg/kg					
处理	地上部分 Pb 含量	根 Pb 含量	处理	地上部分 Zn 含量	根 Zn 含量
CK	(16.82±0.66)i	(28.91±3.19)g	CK	(77.50±2.86)h	(106.18±3.01)h
P1	(169.68±10.58)d	(206.28±7.48)e	Z1	(360.05±7.13)d	(888.75±36.25)e
P2	(207.93±9.44)c	(335.78±23.34)cd	Z2	(479.42±15.06)c	(1216.99±6.01)d
P3	(242.03±2.97)b	(818.69±4.01)b	Z3	(584.24±20.61)b	(1521.54±23.46)b
P4	(283.44±9.52)a	(1168.13±56.17)a	Z4	(737.03±5.29)a	(2072.36±138.22)a
M1	(113.51±3.61)h	(143.44±7.17)f	M1	(180.93±4.26)g	(163.63±9.53)h
M2	(127.24±4.53)g	(243.32±34.61)e	M2	(247.83±5.62)f	(302.39±15.35)g
M3	(138.97±8.74)f	(315.57±20.81)d	M3	(324.85±17.35)e	(590.67±1.66)f
M4	(157.48±2.44)e	(370.33±24.84)c	M4	(364.67±4.44)d	(1347.39±23.39)c

同列数据不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

转移系数可反映植物体内重金属由根系转移到地上部分的能力。由图 5 可知, 在单一 Pb 胁迫和 Pb、Zn 复合胁迫下, 植株 Pb 转移系数随着 Pb 浓度的增大而减小, 各处理下转移系数均小于 1, P1 处理下的转移系数最大, 为 0.82。在单一 Zn 胁迫

下, Zn 转移系数随 Zn 浓度增加呈逐渐下降的变化趋势, 但变化幅度较小, 且各处理转移系数间差异不显著。复合胁迫下, Zn 转移系数随 Zn 浓度的增大而逐渐减小, 在 M4 处理下, 转移系数最小, 为 0.27。说明 Pb 的加入可促使 Zn 向地上部分转移。



不同字母示处理间的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图5 铅锌胁迫下凹叶厚朴的铅锌转移系数

Fig.5 Lead and zinc transfer factors of *Magnolia officinalis* subsp. *biloba* under lead and zinc stress

3 结论与讨论

在重金属胁迫下植株的生长发育会受到影响,植物会快速产生响应,其表观形态发生变化。本研究发现,当Pb的质量分数超过400 mg/kg、Zn的质量分数超过600 mg/kg、复合胁迫超过(200+200) mg/kg时,植株地径减小,生物量减少,这与朱秀红等^[27]对白花泡桐(*Paulownia fortunei*)、段亚萍等^[28]对蜀葵(*Althaea rosea*)、陈剑成等^[15]对凹叶厚朴的研究结果一致。对凹叶厚朴幼苗耐性系数的分析发现,植株的耐性系数为0.56~1.33,在Pb、Zn单一及复合胁迫下,耐性系数最小值出现在Pb的质量分数为800 mg/kg时,仅为0.56,说明此浓度Pb胁迫下凹叶厚朴的生长严重受阻。当Pb、Zn的质量分数为400 mg/kg,复合胁迫为(200+200) mg/kg时,植株耐性系数大于1,说明低浓度Pb、Zn处理对植株生长有促进作用。

过量的Pb、Zn对植物光合作用的抑制主要表现在影响叶绿体的相关酶活性,造成叶绿素分解速度加快,严重情况下会破坏叶绿体组织结构,进而影响叶绿体功能^[29]。本研究结果表明,在Pb、Zn单一及复合胁迫下,当Pb、Zn的质量分数为800 mg/kg、复合胁迫为(400+400) mg/kg时,叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量降至最低,且显著低于对照,说明高浓度Pb、Zn胁迫会导致凹叶厚朴光合色素含量下降,进而影响植株光合作用。

