

镉胁迫对不同家系杂交鹅掌楸生长及抗性的影响

赵志新, 乔瑞芳, 季孔庶

(南京林业大学 林木遗传与生物技术省部共建教育部重点实验室, 江苏 南京 210037)

摘要: 采用盆栽方法, 研究了杂交鹅掌楸 *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera* 5 个家系 1 年生实生苗对土壤镉胁迫的生理响应与抗性。结果表明, 在镉胁迫下, 杂交鹅掌楸叶片失绿变黄, 根系腐烂变黑, 且高质量分数镉胁迫下植株受抑制程度越明显。随着镉胁迫时间延长, 各家系相对电导率和丙二醛(MDA)质量摩尔浓度均出现了上升趋势, 胁迫增加上升趋势更明显。在 100 mg·kg⁻¹ 胁迫下, 5 个家系间超氧化物歧化酶(SOD)活性变化不一致; 在 200 mg·kg⁻¹ 胁迫下, 5 个家系 SOD 活性变化是先升后降, 胁迫结束时, NEF11 家系 SOD 活性下降最大, 相比对照降幅为 41.5%。采用隶属函数对上述指标进行综合分析, 得出 5 个家系在土壤镉胁迫下的抗性顺序为: NEF14>NEF15>NEF12>NEF13>NEF11。图 3 表 3 参 16

关键词: 植物学; 镉胁迫; 杂交鹅掌楸家系; 生理响应; 抗性

中图分类号: S718.0

文献标志码: A

文章编号: 1000-5692(2009)05-0667-07

Cadmium stress on growth and resistance of hybrid tulip trees: *Liriodendron chinense* × *Liriodendron tulipifera*

ZHAO Zhi-xin, QIAO Rui-fang, JI Kong-shu

(Key Laboratory of Forest Genetics & Biotechnology of Ministry of Education, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China)

Abstract: To understand the resistant ability of tulip tree hybrid (*Liriodendron chinense* × *Liriodendron tulipifera*) under the soil Cd(cadmium) stress, annual seedlings from five families labeled NEF11 to NEF15 of tulip tree hybrid planted in plastic pots with 0, 100 and 200 mg·kg⁻¹ soil Cd stress were studied. The results showed that the leaves of the annual seedlings turned yellow and roots rotted as the Cd stress strengthened. There were very significant different among the five families to resistant the soil Cd stress. The membrane penetrability and malondialdehyde (MDA) content in the leaves increased with the Cd stress prolong and strengthened. Change tendency of SOD activities among the five families was different under 100 mg·kg⁻¹ Cd stress, and the SOD activities increased at first and then decreased under 200 mg·kg⁻¹ Cd stress. The SOD activities in NEF11 decreased the largest at last, and its decline rate was 41.5% over the ck(contrast-ing). Subordinate function analysis for resistant ability to soil Cd stress of the five families was in the order: NEF14>NEF15>NEF12>NEF13>NEF11. [Ch, 3 fig. 3 tab. 16 ref.]

Key words: botany; cadmium(Cd) stress; *Liriodendron chinense* × *Liriodendron tulipifera*; physiological response; resistance

随着经济发展, 工业排污使得镉大量进入城市土壤, 造成了城市环境中镉的积累。镉是植物生长的非必需元素, 对植物具有明显的毒害作用, 通过食物链会危机人类健康^[1]。如何缓解和抑制镉的毒

收稿日期: 2008-05-20; 修回日期: 2008-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30070633)

作者简介: 赵志新, 从事园林植物遗传育种研究。E-mail: zhaozhix0415@163.com。通信作者: 季孔庶, 教授, 博士生导师, 从事林木遗传改良、林业生物技术和观赏植物遗传育种等研究。E-mail: ksji@njfu.edu.cn

害,已引起了人们的广泛关注。木本植物是城市绿地生态系统的重要组成成分,对重金属具有潜在的吸收和积累能力,在城市环境维护和改善中发挥着重要作用,其应用前景广阔^[2]。杂交鹅掌楸 *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera* 生长迅速,树形优美,病虫害极少,是新型园林观赏和绿化树种^[3]。笔者以杂交鹅掌楸为材料,研究了土壤镉胁迫对其不同家系生理生化等指标的影响,分析它们对镉胁迫所呈现的抗性差异,旨在为杂交鹅掌楸抗性育种及城市绿化种植该树种提供相关依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试验处理

