

杂交鹅掌楸不同无性系 对 Pb 胁迫的生理响应及抗性比较

赵志新, 乔瑞芳, 季孔庶^①

(南京林业大学森林资源与环境学院, 江苏 南京 210037)

摘要: 采用盆栽法研究了4个杂交鹅掌楸(*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*)无性系扦插苗对土壤 Pb 胁迫的生理响应与抗性差异。研究表明, Pb 胁迫能抑制杂交鹅掌楸无性系扦插苗生长, 使叶片失绿变黄、根系活力下降, 且 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ Pb 胁迫的抑制效果更明显。随 Pb 胁迫时间的延长, 4个杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片的相对电导率和 MDA 含量均持续增加, 胁迫结束时, 相对电导率和 MDA 含量分别是对照的 1.45~1.92 倍和 2.23~3.23 倍。叶片的 POD 活性和游离脯氨酸含量在整个 Pb 胁迫过程中呈先升后降的变化趋势; 不同无性系的 SOD 活性变化存在一定差异。随着 Pb 浓度的增加, 杂交鹅掌楸不同无性系扦插苗各生理指标的变化幅度各异。比较发现, 无性系 NE60 对 Pb 胁迫的抗性最强。

关键词: 杂交鹅掌楸; Pb 胁迫; 生理响应; 抗性

中图分类号: Q948.116; S792.21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-0978(2007)04-0007-06

Comparison of resistance and physiological response of different clones of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) to Pb stress ZHAO Zhi-xin, QIAO Riu-fang, JI Kong-shu^①
(College of Forest Resources and Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China),
J. Plant Resour. & Environ. 2007, 16(4): 7-12

Abstract: Physiological response and resistance of four clone stecklings of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) to Pb stress in soil were studied by pot culture method. The results showed that growth of hybrid tulip tree stecklings was restrained by Pb stress, leaves became yellow and root activity decreased, and the inhibition effect was more obvious under Pb stress of $1.0 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$. Along with prolonging of Pb stress time, relative conductivity and MDA content of four clone stecklings increased gradually, and were 1.45-1.92 times and 2.23-3.23 times to the control respectively at the end of Pb stress. POD activity and free proline content increased firstly then decreased during whole period of Pb stress, and SOD activity changes varied among different clone stecklings. With gradually increasing of Pb concentration, physiological indexes of four clone stecklings changed inconsistently. It is concluded that NE60 is the most resistant clone to Pb stress among four clones.

Key words: hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*); Pb stress; physiological response; resistance

随着城市交通量的增加, 铅污染已经成为当前城市环境污染的主要污染源之一^[1]。进入生物圈的铅可通过迁移、转化和富集过程及食物链中的“生物放大”作用对动植物产生极大危害。由于木本植物对重金属具有潜在的吸收和积累能力, 在修复生态环境中起到不可替代的作用, 因此其利用前景十分广阔。杂交鹅掌楸(*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*)生长迅速、干形通直、树形优美、病虫害极少, 是新型的园林观赏和绿化树种^[2], 目前已应用于城市环境绿化。作者以植株生长量、SOD 和 POD

活性及丙二醛(MDA)和游离脯氨酸含量为指标, 研究了杂交鹅掌楸扦插苗对不同浓度 Pb 胁迫的生理响应, 比较了杂交鹅掌楸不同无性系对 Pb 胁迫的抗性, 以期杂交鹅掌楸优良抗性品种选育及其在重金属污染土壤修复中的广泛应用提供实验依据。

收稿日期: 2007-03-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070633)

作者简介: 赵志新(1981-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事观赏植物遗传育种方面的研究。

^① 通讯作者 E-mail: ksji@njfu.edu.cn

1 材料和方法

1.1 材料

供试的杂交鹅掌楸无性系为 NE13、NE60、NE04 及 NE43, 为 2005 年夏季扦插苗, 取自南京林业大学林木遗传与基因工程国家重点实验室苗圃。

1.2 方法

1.2.1 处理方法 实验于 2006 年 3 月 8 日至 11 月 5 日在南京林业大学树木园温室内进行。盆栽基质为沙壤土, pH 4.89, 土壤中含有有机质 3.4%、速效氮 $75.6 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、速效磷 $54.4 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、速效钾 $81.2 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 、全 Pb 含量 $29.3 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 。土壤风干过筛, 每盆 (规格 33 cm × 40 cm) 装干土 12.5 kg。

