

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.16.0070



水铅交互胁迫对小桐子生长及生理特性的影响

王卫华¹, 雷龙海^{1,2}, 杨启良¹, 武振中¹

(1. 昆明理工大学现代农业工程学院, 云南 昆明 650500; 2. 毕节市水土保持办公室, 贵州 毕节 551700)



王卫华

摘要: 为提高小桐子对重金属 Pb 的耐性及其对污染土壤的修复效率, 推荐不影响其正常生长的最佳水铅组合, 研究了水铅交互胁迫对小桐子生长及生理特性的影响. 试验设计 4 种灌水水平 (T1:100% FC, T2:80% FC, T3:60% FC, T4:40% FC)、4 种土壤 Pb 污染水平 (A:0 mg/kg, B:500 mg/kg, C:1 000 mg/kg, D:1 500 mg/kg) 进行交互试验. 结果表明: 在水铅交互胁迫下, T2 水分胁迫显著提高了小桐子的生物量以及修复效果. 水铅交互胁迫下, 小桐子叶片 SOD、POD 酶活性表现为先升后降的趋势, 与单一的水分胁迫、铅胁迫相比, 交互胁迫提高了 SOD、POD 活性. 水铅交互胁迫下小桐子细胞膜透性总体呈增大趋势, 而处理 C 和 D 下 T2 在 T1 的基础上降低了细胞膜透性. 土壤 Pb 质量比 ≤ 500 mg/kg 时, 小桐子叶水势随水分胁迫加剧逐渐下降, 当土壤 Pb 质量比 $\geq 1 000$ mg/kg 时, 小桐子叶水势随着水分胁迫的加剧逐渐增加. 适当的交互胁迫有利于提高小桐子的耐 Pb 胁迫能力以及修复效率, 为进一步推进小桐子在土壤铅污染领域的实践与推广提供理论依据.

关键词: 小桐子; 叶水势; SOD; POD; 细胞膜透性

中图分类号: S210.3; X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2017)06-0520-06

王卫华, 雷龙海, 杨启良, 等. 水铅交互胁迫对小桐子生长及生理特性的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2017, 35(6): 520-525, 540.

WANG Weihua, LEI Longhai, YANG Qiliang, et al. Water-lead interactive stress effect on growth and physiological characteristics of *Jatropha curcas* L. [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering (JDIME), 2017, 35(6): 520-525, 540. (in Chinese)

Water-lead interactive stress effect on growth and physiological characteristics of *Jatropha curcas* L.

WANG Weihua¹, LEI Longhai^{1,2}, YANG Qiliang¹, WU Zhenzhong¹

(1. Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. Office of Water and Soil Conservation of Bijie City, Bijie, Guizhou 551700, China)

Abstract: In order to improve the tolerance of *Jatropha curcas* L. to Pb and its effect on the remediation of contaminated soil and recommend the best water lead combination that does not affect the normal growth, the water lead interaction stress on the influence of growth and physiological characteristics of *Jatropha curcas* L. was studied. The experiment designed 4 irrigation levels (T1:100% FC, T2:80% FC, T3:60% FC, T4:40% FC), 4 soil Pb pollution levels (A:0 mg/kg, B:500 mg/kg, C:1 000 mg/kg, D:1 500 mg/kg). The results show that lead water interaction under T2 water stress significantly

收稿日期: 2016-03-31; 网络出版时间: 2017-05-31

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1814.TH.20170531.1523.010.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51409136, 51379004); 云南省应用基础研究面上资助项目(2013FB024); 昆明理工大学自然科学研究基金资助项目(KKSY201423023)

作者简介: 王卫华(1982—), 女, 陕西西安人, 副教授, 博士(wangweihua1220@163.com), 主要从事土壤物理、节水灌溉研究.