供试的 5 个杂交鹅掌楸家系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的 2005 年春季播种苗。参试家系为 NEF11, NEF12, NEF13, NEF14 和 NEF15。各家系杂交鹅掌楸亲本见表 1。

采用温室盆栽控制的方法。试验在南京林业大学树木园温室进行,盆栽基质为砂壤土,土样风干过筛,盆的规格为 33 cm × 40 cm,装干土为 12.5 kg·盆⁻¹。经测试分析,供试土壤有机质为 34.0 g·kg⁻¹, pH 4.89, 碱解氮 75.6 mg·kg⁻¹, 速效磷为 54.4 mg·kg⁻¹, 速效钾为 81.2 mg·kg⁻¹, 全镉为 4.5 mg·kg⁻¹。

2006 年 3 月 8 日选取长势一致的试验苗进行盆栽,1 株·盆⁻¹,4 月 27 日移入温室养护管理。5 月 13 日对各供试苗木进行处理,镉以 CdCl₂·2.5H₂O 盐溶液的形式加入,处理时先把 CdCl₂·2.5H₂O(以纯镉计算)配成 10 g·L⁻¹ 的母液,然后根据需要的处理均匀加入(以土壤干质量计算纯镉的量)。对照组用不含镉的清水均匀加入。各家系镉处理质量分数为 0, 100, 200 mg·kg⁻¹ 分别以 0, Cd100, Cd200 表示,每一家系的每一处理有 6 个重复。处理后根据每盆土壤水分状况,隔 3 ~ 5 d 等量的浇入淡水 1 次,使土壤的田间持水量保持在 80% 左右。试验在 9 月 30 日结束。

1.2 试验方法

1.2.1 采样时间 在胁迫后的 0, 28, 56, 84, 112, 140 d 采集样品,采集部分为杂交鹅掌楸植株自顶部第 8 片功能叶。分别在胁迫 0 d 和 140 d 时测定苗木苗高和地径,胁迫 140 d 时收集苗木根系测定根系活力。

1.2.2 测定方法 苗高、地径的测定,遵循《GB 6000-1985 主要造林树种苗木》的规定。根系活力、质膜相对透性参照郝再斌等^[4]的方法,超氧化物歧化酶(SOD)活性、丙二醛(MDA)质量摩尔浓度参照李合生^[5]的方法。

1.3 数据分析

试验数据采用 Excel 2003 和 SAS 6.12 软件分析。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫后杂交鹅掌楸不同家系生长量和根系活力的变化

在镉胁迫下,杂交鹅掌楸的叶片首先出现失绿,叶缘干枯变黄,部分新叶在萌发后出现卷曲,叶片较正常叶偏小,胁迫后期(112 d 后)出现叶片干枯脱落现象,植株生长矮小。在 Cd100 处理下,苗木迫害症状表现轻微,各家系在胁迫中后期(67 d 后)相继出现叶片失绿变黄。在 Cd200 处理下,不同家系胁迫症状出现的时间早晚不同,NEF12 和 NEF15 家系最早(胁迫 30 d 时)出现叶片失绿症状,随后是 NEF11 和 NEF13 家系(胁迫 50 d 时)相继出现,NEF14 家系直至胁迫 85 d 才出现叶片失绿干枯症状。

在镉胁迫 140 d 后,处理苗木高生长和地径生长量明显低于对照(表 2)。在 Cd100 水平下,5 个

表 1 参试材料及其亲本情况

Table 1 Hybrid families in current research and their parents

杂种家系	母本	父本
NEF11(回交家系)	C1(鹅掌楸)	F3(杂交鹅掌楸)
NEF12(回交家系)	F12(杂交鹅掌楸)	T2(北美鹅掌楸)
NEF13(回交家系)	T6(北美鹅掌楸)	FB(杂交鹅掌楸)
NEF14(正交家系)	C1(鹅掌楸)	T14(北美鹅掌楸)
NEF15(反交家系)	T6(北美鹅掌楸)	C22(鹅掌楸)

家系高生长量差异显著($F = 3.94$, $P < 0.05$), NEF14 家系高生长量最大, 是对照的 85.14%, 高生长量最小的是 NEF11 家系, 降低为对照的 61.67%。在 Cd200 水平下, 5 个家系高生长量差异不显著, NEF14 和 NEF15 家系高生长量较大, 分别为对照的 68.48%和 64.53%。NEF12, NEF11 和 NEF13 家系受胁迫较明显, 分别为对照的 58.27%, 57.70%和 47.88%。