2006 年 3 月 8 日选取长势一致的扦插苗进行盆栽, 每盆 2 株; 5 月 27 日移入温室内进行培养; 6 月 17 日开始进行 Pb 胁迫处理。用 $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ 配制 Pb 浓度为 $60 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 母液, 按 0.5 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (以土壤干质量计算纯 Pb 含量) 浓度均匀加入土壤中, 对照为不含 Pb 的清水。各无性系每处理 6 个重复。根据土壤水分情况, 每隔 3~5 天等量补充 1 次清水, 以保证土壤田间持水量约为 80%。

1.2.2 测定方法 胁迫至 0、26、54、81、106 和 129 d 时, 分别采集植株顶部第 8 片功能叶进行相对电导率、MDA 和游离脯氨酸含量及 POD 和 SOD 活性测定; 胁迫开始和结束时测定苗高和地径; 胁迫结束后进行扦插苗根系活力的测定。

苗高和地径测定参照 GB6000—85 的方法进行; 根系活力和相对电导率测定参照文献[3]的方法进行; 游离脯氨酸含量测定参照文献[4]的方法进行; SOD 和 POD 活性及 MDA 含量测定参照文献[5]的方法进行。

1.3 数据处理

采用 EXCEL 2003 和 SAS 6.12 软件对实验数据进行统计和差异显著性分析。

2 结果和分析

2.1 铅胁迫后杂交鹅掌楸无性系扦插苗生长量和根系活力的变化

Pb 胁迫后, 杂交鹅掌楸扦插苗的叶片失绿变黄, 部分叶片干枯, 植株生长缓慢。0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb

胁迫至 81 d, 扦插苗的叶片边缘开始失绿变黄; 胁迫至 129 d, 无性系 NE60 和 NE43 的扦插苗仅叶缘失绿, 而无性系 NE04 和 NE13 的扦插苗则表现为叶片失绿。1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫至 60 d, 杂交鹅掌楸扦插苗的叶片就开始失绿; 胁迫至 129 d, 无性系 NE60 和 NE43 植株的部分叶片失绿, 而无性系 NE13 和 NE04 植株的部分叶片则因失绿而干枯。实验全过程未发现因 Pb 胁迫致死的杂交鹅掌楸扦插苗。

Pb 胁迫 129 d 后, 4 个无性系扦插苗的株高生长量明显低于对照, 且 1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫对扦插苗株高生长量的影响更明显, 具体实验结果见表 1。在 0.5 和 1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 无性系 NE60 扦插苗的株高生长量分别为对照的 88.8% 和 85.8%, 受胁迫程度较轻; 无性系 NE13 扦插苗的株高生长量则分别为对照的 86.1% 和 63.8%, 受胁迫程度较重。方差分析结果表明, 各处理组中 4 个杂交鹅掌楸无性系扦插苗的株高生长量差异显著 ($P < 0.05$)。

表 1 Pb 胁迫对杂交鹅掌楸无性系扦插苗生长量和根系活力的影响
Table 1 Effect of Pb stress on increment and root activity of stocklings of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) clones

无性系 Clone	Pb 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb conc.	株高生长量/ cm Increment of height	地径生长量/ cm Increment of ground diameter	根系活力/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ Root activity
NE13	0.0	48.10 ± 3.63	0.28 ± 0.015	384.33 ± 24.01
	0.5	41.40 ± 5.36	0.22 ± 0.015	269.37 ± 45.62
	1.0	30.68 ± 1.20	0.16 ± 0.025	257.65 ± 6.33
NE60	0.0	46.23 ± 8.49	0.31 ± 0.012	393.26 ± 17.87
	0.5	41.07 ± 8.46	0.26 ± 0.026	319.17 ± 17.59
	1.0	39.67 ± 3.41	0.24 ± 0.027	271.46 ± 25.13
NE04	0.0	45.80 ± 3.02	0.28 ± 0.022	462.98 ± 20.44
	0.5	37.50 ± 9.15	0.21 ± 0.025	319.78 ± 46.83
	1.0	32.90 ± 6.32	0.16 ± 0.014	292.58 ± 10.16
NE43	0.0	52.47 ± 3.88	0.26 ± 0.022	379.00 ± 21.98
	0.5	48.18 ± 2.71	0.22 ± 0.005	303.19 ± 40.02
	1.0	40.00 ± 7.12	0.16 ± 0.014	217.90 ± 26.22