雷龙海(1991—), 男, 贵州遵义人, 硕士(leilhs2wj@163.com), 主要从事水土保持研究.

increased the biomass and repaired effect of *Jatropha curcas* L. Under water lead interaction, the activities of SOD and POD of *Jatropha curcas* L. were increased first and then decreased. Compared with single water stress and lead stress, SOD and POD activities were increased under the interaction stress. Under the water - lead interaction stress, the cell membrane permeability of *Jatropha curcas* L. increased, while C and D under the treatment of T2 based on T1 reduced the permeability of cell membrane. *Jatropha curcas* L. leaf water potential decreased gradually with the increase of water stress when the soil Pb concentration was less than 500 mg/kg, *Jatropha curcas* L. leaf water potential increased gradually with the increase of water stress, when the soil Pb concentration was more than or equal to 1 000 mg/kg. The appropriate interaction stress can improve the Pb-tolerant stress ability and repair efficiency of *Jatropha curcas* L. . It provides a theoretical basis for further promoting the practice and promotion in the field of lead contaminated soil of *Jatropha curcas* L. .

Key words: *Jatropha curcas* L. ;leaf water potential;SOD;POD;cell membrane permeability

土壤铅(Pb)污染是当今社会面临的极为严峻的环境问题. 铅是一种有毒的金属,能被植物吸收但不能降解,且具有持久性、稳定性的特点^[1],高浓度铅污染降低植物种子萌发率、加速叶片衰老、抑制叶绿素合成、干扰养分的吸收、影响净光合速率和细胞膜透性,以及植物和土壤中分泌的各种酶,影响植物的生长和发育^[2],并且金属铅可以从土壤进入植物,通过食物链转移到人体,从而威胁人类健康. 为了消除土壤中的铅,使用了包括开挖、填埋、化学固定、植物修复等方法,但植物修复耗时长、见效慢^[3]. 因此,选择耐铅性较强且能产生经济效益的大生物量植物进行土壤铅污染植物修复至关重要.

小桐子属于大戟科植物,其种子含油率达 27% ~ 40%,被认为是潜在的生物燃料作物,其种子、树叶、树皮、植物汁液均具有药用价值^[4]. 其生长速度快,且对干旱、贫瘠的土壤有较强的耐性. 众多学者将小桐子应用到重金属植物修复方面^[5-6],SHU 等^[5]的研究表明,0.5 mmol/L 的铅处理有利于小桐子幼苗高度以及叶面积的增长,过高的铅浓度抑制了小桐子的生长和发育,生物量减少,这可能是由于铅浓度过高导致叶绿素 a 的合成减少,以及影响了植物的氮代谢和光合作用,而小桐子幼苗超氧化物歧化酶、过氧化物酶在铅的抗氧化应激中起到了重要的促进作用.

不合理的灌溉制度导致水资源浪费,更容易引起土壤中重金属随着水分迁移,造成土壤深层及地下水污染. 制定合理的灌溉制度,不仅有利于水分利用效率的提高,更有利于植物的生长以及土壤中酶活性的提高. 邹朋等^[7]利用 4 种不同水分处理及 5 种重金属铅胁迫水平对 1 a 生紫穗槐交互作用,研究其水分利用效率的变化,结果表明,中度水分胁

迫有利于提高交互胁迫下的紫穗槐水分利用效率.

前人针对小桐子的研究仅涉及水对其生长的影响,抑或单独研究其对重金属的响应,而有关水分和铅的交互作用对小桐子生长及生理特性影响的研究却鲜见报道. 文中研究水分和铅交互作用对小桐子幼树生物量、酶活性、叶水势的影响,探讨在不同水铅组合下小桐子幼树耐 Pb 胁迫能力的规律,摸索出在尽可能不影响小桐子生物量的前提下铅修复效率较好的最佳水铅组合,为将小桐子更好地应用到铅污染土壤的植物修复中提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 试验区域概况及材料

本试验于昆明理工大学现代农业工程学院温室中进行,采用旱棚人工控水进行布设. 2015 年 4 月初将风干土壤过筛,并按照试验设计的铅胁迫水平,加入 99% 的醋酸铅 [$\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$] 分析纯,充分混匀后钝化 30 d,然后装入塑料花盆(高 30.0 cm、上底宽 30.0 cm、下底宽 22.5 cm),每盆中装土 12 kg,土壤容重 1.2 g/cm^3 . 5 月 3 日将取自于元谋干热河谷的 1 a 生小桐子幼苗移栽到花盆中,每盆栽 1 株,盆中统一施加磷酸二氢钾(KH_2PO_4)分析纯(300 mg/kg 风干土)并浇水至田间持水量. 为防止 Pb 因淋溶等产生损失现象,将花盆放置在塑料托盘中,若发生渗漏将渗液倒回花盆. 供试土壤为燥红黏壤土,经威尔克斯法测田间持水量为 24.3%.