在 Cd100 和 Cd200 水平下, 5 个家系地径生长量差异都不显著。在 Cd100 水平下, NEF12, NEF14, NEF11 和 NEF15 家系地径生长量分别是对照的 76.77%, 69.41%, 69.18%和 67.20%, 表现受胁迫较轻, NEF13 家系地径生长量受到影响较大, 是对照的 51.84%。在 Cd200 水平下, NEF14 和 NEF15 家系地径生长量是对照的 64.38%和 58.00%。NEF11, NEF12 和 NEF13 家系地径生长量受影响较大, 分别是对照的 50.82%, 50.32%和 48.62%。镉胁迫后, 杂交鹅掌楸各家系地径生长量受到不同程度的影响, NEF13 家系表现受伤害最大。

镉胁迫 140 d 后, 观察苗木根系发现, Cd200 处理下须根数量较对照明显减少, 大部分根系腐烂变黑, 受害严重, Cd100 处理下受害症状相对较轻。杂交鹅掌楸各家系在不同胁迫下根系活力都表现了不同程度的下降, 镉胁迫水平提高, 根系活力也有明显下降(表 2)。在 Cd100 处理下, 各家系根系活力差异显著($F = 4.81$, $P < 0.05$), NEF14 和 NEF15 家系受镉胁迫后根系活力是对照的 74.82%和 68.89%, 降幅较小。NEF13 和 NEF12 家系是对照的 59.34%和 56.79%, 而 NEF11 家系降幅显著, 仅是对照的 52.16%。在 Cd200 处理下, 各家系间差异极显著($F = 22.39$, $P < 0.01$), NEF14 家系为对照的 45.36%, NEF13 和 NEF15 家系是对照的 33.45%和 32.56%, NEF11 和 NEF12 家系仅是对照的 25.83%和 25.75%。由此可知, NEF14 家系在胁迫结束时根系活力相对较高, 而 NEF11 家系根系活力降幅最明显, 受镉胁迫影响最大。

表 2 镉胁迫对不同无性系杂交鹅掌楸苗生长量和根系活力的影响

Table 2 Effects of Pb stresses on growths and roots activities in different clones

家系	处理/(mg·kg ⁻¹)	苗高生长量/cm	地径生长量/cm	根系活力/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)
NEF11	0	51.50 ± 4.50	0.33 ± 0.05	259.99 ± 24.69
	100	31.76 ± 4.78	0.21 ± 0.06	134.50 ± 26.61
	200	29.72 ± 5.83	0.16 ± 0.03	75.71 ± 15.41
NEF12	0	60.00 ± 11.45	0.31 ± 0.08	282.69 ± 29.11
	100	47.16 ± 5.04	0.24 ± 0.04	160.53 ± 27.75
	200	34.96 ± 5.93	0.16 ± 0.03	70.79 ± 4.50
NEF13	0	60.02 ± 7.59	0.44 ± 0.06	288.41 ± 13.22
	100	42.26 ± 5.32	0.23 ± 0.06	171.14 ± 17.94
	200	28.74 ± 7.49	0.21 ± 0.04	96.48 ± 3.83
NEF14	0	70.50 ± 8.66	0.44 ± 0.06	292.37 ± 15.35
	100	60.02 ± 7.40	0.30 ± 0.03	218.76 ± 12.12
	200	48.28 ± 7.02	0.28 ± 0.03	132.60 ± 10.64
NEF15	0	70.76 ± 3.64	0.50 ± 0.03	306.85 ± 18.24
	100	53.72 ± 8.69	0.34 ± 0.05	211.38 ± 9.34
	200	45.66 ± 5.93	0.29 ± 0.05	99.92 ± 6.30

2.2 镉胁迫后杂交鹅掌楸各家系叶片质膜相对透性的变化

随着镉胁迫时间的延长, 在 2 种镉处理水平下 5 个家系相对电导率变化如图 1 所示。在 Cd100 水平下, 各家系相对电导率变化趋势不明显, 但各家系相对电导率变化差异极显著($F = 4.26$, $P < 0.01$),