Pb 胁迫 129 d 后, 对照组扦插苗的地径生长量明显高于处理组, 1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫对扦插苗地径生长量的抑制作用最明显。0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫后, 无性系 NE60、NE43、NE13 和 NE04 扦插苗的地径生长量分别是对照的 83.9%、84.6%、78.6% 和 75.0%, 差异不显著。1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫后, 4 个杂交鹅掌楸无性系扦插苗的地径生长量差异显著

($P < 0.05$), 无性系 NE60 的地径生长量最高, 但也仅为对照的 77.4%。

研究表明, Pb 胁迫对杂交鹅掌楸各无性系扦插苗的株高和地径生长量均有不同程度的影响, 其中, 无性系 NE60 扦插苗的株高和地径生长量的降幅均最小, 表现出较强的抗性。

根系是植物与环境接触的重要界面, 土壤环境对植物的影响首先作用于根系, 植物根系感受逆境信号后将产生相应的生理变化^[6,7], 因此, 根系活力是反映植物根系生命活动能力强弱的重要生理指标之一, 其大小与植株抗逆性能力的强弱密切相关。由表 1 可见, Pb 胁迫 129 d 后, 杂交鹅掌楸不同无性系扦插苗的根系均较短, 须根数量较对照组少, 根系变黑; 无性系 NE60 扦插苗根系的受害程度最轻, 无性系 NE13 和 NE04 扦插苗根系的受害程度较重。在 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 各无性系扦插苗根系的受害程度均比 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 处理组严重, 须根数量明显减少, 根系腐烂变黑。Pb 胁迫 129 d 后, 杂交鹅掌楸 4 个无性系扦插苗的根系活力均有不同程度的下降, 且胁迫浓度越高, 根系活力的下降程度越大。方差分析结果表明, 4 个无性系扦插苗根系活力的变化差异显著 ($P < 0.05$)。在 Pb 胁迫

条件下, 无性系 NE60 扦插苗的根系活力降幅最小, 表现出较强的抗性。

2.2 铅胁迫后杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片生理指标的变化

2.2.1 相对电导率的变化

Pb 胁迫后, 杂交鹅掌楸各无性系扦插苗叶片相对电导率的变化状况见表 2。随 Pb 胁迫时间的延长, 4 个无性系扦插苗的叶片相对电导率均逐渐上升。在 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 4 个无性系叶片相对电导率的增幅较小, 说明扦插苗受伤害程度较轻; 胁迫至 129 d, 无性系 NE60、NE04、NE13 和 NE43 扦插苗的叶片相对电导率分别是胁迫前的 1.45、1.59、1.58 和 1.56 倍, 且差异显著 ($P < 0.05$), 其中无性系 NE60 的叶片相对电导率的变化幅度最小。 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫条件下, 4 个无性系扦插苗叶片的相对电导率增幅较大, 无性系 NE04、NE13 和 NE43 扦插苗叶片的相对电导率增加迅速, 胁迫至 129 d, 叶片相对电导率分别是胁迫前的 1.72、1.71 和 1.69 倍, 明显高于无性系 NE60。实验结果表明, 无性系 NE60 叶片细胞质膜受 Pb 伤害的程度较轻, 进一步说明无性系 NE60 抗 Pb 胁迫的能力较强。

表 2 Pb 胁迫对杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片相对电导率的影响

Table 2 Effect of Pb stress on relative conductivity of steckling leaves of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) clones