1.2 试验设计

经过 30 d 缓苗后,选取长势一致的小桐子幼苗 48 盆,自 6 月 5 日起对其进行不同的水分处理. 试

验设 4 个水分水平,分别为 T1(100% 田间持水量)、T2(80% 田间持水量)、T3(60% 田间持水量)、T4(40% 田间持水量),4 个铅水平,与风干土质量比分别为 A(0 mg/kg)、B(500 mg/kg)、C(1 000 mg/kg)、D(1 500 mg/kg),共 16 个处理,每个处理 3 次重复.灌水周期为 7 d,称重法对盆栽进行灌水.从首次水分处理开始至破坏小桐子幼苗试验周期共计 90 d.

1.3 测定项目及方法

1) 小桐子干物质质量:采用烘干法测定,105 ℃ 杀青,30 min 后调温至 75 ℃,烘干至恒质量(用电子天平测定,精度 0.01 g).

2) 小桐子(根、茎、叶)含 Pb 量:采用硝酸和高氯酸混合消解,原子吸收分光光度计(TAS-990 北京普析)测定溶液中的 Pb 含量^[8].

3) 叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性的测定分别采用氮蓝四唑法、愈创木酚法^[9].

4) 叶水势:采用 SAPSII 植物分析系统进行测定.

5) 相对电导率:用于反映植物细胞膜透性.相对电导率具体测定方法:在 10 mL 试管中加入 5 mL 蒸馏水静置,测电导率 E_0 ,各处理组随机取 0.1 g 叶片,室温条件下放置在蒸馏水中静置 3 h,测电导率 E_1 ;将溶液煮沸 10 min,测电导率 E_2 ,相对电导率 E 计算公式为

$$E = (E_1 - E_0) / (E_2 - E_0) \times 100\%$$

6) 采用 Excel 2003 软件处理数据并制图,采用 SAS 统计软件对数据进行方差分析和多重比较(Duncan, $P = 0.05$).

2 结果分析与讨论

2.1 对生物量的影响

土壤中的重金属能被植物根系吸收,从而转运到植物茎、叶部分.诸多研究表明,铅抑制植物的生长和发育,而生物量是反映植物生长状况的指标之一^[6].图 1 为水铅交互胁迫下小桐子生物量与土壤中铅质量比的关系,图中 W_b 为小桐子生物量, $\omega(\text{Pb})$ 为土壤中 Pb 质量比.

由图 1 可知,水分胁迫、土壤铅胁迫及其交互作用对小桐子生物量的影响在 0.01 水平下具有统计学意义.数据分析表明,单一水分胁迫下,小桐子生物量随着水分胁迫的加剧逐渐减少,与处理 AT1 相

比,AT2 的差异不具有统计学意义,处理 AT3 和 AT4 的生物量分别显著减少了 43.4% 和 69.0% ($P < 0.01$),这与早前研究结果一致,归因于严重的水分胁迫,导致作物生长发育受限且影响营养元素的吸收和运输.单一铅胁迫下,小桐子生物量随土壤 Pb 质量比的增加而逐渐减少,与 AT1 相比,处理 BT1 的差异不具有统计学意义,处理 CT1 和 DT1 的生物量分别显著减少了 34.4% 和 59.6% ($P < 0.01$),归因于土壤 Pb 质量比超过了小桐子的耐性,影响其对水分、养分的运输和吸收,抑制其生长.