NEF11 家系在胁迫初期相对电导率有明显增大趋势, 在胁迫后期趋于平缓, 其余 4 个家系变化较平缓。在 Cd200 水平下, 5 个家系相对电导率增加迅速, 且都在胁迫 141 d 时达到了峰值。NEF11, NEF15 和 NEF12 家系相对电导率变化明显, 说明电解质外渗较多, 胁迫至 141 d 相对电导率分别是未胁迫时的 2.24, 2.09 和 1.93 倍, 而 NEF13 和 NEF14 家系分别是未胁迫时的 1.57 和 1.43 倍, 不同家系相对电导率变化差异极显著 ($F = 18.82$, $P < 0.01$)。由此可以看出, 在镉胁迫下, 5 个家系在叶片质膜相对透性变化上存在差异, 低质量分数镉胁迫对苗木叶片质膜相对透性影响不大, 而高质量分数镉胁迫使苗木叶片质膜相对透性增加明显。

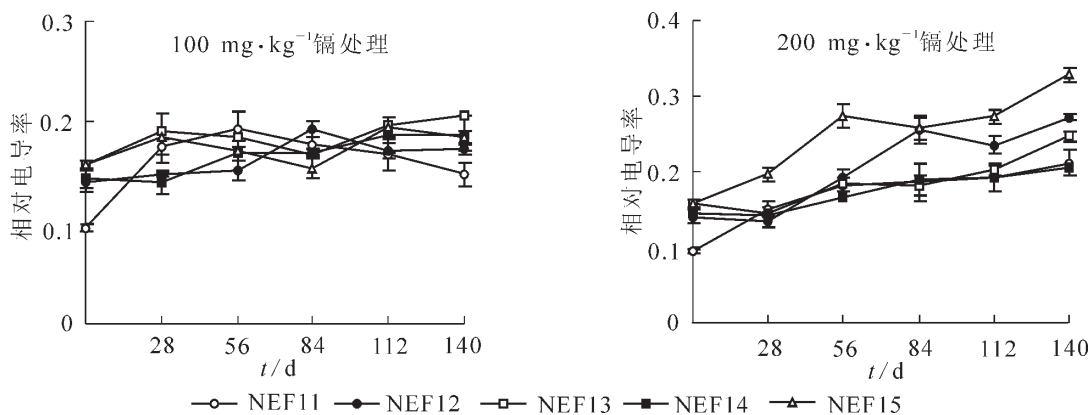


图 1 Cd 胁迫后不同家系叶片质膜相对透性的变化

Figure 1 Effects of Cd stress on membrane permeability in leaves of different clones

2.3 镉胁迫后杂交鹅掌楸各家系叶片丙二醛(MDA)的变化

随着镉胁迫时间延长, 5 个家系 MDA 质量摩尔浓度较未胁迫时都有不同程度的增加, 胁迫至 140 d 时, 都达到峰值(图 2)。在 Cd100 处理下, 5 个家系 MDA 质量摩尔浓度变化趋势平缓, 胁迫至 140 d 时, NEF13, NEF11, NEF12, NEF15 和 NEF14 家系 MDA 质量摩尔浓度分别是未胁迫时的 2.08, 1.73, 1.71, 1.66 和 1.48 倍, 但 NEF14 和 NEF15 家系 MDA 质量摩尔浓度的变化是先降低后增加, 这可能是在胁迫初期, NEF14 和 NEF15 家系体内含有较高的保护酶活性以至于降低了叶片膜质过氧化的程度。在 Cd200 处理下, 胁迫初期变化平缓, 胁迫至 56 d 后, 5 个家系 MDA 质量摩尔浓度增加迅速, 胁迫至 140 d 时, NEF13, NEF15, NEF11, NEF12 和 NEF14 家系 MDA 质量摩尔浓度分别是未胁迫时的 2.16, 2.01, 1.99, 1.98 和 1.54 倍。杂交鹅掌楸不同家系 MDA 质量摩尔浓度的变化差异极显著 ($F_{Cd100} = 6.14$, $F_{Cd200} = 5.67$, $P < 0.01$)。从上分析出, NEF14 家系 MDA 质量摩尔浓度增加最少, 表现了抗镉胁迫能力较强, NEF13 家系表现抗性最差。