无性系 Clone	Pb 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb conc.	不同处理时间的相对电导率/% Relative conductivity at different treating times					
		0 d	26 d	54 d	81 d	106 d	129 d
NE13	0.5	13.84 ± 1.03	15.11 ± 0.34	15.09 ± 0.65	17.94 ± 0.60	21.11 ± 1.50	21.91 ± 0.79
	1.0	13.84 ± 1.03	15.70 ± 0.41	15.33 ± 1.36	17.63 ± 0.32	19.47 ± 2.32	23.67 ± 0.40
NE60	0.5	13.18 ± 0.44	14.17 ± 0.44	15.20 ± 0.67	16.06 ± 0.83	16.81 ± 0.91	19.17 ± 1.96
	1.0	13.18 ± 0.44	15.43 ± 0.67	16.29 ± 0.30	17.55 ± 1.20	18.68 ± 0.38	21.29 ± 0.92
NE04	0.5	14.39 ± 0.81	18.13 ± 0.49	15.99 ± 0.55	21.24 ± 1.13	22.10 ± 1.06	22.94 ± 2.37
	1.0	14.39 ± 0.81	15.47 ± 0.52	17.41 ± 1.04	21.20 ± 1.91	20.89 ± 0.45	24.80 ± 1.99
NE43	0.5	15.22 ± 0.74	16.33 ± 0.53	15.85 ± 0.67	20.93 ± 1.97	22.73 ± 0.68	23.80 ± 1.05
	1.0	15.22 ± 0.74	15.27 ± 1.28	18.08 ± 0.53	25.20 ± 2.16	22.35 ± 1.08	25.78 ± 2.21

2.2.2 MDA 含量的变化

植物组织对环境胁迫的一个共同反应是脂质过氧化作用, 表现为 MDA 不断累积, 植物体受到伤害^[8]。Pb 胁迫下, 4 个杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片 MDA 含量变化情况见表 3。由表 3 可见, 4 个无性系扦插苗叶片的 MDA 含量均随胁迫时间延长而逐渐增加, 并在胁迫结束时达到最高。方差分析结果表明, 4 个无性系的 MDA 含量变化差异极显著 ($P < 0.01$)。胁迫至 26 d, 无性系

NE13、NE04 和 NE43 扦插苗叶片的 MDA 含量均显著增加, 随后降低, 这与扦插苗保持较高保护酶活性, 从而降低细胞质膜的过氧化作用有关; 胁迫至 81 d 后, MDA 含量均又迅速上升, 表明 Pb 胁迫对杂交鹅掌楸扦插苗叶片细胞膜的损害加重。无性系 NE60 扦插苗叶片的 MDA 含量在整个 Pb 胁迫过程中缓慢上升, 至胁迫结束时, 0.5 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 胁迫处理组扦插苗叶片的 MDA 含量分别是胁迫前

的2.13和2.23倍;而在0.5和1.0 mg · L⁻¹ Pb胁迫处理组中,无性系 NE13 扦插苗叶片的MDA含量增幅最大,分别是胁迫前的3.15和3.23倍。研究表明,抗性较强的无性系 NE60 叶片内的MDA累积量明显低于其他3个无性系。

2.2.3 保护酶活性的变化 随Pb胁迫时间的延长,无性系 NE04 和 NE43 扦插苗叶片的SOD活性呈先升后降的变化趋势,而无性系 NE60 和 NE13 的SOD活性则呈先升后降再升高的变化趋势(表4),4个无性系扦插苗叶片的SOD活性变化差异极显著($P < 0.01$)。胁迫结束后,4个无性系叶片的SOD活性均高于胁迫前。在1.0 mg · L⁻¹ Pb胁迫条件下,无性系 NE60 和 NE13 扦插苗叶片的SOD活性均高于0.5 mg · L⁻¹ Pb处理组,但无性系 NE04 和 NE43 扦插苗叶片的SOD活性在胁迫结束时却低于0.5 mg · L⁻¹ Pb处理组。