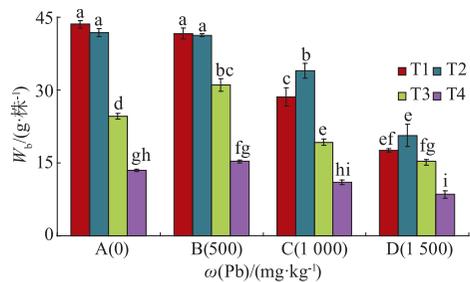


图 1 水铅交互胁迫下小桐子生物量
Fig. 1 Biomass of *Jatropha curcas* L. in water-lead interactive stress

水铅交互胁迫下,各处理生物量均低于处理 AT1,水分胁迫相同时,小桐子生物量随着土壤 Pb 质量比的增加逐渐降低.与 BT2 相比,CT2 和 DT2 小桐子生物量分别显著降低了 17.7% 和 49.9%,在此水分条件下,铅胁迫占主导地位,较高的铅胁迫干扰养分的吸收、影响净光合速率以及细胞膜透性,进而抑制小桐子的生长发育^[2];与 BT3 相比,CT3 和 DT3 小桐子生物量分别显著降低了 38.0% 和 103.0% ($P < 0.01$),在此水分条件下,水分和铅发生协同作用,共同抑制了小桐子的生长.土壤 Pb 质量比相同时,小桐子生物量随着水分胁迫的加剧显著降低($P < 0.01$),与 BT2 相比,BT3 和 BT4 小桐子生物量分别显著降低了 24.7% 和 62.9%,归因于质量比 Pb 为 B 时,水分胁迫占主导地位,重度的水分胁迫导致作物生长发育受限;与 CT2 相比,CT3 和 CT4 分别显著降低了 43.3% 和 67.6%,归因于较为严重的水分胁迫与较高的土壤 Pb 质量比发生协同作用,共同影响植物体内矿质元素的吸收.

与 CT1 相比,CT2 生物量显著增加 18.9% ($P < 0.01$).此时由于土壤 Pb 质量比超过小桐子耐受性范围,对作物生长产生抑制作用,而处理 T2 较处理 T1 减少了灌水量,在一定程度上有利于土壤呼吸以及各类菌种的繁殖,促进了小桐子的生长发育.

2.2 对有效提取量及富集效果的影响

重金属有效提取量、转移系数、富集系数是反映植物修复重金属污染土壤效果的指标. 水铅交互胁迫下各处理的小桐子有效提取量及富集效果见表1,表中 W_e 、 TF 、 BCF 分别为有效提取量、转移系数、富集系数. 显著性分析表明,水分胁迫、铅胁迫及其交互作用对小桐子的有效提取量和 BCF 的影响具有统计学意义,而对 TF 差异不具有统计学意义.

表1 水铅交互胁迫下小桐子有效提取量及富集效果
Tab.1 Effective extraction and enrichment effect of *Jatropha curcas* L. in water-lead interactive stress

处理	$W_e/(\mu\text{g}\cdot\text{株}^{-1})$	TF	BCF
AT1	106.63 ± 3.64f	1.076 ± 0.057a	0.033 ± 0.002cde
AT2	108.71 ± 1.68f	0.946 ± 0.035b	0.036 ± 0.001cd
AT3	83.37 ± 8.47f	0.922 ± 0.06b	0.046 ± 0.003ab
AT4	51.28 ± 6.11f	0.903 ± 0.097b	0.052 ± 0.007a
BT1	357.52 ± 5.85d	0.218 ± 0.012c	0.021 ± 0.004fg
BT2	432.49 ± 33.97bcd	0.212 ± 0.005c	0.026 ± 0.002efg
BT3	387.84 ± 27.43d	0.206 ± 0.002c	0.031 ± 0.001edef
BT4	240.57 ± 7.46e	0.207 ± 0.009c	0.035 ± 0.001bc
CT1	510.37 ± 11.67ab	0.176 ± 0.016c	0.019 ± 0.002fg
CT2	536.62 ± 45.94a	0.146 ± 0.001c	0.023 ± 0.005fg
CT3	391.77 ± 5.9cd	0.168 ± 0.01c	0.025 ± 0.003efg
CT4	256.24 ± 27.56e	0.158 ± 0.008c	0.028 ± 0.001defg
DT1	483.94 ± 25.28abc	0.154 ± 0.002c	0.016 ± 0.001g
DT2	522.69 ± 54.03a	0.148 ± 0.001c	0.017 ± 0.002fg
DT3	379.23 ± 42.16d	0.136 ± 0.019c	0.017 ± 0.002g
DT4	241.99 ± 28.22e	0.131 ± 0.016c	0.019 ± 0.002fg