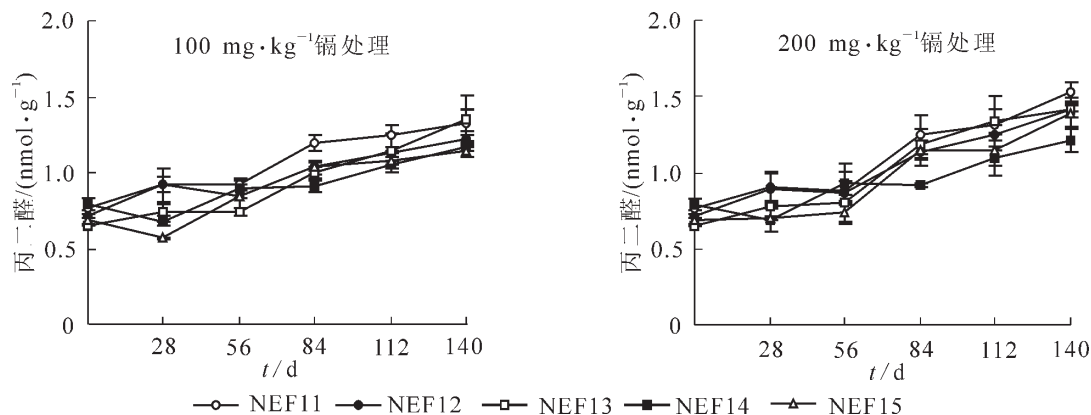


图 2 Cd 胁迫后不同家系叶片丙二醛(MDA)的变化

Figure 2 Effects of Cd stress on MDA content in leaves of different clones

2.4 镉胁迫后杂交鹅掌楸各家系叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化

由图 3 可知,随着镉胁迫时间的延长,在 Cd100 胁迫下,NEF14 和 NEF13 家系 SOD 活性变化是先上升后下降,先后在胁迫至 56 和 84 d 时达到峰值,增幅分别是对照的 25.8%和 43.8%;而 NEF11, NEF12 和 NEF15 家系 SOD 活性变化是升—降—升—降的变化过程,分别出现了 2 次峰值,NEF15 和 NEF12 家系在胁迫 56 d 时峰值最大,增幅分别是 43.1%和 41.53%,NEF11 家系在胁迫至 112 d 时峰值最大,增幅是 38.3%。在 Cd200 胁迫下,5 个家系 SOD 活性变化都是先升后降,胁迫后期,NEF11 家系降幅最大,NEF15 家系最先在胁迫 28 d 时出现峰值,其余 4 个家系都是在胁迫值 56 d 时达到峰值,增幅为 27.8%~52.0%。在 2 种镉处理下,不同家系 SOD 活性增加量存在极显著差异($F_{Cd100} = 6.74$, $F_{Cd200} = 8.51$, $P < 0.01$)。