随Pb胁迫时间的延长,4个无性系扦插苗叶片

的POD活性均呈先升后降的变化趋势,且在胁迫至106 d达到最高(表5)。方差分析结果表明,4个无性系扦插苗叶片的POD活性变化差异极显著($P < 0.01$)。在0.5和1.0 mg · L⁻¹ Pb胁迫条件下,无性系 NE60 扦插苗叶片的POD活性一直处于较高水平,胁迫至106 d,POD活性分别较胁迫前提高8.30和11.28倍;无性系 NE43 扦插苗叶片的POD活性则处于较低水平,胁迫至106 d,POD活性仅较胁迫前提高4.27和3.23倍;无性系 NE13 和 NE04 扦插苗叶片的POD活性变化趋势接近,变化幅度介于无性系 NE60 和 NE43 之间。

从SOD和POD活性的变化趋势可以看出,抗性较强的无性系 NE60 在Pb胁迫期间一直保持较高的SOD和POD活性,有利于清除活性氧,降低植物细胞受Pb胁迫的伤害程度;而抗性较弱的无性系的SOD和POD活性在胁迫后期下降明显,表明植物细胞的保护平衡系统受到破坏,细胞受害程度加重。

表3 Pb胁迫对杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片MDA含量的影响

Table 3 Effect of Pb stress on MDA content of steckling leaves of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) clones

无性系 Clone	Pb浓度/mg · L ⁻¹ Pb conc.	不同处理时间的MDA含量/nmol · g ⁻¹ (FW) MDA content at different treating times					
		0 d	26 d	54 d	81 d	106 d	129 d
NE13	0.5	18.19 ± 1.91	30.88 ± 2.78	26.04 ± 2.18	34.21 ± 2.47	36.47 ± 1.03	57.44 ± 3.88
	1.0	18.19 ± 1.91	26.44 ± 1.88	26.01 ± 0.79	32.08 ± 1.29	39.11 ± 0.28	58.88 ± 3.53
NE60	0.5	19.32 ± 0.77	18.50 ± 0.87	24.42 ± 0.81	28.63 ± 0.30	33.93 ± 3.09	41.23 ± 0.99
	1.0	19.32 ± 0.77	20.14 ± 1.16	23.00 ± 1.12	23.28 ± 0.94	31.59 ± 0.59	43.20 ± 2.29
NE04	0.5	22.56 ± 0.23	32.67 ± 1.46	30.45 ± 6.40	28.26 ± 1.93	33.67 ± 1.21	62.45 ± 0.80
	1.0	22.56 ± 0.23	28.23 ± 1.90	23.46 ± 0.61	28.31 ± 1.30	32.89 ± 1.47	52.74 ± 4.91
NE43	0.5	24.27 ± 1.28	34.67 ± 1.43	29.83 ± 1.74	32.98 ± 0.89	31.36 ± 1.47	54.41 ± 3.09
	1.0	24.27 ± 1.28	35.77 ± 1.46	26.76 ± 1.58	29.02 ± 1.00	29.57 ± 2.81	56.35 ± 5.83

表4 Pb胁迫对杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片SOD活性的影响

Table 4 Effect of Pb stress on SOD activity of steckling leaves of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) clones

无性系 Clone	Pb浓度/mg · L ⁻¹ Pb conc.	不同处理时间的SOD活性/U · g ⁻¹ (FW) SOD activity at different treating times					
		0 d	26 d	54 d	81 d	106 d	129 d
NE13	0.5	62.73 ± 9.16	118.16 ± 4.99	124.77 ± 4.94	121.86 ± 5.72	100.04 ± 7.62	131.17 ± 3.17
	1.0	62.73 ± 9.16	115.51 ± 3.02	130.54 ± 6.55	124.65 ± 6.21	106.65 ± 12.40	131.77 ± 5.81
NE60	0.5	60.55 ± 6.58	117.42 ± 8.40	130.77 ± 7.29	140.88 ± 4.52	101.98 ± 10.90	139.06 ± 2.68
	1.0	60.55 ± 6.58	119.42 ± 2.71	130.81 ± 8.92	147.64 ± 3.49	130.55 ± 20.77	151.51 ± 7.08
NE04	0.5	68.93 ± 4.14	124.16 ± 9.51	122.27 ± 4.99	130.15 ± 4.52	135.78 ± 4.81	112.62 ± 17.39
	1.0	68.93 ± 4.14	129.30 ± 4.43	109.64 ± 9.43	129.37 ± 8.79	138.02 ± 5.55	87.12 ± 13.30
NE43	0.5	54.38 ± 3.92	87.69 ± 6.83	115.42 ± 4.96	125.64 ± 5.27	139.77 ± 2.54	113.15 ± 22.82
	1.0	54.38 ± 3.92	112.95 ± 4.92	135.67 ± 1.31	136.05 ± 2.31	148.43 ± 2.54	102.92 ± 20.62