过量的Pb、Zn存在会影响植物的新陈代谢,诱导其产生过量的活性氧,打破了原有的平衡,植物的抗氧化酶系统就会产生大量的SOD、POD及CAT等酶来消除活性氧^[30-32]。本研究结果显示,随着Zn单一胁迫及复合胁迫浓度的升高,POD、CAT

活性表现为先升后降的变化趋势,在Zn的质量分数为600 mg/kg、复合胁迫为(300+300) mg/kg时POD活性较高。在Pb胁迫下,随胁迫浓度增加,SOD活性总体呈上升趋势;低浓度胁迫促进POD及CAT活性提高,高浓度则抑制其活性,在Pb的质量分数为800 mg/kg时,POD和CAT活性最低。说明在一定胁迫浓度范围内,凹叶厚朴会通过调节3种抗氧化酶活性来消除毒害物质。

MDA作为过氧化产物在一定程度上也能反映出细胞受重金属毒害的程度,通过与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,进而形成不溶性的化合物脂褐素沉积,影响细胞内正常的生命活动和细胞膜透性^[33-34]。本研究中,在Pb、Zn单一及复合胁迫下,MDA含量随胁迫浓度的增大而增加,说明凹叶厚朴幼苗受到了不同程度的伤害,且随着Pb、Zn浓度的增加,对植株的损害程度不断加深。在Pb、Zn的质量分数为800 mg/kg、复合胁迫为(400+400) mg/kg时,叶片MDA含量最高,叶片受损害最严重,且Pb胁迫破坏程度大于Zn胁迫及复合胁迫。

可溶性糖、可溶性蛋白及脯氨酸是植物体内重要的渗透调节物质,其含量增加能在逆境条件下最大限度保持细胞渗透压,稳定生物大分子结构,以增强植物对逆境的适应能力^[35]。本研究中,在Pb、Zn单一胁迫下,凹叶厚朴叶片可溶性糖、可溶性蛋白及游离脯氨酸含量随胁迫浓度的升高先增大后减小,Pb、Zn的质量分数为200、400、600 mg/kg时,3种渗透调节物质含量整体呈增加趋势,Pb胁迫下叶片可溶性蛋白含量整体高于Zn胁迫和复合胁迫。Pb、Zn复合胁迫下,叶片可溶性糖含量不断增加,在复合胁迫为(400+400) mg/kg时含量最高,相较于对照增加了72.39%。

本试验中,随着 Pb、Zn 浓度的增加,凹叶厚朴幼苗地上部、根部 Pb、Zn 含量逐渐升高,且根部重金属含量总体高于地上部分,说明 Pb、Zn 主要积累在凹叶厚朴的根部,可以通过根部的皮层组织进入共生体通道到达木质部,减少或限制 Pb、Zn 向地上部分转移累积,以减轻其毒害性^[36-38]。分析重金属的转移系数发现,单一及复合胁迫下,植株体内 Pb、Zn 转移系数均随胁迫浓度增加而减小,各处理 Pb 转移系数均小于 1, Zn 转移系数仅在 M1 处理下大于 1,表现出一定的转移能力。

综合所有指标来看,较低浓度 Pb、Zn 处理可促进凹叶厚朴幼苗生长、增加光合色素含量。在 Pb、Zn 胁迫下凹叶厚朴可通过提高抗氧化酶活性来清除多余的活性氧,增加渗透调节物质含量来维持细胞结构,以减轻 Pb、Zn 的毒害。随着胁迫浓度的增加,地上及根部 Pb、Zn 含量逐渐增加,凹叶厚朴主要将 Pb、Zn 积累在根部,以减少其向地上部分转移。在本试验 Pb、Zn 胁迫浓度范围内凹叶厚朴生长状态较好,表明凹叶厚朴对 Pb、Zn 污染环境有较强的耐受性,具有修复重金属污染土壤的生态应用潜力。复合胁迫对植物的影响与植物本身及重金属复合类型、质量浓度配比、胁迫时间、作用部位等很多因素有关;因此,对于重金属复合污染问题,还有待更深入的研究。

参考文献:

- [1] 王慧忠. 匍匐剪股颖和多年生黑麦草对镉、铅胁迫的响应及部分基因表达调控机理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2006.
- [2] 刘吉振. 高锌胁迫对不同品种大白菜产量和品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [3] 易心钰. 蓖麻对铅锌胁迫的响应及其机制研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018.
- [4] PILON-SMITS E A, FREEMAN J L. Environmental cleanup using plants: biotechnological advances and ecological considerations[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, 4(4): 203-210.
- [5] 刘诺, 张新珏, 张爱琳, 等. 两种杨树对铅和铅-镉复合胁迫的生理响应[J]. *森林与环境学报*, 2020, 40(3): 276-283.
- [6] 张瑛. 八仙花对铅锌污染土壤的适应性及耐受机理研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2022.
- [7] 周际海, 程坤, 郜茹茹, 等. 土壤镉污染对香樟幼苗光合和生理特性的影响[J]. *林业科学*, 2020, 56(6): 193-201.
- [8] 王悟敏, 胡佳瑶, 刘文胜, 等. 锰胁迫下盐肤木锰富集及生理响应特征[J]. *西北植物学报*, 2022, 42(4): 628-636.
- [9] 胡文俐. 山苍子幼苗对铅锌胁迫的响应[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [10] 余国源. 伞房决明对土壤重金属 Pb、Cd、Zn 胁迫的生理响应研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- [11] 匡雪韶. 野胡萝卜对锰胁迫的耐受性及其机理研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.
- [12] 黄广振. 大叶落地生根对铅锌的富集规律、耐受性及修复效果研究[D]. 桂林: 桂林理工大学, 2022.
- [13] 杨旭, 杨志玲, 谭美, 等. 不同种源 8 年生厚朴林分的生长变异及综合评价[J]. *中南林业科技大学学报*, 2019, 39(8): 21-25.
- [14] 江军, 廖凯, 凌联斌, 等. 厚朴生态栽培土壤中重金属污染分析及治理[J]. *现代园艺*, 2015(23): 8-9.
- [15] 陈剑成, 罗睿, 万娟, 等. Cd 胁迫对凹叶厚朴生物量及光合荧光特性的影响[J]. *福建农业学报*, 2016, 31(9): 939-944.
- [16] 方国荣. 皖南山区凹叶厚朴特征特性及栽培技术[J]. *现代农业科技*, 2015(19): 186.
- [17] 谢燕燕, 卫梅, 谢德金, 等. 凹叶厚朴用于细胞悬浮培养的愈伤组织的制备研究[J]. *湖南中医药大学学报*, 2017, 37(4): 365-368.
- [18] LI C, LI C J, MA J, et al. Magmenthanes A-H: eight new meroterpenoids from the bark of *Magnolia officinalis* var. *Biloba*[J]. *Bioorganic Chemistry*, 2019, 88: 102948.
- [19] GB 15618—2018 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准[S].
- [20] ZACCHINI M, IORI V, MUGNOZZA G S, et al. Cadmium accumulation and tolerance in *Populus nigra* and *Salix alba*[J]. *Biologia Plantarum*, 2011, 55(2): 383-386.
- [21] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [22] 李仲芳. 植物生理学实验指导[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2012.
- [23] 孔祥生, 易现峰. 植物生理学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [24] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 2 版. 广州: 华南理工大学出版社, 2006.
- [25] 张婉. *BpTT2* 过表达构树抗镉性能及调控途径研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2022.
- [26] WILKINS D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. *New Phytologist*, 1978, 80(3): 623-633.
- [27] 朱秀红, 程红梅, 季柳洋, 等. 锌、镉及其复合胁迫下白花泡桐幼苗的生理及富集特征[J]. *生物工程学报*, 2021, 37(7): 2463-2473.