数据分析表明,单一水分胁迫下,小桐子有效提取量随着水分胁迫的加剧而逐渐降低, TF 随水分胁迫的加剧而逐渐减小,差异不具有统计学意义, BCF 则随着水分胁迫的加剧而逐渐增大.单一铅胁迫下,随着土壤Pb质量比的增加,小桐子有效提取量先显著增加后降低, TF 、 BCF 逐渐减小,处理BT1、CT1和DT1下小桐子有效提取量分别是处理AT1的2.35、3.79和3.54倍.这与李蕊蕊等^[10]对烟草的试验结论保持一致,归因于土壤中Pb质量比较高时,虽然抑制了小桐子的生长,但其地上部分含Pb量较高,导致有效提取量反而变大,而当土壤Pb质量比达到处理D时,小桐子的生长发育严重受限,虽然其地上部分含Pb量较高,但其有效提取量相比反而变小.

水铅交互胁迫下,水分胁迫相同时,随着土壤中Pb质量比的增加,小桐子有效提取量先增加后减小, TF 和 BCF 降低,差异不具有统计学意义,与BT2相比,BT3和BT4的有效提取量分别增加了24.1%和20.9%;土壤Pb质量比相同时,随着水分胁迫的加剧,小桐子有效提取量逐渐减少, BCF 逐

渐增大,与BT2相比,BT3和BT4的有效提取量分别显著降低了10.3%和44.4%.

处理CT2下小桐子有效提取量是所有处理中最大值,达到了536.62 $\mu\text{g}/\text{株}$,与CT1相比,CT2的有效提取量提高了5.1%.前人研究^[11]表明,在相同Pb质量比下,随着水分胁迫的加剧,国槐的 TF 随之显著增大, BCF 逐渐降低,而研究中 TF 无明显规律, BCF 则随着水分胁迫的加剧而增大,这可能是由于作物种类不同所造成的,主要原因是根系组织的内皮层细胞限制了其横向运输,从而转移到地上部的铅就有所变化,导致两者的 BCF 和 TF 产生差异.

2.3 对SOD,POD活性的影响

重金属诱导氧化应激产生超氧阴离子自由基、过氧化氢、羟自由基和单线态氧,统称为活性氧自由基,活性氧可以迅速攻击如核酸、蛋白质、脂类等生物分子,导致代谢紊乱和细胞死亡,SOD是最早抵御活性氧自由基产生积累的酶,POD也是参与消除活性氧的主要酶之一^[2].水铅交互胁迫下各处理对小桐子SOD,POD活性 $M(\text{SOD})$ 、 $M(\text{POD})$ 的影响见图2,3.

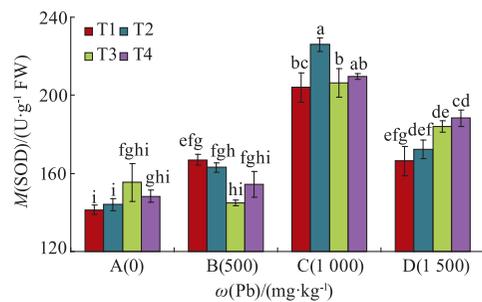


图2 水铅交互胁迫下小桐子叶片SOD活性
Fig.2 SOD activity of *Jatropha curcas* L. in water-lead interactive stress