表5 Pb胁迫对杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片 POD活性的影响

Table 5 Effect of Pb stress on POD activity of steckling leaves of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) clones

无性系 Clone	Pb 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb conc.	不同处理时间的 POD 活性/ $\text{OD}_{470} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$ POD activity at different treating times					
		0 d	26 d	54 d	81 d	106 d	129 d
NE13	0.5	61.79 ± 1.77	61.79 ± 5.14	99.90 ± 9.69	273.26 ± 11.73	387.95 ± 49.40	379.05 ± 6.86
	1.0	61.79 ± 1.77	81.73 ± 2.39	97.27 ± 5.36	263.90 ± 5.05	399.94 ± 31.81	385.64 ± 26.75
NE60	0.5	55.01 ± 4.91	107.16 ± 3.70	143.29 ± 1.82	285.93 ± 7.98	456.64 ± 9.37	329.26 ± 10.63
	1.0	55.01 ± 4.91	90.54 ± 0.19	118.20 ± 3.93	280.50 ± 16.25	620.79 ± 4.44	349.87 ± 8.64
NE04	0.5	70.26 ± 9.37	110.04 ± 7.52	120.77 ± 8.60	249.22 ± 46.61	420.35 ± 26.80	316.80 ± 43.09
	1.0	70.26 ± 9.37	74.81 ± 11.66	93.57 ± 3.81	244.64 ± 11.89	421.59 ± 35.62	340.78 ± 10.40
NE43	0.5	93.34 ± 6.35	78.31 ± 4.61	134.31 ± 5.29	344.62 ± 31.38	398.31 ± 18.83	221.19 ± 19.43
	1.0	93.34 ± 6.35	89.45 ± 6.57	137.03 ± 9.22	273.40 ± 3.72	301.30 ± 5.49	244.04 ± 34.28

2.2.4 游离脯氨酸含量的变化 随 Pb 胁迫时间的延长,4 个杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片游离脯氨酸含量均呈先升后降的变化趋势,各处理组的游离脯氨酸含量均在胁迫至 26 或 54 d 达到最高(表 6)。方差分析结果表明,游离脯氨酸含量变化在 4 个无性系间差异极显著($P < 0.01$)。在 Pb 胁迫过程中,

无性系 NE43 和 NE60 扦插苗叶片的游离脯氨酸含量相对较高,且无性系 NE60 叶片的游离脯氨酸含量在胁迫至 106 d 后有所增加。1.0 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb 处理组的叶片游离脯氨酸含量基本高于 0.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理组,说明高浓度 Pb 胁迫能促进杂交鹅掌楸扦插苗叶片游离脯氨酸的积累。

表6 Pb胁迫对杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片游离脯氨酸含量的影响

Table 6 Effect of Pb stress on free proline content of steckling leaves of hybrid tulip tree (*Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*) clones

无性系 Clone	Pb 浓度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Pb conc.	不同处理时间的游离脯氨酸含量/ $\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}(\text{FW})$ Free proline content at different treating times					
		0 d	26 d	54 d	81 d	106 d	129 d
NE13	0.5	20.08 ± 1.31	50.11 ± 4.49	19.80 ± 1.32	18.57 ± 0.76	16.64 ± 0.68	15.02 ± 0.88
	1.0	20.08 ± 1.31	53.29 ± 2.96	21.95 ± 2.83	21.29 ± 1.42	17.88 ± 0.45	16.94 ± 0.62
NE60	0.5	15.94 ± 1.77	42.40 ± 2.48	22.40 ± 0.39	23.08 ± 0.36	13.10 ± 2.21	18.38 ± 1.77
	1.0	15.94 ± 1.77	32.81 ± 0.66	21.50 ± 0.79	21.16 ± 1.10	16.84 ± 1.14	21.39 ± 0.51
NE04	0.5	22.39 ± 1.54	29.81 ± 2.51	24.97 ± 0.99	16.11 ± 0.51	15.17 ± 0.57	16.45 ± 0.24
	1.0	22.39 ± 1.54	28.13 ± 1.13	34.08 ± 1.79	25.08 ± 2.00	20.13 ± 1.14	17.48 ± 0.51
NE43	0.5	12.07 ± 0.34	22.53 ± 0.93	30.13 ± 3.14	28.33 ± 3.46	19.32 ± 0.73	17.93 ± 1.00
	1.0	12.07 ± 0.34	24.15 ± 2.87	32.49 ± 1.18	25.56 ± 2.86	22.27 ± 0.93	19.52 ± 1.52