- [28] 段亚萍, 赵冰, 付丽童, 等. 铅、锌污染下蜀葵的生长生理响应和富集转运特性研究[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 418–425.
- [29] 王建秋, 曹子林, 王晓丽, 等. 铅胁迫对滇白前生长、光合作用及叶绿素荧光的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2422–2427.
- [30] 赵发法, 罗准, 彭小列, 等. 锰胁迫对芦竹生理生化特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2021, 47(2): 212–218.
- [31] YU X Z, GU J D, HUANG S Z. Hexavalent chromium induced stress and metabolic responses in hybrid willows[J]. Ecotoxicology, 2007, 16(3): 299–309.
- [32] FANG W C, KAO C H. Enhanced peroxidase activity in rice leaves in response to excess iron, copper and zinc[J]. Plant Science, 2000, 158(1/2): 71–76.
- [33] DAS D K. Assessment of heavy metal accumulation in medicinal plants and possible remedial measures[J]. Journal of Pharmaceutical Research, 2016, 15(3): 63.
- [34] MISHRA P, BHOOMIKA K, DUBEY R S. Differential responses of antioxidative defense system to prolonged salinity stress in salt-tolerant and salt-sensitive Indica rice (*Oryza sativa* L.) seedlings[J]. Protoplasma, 2013, 250(1): 3–19.
- [35] 蒋严波, 凌忠, 韦献东, 等. 基于主成分分析法的枫香耐铅性及土壤修复潜力研究[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 369–376.
- [36] DAHMANI-MULLER H, VAN OORT F, GÉLIE B, et al. Strategies of heavy metal uptake by three plant species growing near a metal smelter[J]. Environmental Pollution, 2000, 109(2): 231–238.
- [37] 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.
- [38] 王思元, 王仁才, 石浩, 等. 镉胁迫下猕猴桃对镉的吸收及转运[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(6): 698–705.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正

(上接第 644 页)

- [6] 曹丽霞, 侯龙鱼, 赵世锋, 等. 20个燕麦品种饲草产量和品质比较分析[J]. 西南民族大学学报(自然科学版), 2021, 47(4): 335–341.
- [7] 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, 2000.
- [8] 赵胜. 气候变化背景下中国耕地现实熟制与潜在熟制差异的时空格局研究[D]. 武汉: 华中师范大学, 2018.
- [9] 柳茜, 陶雅, 卢寰宗, 等. 播种量和品种对冬闲田燕麦生产性能的影响[J]. 草学, 2021(2): 40–44.
- [10] 何亮珍, 郭嘉, 付爱斌, 等. 双季稻冬闲田种植绿肥对土壤理化性质的影响[J]. 作物研究, 2017, 31(4): 405–407.
- [11] 曹孟岩. 稻田冬种土壤 AMF 群落特征及其对后作水稻的促生效应研究[D]. 广州: 中山大学, 2022.
- [12] BÜNEMANN E K, OBERSON A, LIEBISCH F, et al. Rapid microbial phosphorus immobilization dominates gross phosphorus fluxes in a grassland soil with low inorganic phosphorus availability[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012, 51: 84–95.
- [13] RICHARDSON A E, HOCKING P J, SIMPSON R J, et al. Plant mechanisms to optimise access to soil phosphorus[J]. Crop and Pasture Science, 2009, 60(2): 124.
- [14] HE H B, LI W X, ZHANG Y W, et al. Effects of Italian ryegrass residues as green manure on soil properties and bacterial communities under an Italian ryegrass(*Lolium multiflorum* L.)-rice(*Oryza sativa* L.) rotation[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104487.
- [15] 王建红, 曹凯, 张贤, 等. 绿肥还田对水稻生长期土壤有机质动态变化的影响[J]. 浙江农业科学, 2010, 51(3): 614–616.
- [16] 何宏斌, 张钰薇, 程俊康, 等. “多花黑麦草→水稻”轮作系统根茬养分释放规律[J]. 草业科学, 2019, 36(7): 1852–1860.
- [17] 黎国喜, 李厚金, 杨中艺, 等. “黑麦草-水稻”草田轮作系统的根际效应 V. 意大利黑麦草(*Lolium multiflorum*)根茬腐解物中存在促水稻生长活性物质的证据[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2008, 47(4): 88–93.
- [18] 王琳, 管永祥, 陈震, 等. 不同种类绿肥养分积累比较及其对水稻产量的影响[J]. 江苏农业学报, 2020, 36(5): 1139–1143.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 柳正