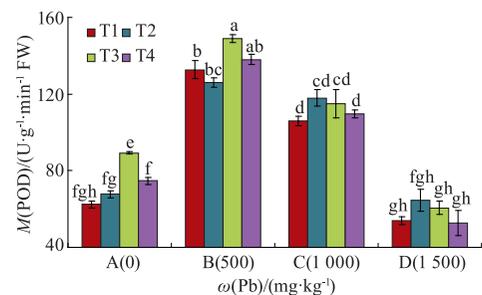


图3 水铅交互胁迫下小桐子叶片POD活性
Fig.3 POD activity of *Jatropha curcas* L. in water-lead interactive stress

数据分析表明,单一水分胁迫下,SOD,POD均先增加后降低,在处理AT3达到最大,POD在处理

AT3 下显著增加,较 T1 显著提高了 43.3%,SOD 差异不具有统计学意义.单一铅胁迫下,SOD,POD 亦先增加后降低,分别于处理 CT1,BT1 达到最大,与 AT1 相比,分别显著增加了 44.3% 和 112.8%.这与 SHU 等^[5]的研究结果不一致,归因于本试验设计土壤 Pb 质量比较大,当土壤 Pb 质量比超过一定范围,细胞酶受损导致其活性下降.

水铅交互胁迫下,水分胁迫相同时,随着土壤 Pb 质量比的增加,SOD 含量先增加后降低,POD 含量降低,与 BT2 相比,CT2 的 SOD 显著增加了 38.7%,DT2 的 POD 显著降低了 48.7%;与 BT3 相比,CT3 的 SOD 显著增加了 42.3%,POD 显著降低了 22.8%.土壤 Pb 质量比相同时,处理 B 和 C 下 SOD 随水分胁迫的加剧先降低后增加,与 BT2 相比,BT3 的 SOD 显著降低了 11.0%;与处理 CT2 相比,CT3 的 SOD 显著降低了 8.7%,处理 D 的 SOD 随水分胁迫的加剧逐渐增加,差异不具有统计学意义.处理 B 下 POD 随水分胁迫的加剧先增加后降低,与处理 BT2 相比,BT3 的 POD 显著提高了 18.3%,处理 C 和 D 随水分胁迫的加剧逐渐降低,差异不具有统计学意义.这与邹朋等^[12]的研究结果保持一致,归因于较低的水分胁迫以及较低的铅胁迫时,小桐子幼苗体内积累自由基,此时 SOD,POD 活性增加以清除自由基从而保护植物生长,但是随着铅胁迫和水分胁迫的加剧,植物体内活性氧自由基的积累超过了小桐子正常的歧化能力,导致抗氧化酶系统遭到破坏,抑制了 SOD,POD 的活性.

处理 CT2 的 SOD 值为所有处理中最大值,较 AT1 显著提高 60.2% ($P < 0.01$),POD 显著提高 89.7% ($P < 0.01$);与处理 CT1 相比,CT2 的 SOD 活性显著提高 10.8% ($P < 0.01$),POD 活性提高 11.3%.处理 BT3 的 POD 为所有处理中最大值,较 AT1 显著提高了 139.0%,SOD 活性提高了 2.6%.

2.4 对细胞膜透性的影响

细胞膜透性由相对电导率反映.相对电导率越大,细胞膜透性越大,表明植物受到迫害严重.水铅交互胁迫下各处理的小桐子叶片相对电导率如图 4 所示,图中 RC 为小桐子叶片相对电导率.显著性分析表明,水分胁迫对小桐子叶片相对电导率影响不具有统计学意义,铅胁迫及水铅交互胁迫对小桐子叶片相对电导率的影响具有统计学意义.

数据分析表明,单一水分胁迫下,随着水分胁迫的加剧,相对电导率增加,差异不具有统计学意义.单一铅胁迫下,相对电导率随着土壤 Pb 质量比

的增加发生明显变化,与处理 AT1 相比,CT1,DT1 的相对电导率分别显著提高了 43.4% 和 91.4% ($P < 0.01$).归因于过高的土壤 Pb 质量比对细胞膜进行了破坏,浓度越高,破坏越严重.