3 讨 论

当 Pb 在植物组织中的累积超过一定阈值时就会对植物产生伤害,使植物体内的代谢过程紊乱,植物的生长发育受到抑制,甚至导致植物死亡^[9]。有研究表明,生长在重金属污染土壤中的草坪草根系大量死亡,导致草坪草根系生物量下降、根系活力急剧降低,从而影响根系对水肥的吸收和传导,最终影响地上部分的生长^[10]。研究结果表明,Pb 胁迫能导致杂交鹅掌楸无性系扦插苗叶片失绿、叶缘干枯变黄、根系变黑腐烂、植株生长缓慢;扦插苗株高和地径生长量均较对照明显下降,根系活力也明显下降,

且随 Pb 胁迫浓度的提高,下降幅度增大。在 Pb 胁迫处理的全过程中,未发现杂交鹅掌楸无性系受 Pb 毒害死亡的扦插苗,说明杂交鹅掌楸对 Pb 胁迫具有一定的抗性,以无性系 NE60 对 Pb 胁迫的抗性最强。

膜质过氧化是膜上不饱和脂肪酸所发生的一系列活性氧反应,是植物受逆境胁迫伤害的共同特征之一,其主要产物 MDA 可作为植物膜质过氧化反应强弱的指标之一^[11,12]。重金属胁迫下,植物叶片中的 MDA 含量增加,说明细胞膜受到损伤,膜透性增大,电解质外渗量增加^[13,14]。大量研究结果表明,植物受到 Pb 胁迫后,地上部分和根系的 MDA 含量均显著增加,且随 Pb 浓度的提高及胁迫时间的延长而提高^[15,16]。实验结果显示,随着 Pb 胁迫时间的延

长,杂交鹅掌楸叶片的相对电导率和MDA含量均增加,说明供试植株的叶片细胞发生膜质过氧化反应且细胞质膜受到损伤,Pb胁迫浓度的提高加速了MDA的累积和质膜透性的增大。无性系NE60扦插苗叶片的相对电导率和MDA含量的增幅较小,说明无性系NE60对Pb胁迫的抗性较强。

在逆境条件下,保护酶系统的变化和植物的抗逆性关系密切。重金属胁迫可改变植物细胞内的保护酶(如SOD、POD和CAT等)活性^[16-18],改变程度与植物对重金属胁迫的抗性有关^[19]。研究结果表明,随Pb胁迫时间的延长,杂交鹅掌楸扦插苗叶片中的POD活性呈先升后降的变化趋势,Pb胁迫浓度提高,POD活性增加(无性系NE43除外)。无性系NE60和NE13扦插苗叶片的SOD活性呈先升后降再升高的变化趋势,无性系NE04和NE43扦插苗叶片的SOD活性则呈先升后降的变化趋势。在Pb胁迫的全过程中,抗性较强的无性系NE60一直保持较高的POD和SOD活性,进一步表明无性系NE60对Pb胁迫具有一定的适应能力和抵御伤害的能力。

游离脯氨酸是植物适应逆境的重要渗透调节物质之一,植物体内游离脯氨酸含量的增加是植物对逆境胁迫的一种适应性反应,与植物的抗逆性关系密切^[20]。Pb胁迫条件下,杂交鹅掌楸扦插苗叶片中的游离脯氨酸含量均呈先升后降的变化趋势,这与前人的相关研究结果^[21-23]一致。