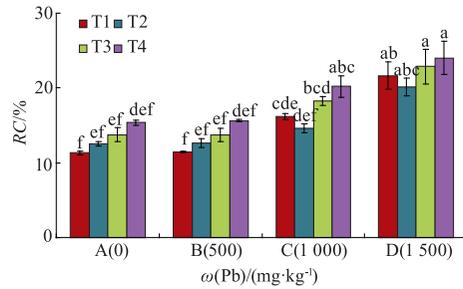


图4 水铅交互胁迫下小桐子叶片相对电导率
Fig. 4 Relative conductivity of *Jatropha curcas* L. leaves in water - lead interactive stress

水铅交互胁迫下,水分胁迫相同时,随着土壤 Pb 质量比的增加,相对电导率均增加,处理 D 尤为显著,与 BT2 和 CT2 相比,DT2 相对电导率显著提高了 59.8% 和 37.9%.土壤 Pb 质量比相同时,各处理相对电导率随着水分胁迫的加剧而增加,处理 B 和 D 下差异不具有统计学意义,归因于处理 B 下土壤 Pb 质量比仍在小桐子耐受性以内,而处理 D 下超过了小桐子耐受性,过多的 Pb 破坏了细胞壁的正常生理功能以及和细胞膜上的磷脂发生反应从而对细胞膜进行了破坏.与处理 CT2 相比,处理 CT4 相对电导率显著增加了 38.4%.与 CT1 相比,CT2 降低 9.9%,归因于适当的水分胁迫有利于作物生长发育及土壤呼吸,从而促进土壤中硝化细菌的产生,促进植物生长发育,提高了小桐子的耐受性.这与张波等^[13]的研究结论不一致,这可能是因为作物种类不同,细胞壁的弹性和可塑性以及细胞膜的结构不同.

DT4 相对电导率为所有处理最大值,与 AT1 相比显著提高了 112.4%,归因于此时水分和铅胁迫发生协同作用,加重了对小桐子细胞膜的破坏.

2.5 对叶水势的影响

叶水势是反映作物体内水分状况最灵敏的指标之一,水势越低表明作物吸收能力越强.水铅交互胁迫下各处理的小桐子叶水势如图 5 所示,图中 Lwp 为小桐子叶水势.显著性分析表明,水分胁迫、铅胁迫以及水铅交互胁迫均对小桐子叶水势的影响具有统计学意义.

数据分析表明,单一水分胁迫下,随着水分胁迫的加剧,叶水势明显降低,与 AT1 相比,AT3 和

AT4 的叶水势分别显著降低了 56.1% 和 118.7% ($P < 0.01$), 归因于小桐子幼苗为满足蒸腾耗水的需要以及细胞缺水严重, 细胞水势下降以及叶水势下降从而增强其从土壤中吸水的能力. 单一铅胁迫下, 随着土壤 Pb 质量比的增加, 叶水势先降低后增加, 差异不具有统计学意义, 归因于在 A 和 B 土壤 Pb 质量比时并未影响小桐子的正常生长和发育, 而当土壤 Pb 质量比达到 C 和 D 时, 小桐子本身蒸腾量少, 加之细胞膜透性变大导致细胞吸水能力减弱, 从而导致小桐子叶水势增大.

水铅交互胁迫下, 水分胁迫相同时, 植物叶水势随土壤 Pb 质量比的增加而显著增大, 与处理 BT2 相比, CT2 和 DT2 的叶水势分布显著增加了 29.9% 和 47.9%; 与 BT3 相比, 处理 CT3 和 DT3 的叶水势分别显著增加了 59.4% 和 67.4%, 这可能与此时小桐子幼苗遭受土壤 Pb 离子的迫害, 其植物生长遭到严重抑制, 且细胞膜透性破坏程度较大, 细胞吸水能力降低有关. 土壤 Pb 质量比相同时, 处理 B 下植物叶水势随着水分胁迫的加剧而显著降低, 与处理 BT2 相比, BT3 和 BT4 的植物叶水势分别显著降低了 29.8% 和 41.9%, 归因于此时土壤 Pb 并未影响小桐子的正常生长和发育, 与无铅胁迫处理相似, 而 C 和 D 的土壤 Pb 质量比下, 植物叶水势随着水分胁迫的加剧而增大, 差异不具有统计学意义. 与 CT1 相比, 处理 CT2 的植物叶水势降低了 8.6%, 归因于适当的水分胁迫提高了小桐子的抗 Pb 胁迫能力.

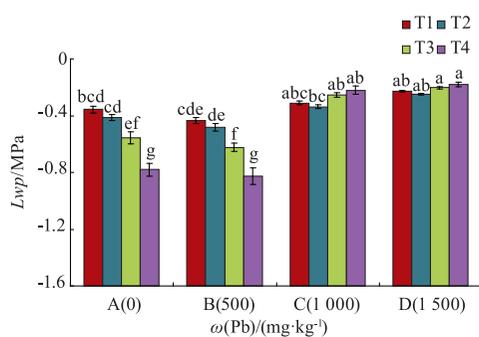


图5 水铅交互胁迫下小桐子叶水势

Fig. 5 Leaf water potential of *Jatropha curcas* L. in water-lead interaction stress

3 结论

采用水铅交互胁迫对小桐子进行盆栽试验, 探讨了小桐子修复方法的机理, 为后续大田试验研究提供参考. 结论如下:

1) 土壤 Pb 质量比为 B 时植物所受影响不具有统计学意义; 处理 C, D 严重抑制小桐子生长, 处理 CT2 生物量显著高于处理 CT1, 与 CT1 相比, CT2 的生物量显著提高了 18.9%; 各 Pb 处理中, 随水分胁迫加剧, 植物有效提取量先增加后降低, CT2 处理有效提取量最大, 达到了 536.62 μg , 与 CT1 相比, CT2 有效提取量显著提高了 5.1%.

2) 水铅交互胁迫下, 小桐子叶片 SOD, POD 活性均为先升后降的趋势, 分别在处理 C 和 B 时达到最大值, 与 CT1 相比, CT2 的 SOD, POD 活性分别提高了 10.8% 和 11.3%; 高浓度的铅严重破坏小桐子细胞膜透性以及增大了叶水势, 与 CT1 相比, CT2 的叶片植物相对电导率降低了 9.9%, 叶水势降低了 8.6%, 适当的水分胁迫不仅减少了灌水量而且提高了在 C 土壤铅浓度下小桐子的生物量、有效提取量以及其对铅的耐受性.

3) 土壤 Pb 质量比为 B 时, 推荐采用 T2 灌水, 而当土壤 Pb 质量比为 C 时, 无论灌水量如何变化都导致了小桐子生物量的显著降低, 但灌水处理 T2 较其他灌水处理更有利于提高小桐子对 Pb 的耐性及修复效率, 且对小桐子的正常生长发育影响较小.

参考文献 (References)

- [1] KANWAL Urooj, ALI Shafaqat, SHAKOOR Muhammad Bilal, et al. EDTA ameliorates phytoextraction of lead and plant growth by reducing morphological and biochemical injuries in *Brassica napus* L. under lead stress [J]. *Environ sci pollut res*, 2014, 21 (6): 9899 - 9910.
- [2] SHU Xiao, YIN Liyan, ZHANG Quanfa, et al. Effect of Pb toxicity on leaf growth, antioxidant enzyme activities, and photosynthesis in cuttings and seedlings of *Jatropha curcas* L. [J]. *Environ sci pollut res*, 2012, 19 (3): 893 - 902.
- [3] 王卫华, 雷龙海, 杨启良, 等. 重金属污染土壤植物修复研究进展 [J]. *昆明理工大学学报 (自然科学版)*, 2015, 40(2): 114 - 122.
WANG Weihua, LEI Longhai, YANG Qiliang, et al. Research progress on phytoremediation of soil contaminated by heavy metals [J]. *Journal of Kunming University of Science and Technology (natural science edition)*, 2015, 40(2): 114 - 122. (in Chinese)
- [4] PANDEY Vimal Chandra, SINGH Kripal, SINGH Jay Shankar, et al. *Jatropha curcas*: a potential biofuel plant for sustainable environmental development [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, 16 (5): 2870 - 2883. (下转第 540 页)