综合上述实验结果可以看出,杂交鹅掌楸无性系NE60对Pb胁迫有较强的抗性,可用于城市道路或铅污染相对较重区域的环境绿化。此外,应进一步开展多点试种和跟踪调查,并结合相关指标的测定,以明确杂交鹅掌楸不同无性系对铅污染抗性的强弱,为城市道路绿化和铅污染区的环境绿化提供研究基础。

参考文献:

- [1] 李寒娥,李秉涛,蓝盛芳.行道树对城市道路交通环境的响应研究[J].应用与环境生物学报,2005,11(4):435-439.
- [2] 季孔庶,王章荣,温小荣.杂交鹅掌楸生长表现及其木材胶合板性能[J].南京林业大学学报:自然科学版,2005,29(1):71-74.
- [3] 郝再斌,苍晶,徐仲.植物生理实验[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2004.101-103.
- [4] 徐晓峰,朱才.小麦叶中脯氨酸测定方法的研究[J].生物技术,1997,7(1):40-42.
- [5] 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,2000.184-185.
- [6] 束良佐,刘英慧.硅对盐胁迫下玉米幼苗生长的影响[J].农业环境保护,2001,20(1):38-40.
- [7] 李德华,贺立源,刘武定.玉米根系活力与耐铝性的关系[J].中国农学通报,2004,20(1):161-164.
- [8] 吴晓丽,罗玉明,徐迎春,等.镉胁迫对狭叶香蒲某些生理指标的影响[J].植物资源与环境学报,2007,16(1):74-76.
- [9] Zhang G P, Fukaimi M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage[J]. Field Crop Res, 2002, 77(3): 93-98.
- [10] 王慧忠,何翠屏.重金属离子胁迫对草坪草根系生长及其活力的影响[J].中国草地,2002,24(3):55-59.
- [11] 赵非侠,翟禄新,陈荃,等. Cd、Pb复合处理下对植物膜的伤害初探[J].兰州大学学报:自然科学版,2002,38(2):115-120.
- [12] 李兆君,马国瑞,徐建民,等.植物适应重金属Cd胁迫的生理及分子生物学机理[J].土壤通报,2004,35(2):234-238.
- [13] Reddy A M, Kumar S G, Jyothsnakumari G, et al. Lead induces changes in antioxidant metabolism of horsegram [*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdec.] and bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. Chemosphere, 2005, 60(1): 97-101.
- [14] 田如男,薛建辉,潘良,等.铅胁迫对4种常绿阔叶行道树幼苗细胞膜透性的影响[J].南京林业大学学报:自然科学版,2004,28(4):43-46.
- [15] 李彩霞,张芬琴,王光忠.铅对绿豆幼苗生长的影响[J].植物资源与环境学报,2003,12(2):60-61.
- [16] 陈怀宇,李裕红,韦炜,等. Pb²⁺对桐花树幼苗抗氧化酶活性及脂质过氧化的影响[J].泉州师范学院学报:自然科学版,2006,24(2):94-99.
- [17] 徐勤松,施国新,郝怀庆. Cd、Cr(VI)单一及复合污染对菹草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响[J].广西植物,2003,21(1):87-90.
- [18] 任安芝,高玉葆,刘爽.青菜幼苗体内几种保护酶的活性对铅、镉、铬胁迫的反应研究[J].应用生态学报,2002,13(4):510-512.
- [19] 杨居荣,贺建群,蒋婉茹,等. Cd污染对植物生理生化的影响[J].农业环境保护,1995,14(5):193-197.
- [20] Wu J T, Chang S C, Chou T L. Intracellular proline accumulation in some algae exposed to copper and cadmium[J]. Bot Bull Acad Sinica, 1995, 36(1): 89-93.
- [21] 朱宇林.银杏对镉、铅及其复合污染的生理响应与抗性研究[D].南京:南京林业大学,2006.102-106.
- [22] 刘玲,杨双春,张洪林. Hg²⁺胁迫下玉米生理生态变化的研究[J].生态环境,2004,13(2):161-163.
- [23] 王启明.重金属Cr胁迫对玉米幼苗生理生化特性的影响[J].河南农业科学,2006,8(1):37-40.