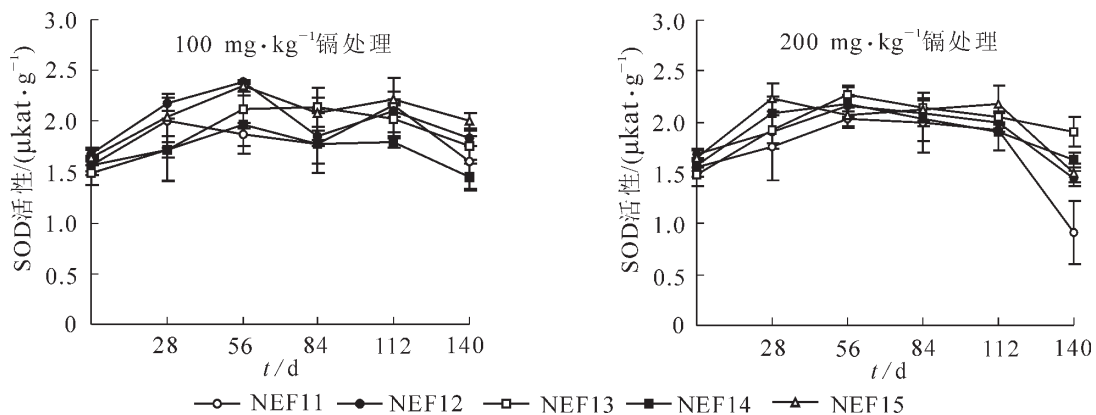


图 3 Cd 胁迫后不同家系叶片超氧化物歧化酶(SOD)活性的变化

Figure 3 Effects of Cd stress on SOD activities in leaves of different clones

2.5 杂交鹅掌楸各家系抗镉能力综合评定

植物抗性能力的大小受多个因素的影响,选用的指标不同,进行评定的结论也会存在差异。因此,对植物抗性的评定应以多个指标进行综合评定,才能正确反映植物抗性的大小。目前,对植物抗逆性综合评定的方法主要有隶属函数法、坐标综合评定法和层次分析法。笔者采用隶属函数法,对上述 6 个指标分别在不同质量分数镉处理下进行比较,综合评定 5 个家系的抗性。其基本计算方法为: $U(X_j) = (X_j - X_{\min}) / (-X_{\min})$; 其中: X_j 为某一指标的测定值/对照值, $X_{\max}$ 为某一指标的测定值/对照值中的最大值, $X_{\min}$ 为某一指标的测定值/对照值中的最小值。 $U(X_j)$ 值越大,抗性越强。

综合分析在各处理下杂交鹅掌楸 5 个家系对镉的抗性强弱为: NEF14 > NEF15 > NEF12 > NEF13 > NEF11 (表 3)。评定结果与镉胁迫下各家系的外部表现基本一致。

3 讨论

研究表明,镉胁迫可以引起苗木发育迟缓,叶片变小、卷曲,叶色呈萎黄病状态,随镉胁迫质量分数增加,伤害症状越明显^[7-8]。本试验中也出现了类似的伤害症状,苗木叶片失绿,叶缘干枯发黄,部分苗木新叶卷曲,植株生长矮小。5 个家系的高生长量和地径生长量都明显低于对照值,镉胁迫严重抑制了苗木生长,且胁迫质量分数越大抑制程度越明显。

根系是苗木接触重金属胁迫最原始的器官,极易受到重金属的毒害。同时,根系作为吸收养分的

表 3 杂交鹅掌楸各家系抗镉能力综合评定指数及排序

Table 3 Comprehensive evaluation index of heavy metal resistance and rank in hybrid tulip clones

家系	Cd100	Cd200	平均值	排序
NEF11	0.183 8	0.280 1	0.231 9	5
NEF12	0.622 1	0.246 0	0.434 1	3
NEF13	0.361 1	0.471 1	0.416 1	4
NEF14	0.822 4	0.807 3	0.814 9	1
NEF15	0.778 9	0.385 9	0.582 5	2

主要器官,其吸收能力的强弱将会直接影响到地上部分的营养状况、生长及产量水平。研究表明,镉胁迫能明显抑制小麦 *Triticum aestivum*^[9],辣椒 *Capsicum annuum*^[10],银杏 *Ginkgo biloba*^[11]等的根系活力。本试验结果显示,受镉胁迫5个月后,杂交鹅掌楸各家系在不同处理下根系活力都表现了不同程度的下降,与以上的研究结论相一致。镉胁迫加剧,根系活力下降更明显,在5个家系中,NEF14家系根系活力相对较高,而NEF11家系根系活力降幅最明显,受镉胁迫影响最大。

MDA是植物细胞膜脂过氧化的产物,其含量高低反映了细胞膜脂的过氧化水平,而细胞膜相对透性的大小,则是细胞膜结构和功能的间接反映。重金属胁迫下,植物叶片MDA质量摩尔浓度增加的研究已有不少研究^[9,12-13]。王云等^[14]研究也表明,植物幼苗中MDA与镉处理质量分数呈正相关。本试验表明,在镉胁迫下,5个家系相对电导率和MDA质量摩尔浓度均出现了上升趋势,低质量分数镉对苗木叶片质膜相对透性影响不大,MDA质量摩尔浓度变化趋势平缓,而高质量分数镉对苗木叶片质膜相对透性和MDA质量摩尔浓度影响都较大。

许多研究表明,SOD作为超氧自由基清除剂,其活性高低依重金属胁迫的程度和植物的种类不同而不同,与植物抗逆性大小有一定相关性^[15-16]。随着镉胁迫时间延长,5个家系SOD活性变化较为复杂。在Cd100胁迫下,不同家系间SOD活性变化不一致;在Cd200胁迫下,5个家系SOD活性变化都是先升后降。

综合本次试验的结果可以得出以下结论:在Cd100和Cd200胁迫下,杂交鹅掌楸NEF14和NEF15家系对镉的抗性都强于其他3个家系,可见正交和反交家系的植株抗性要强于回交家系。其抗性机制尚有待深入研究,但在镉污染区域选择种植杂交鹅掌楸不同家系时,具有一定参考价值。

参考文献:

- [1] 熊治廷. 植物抗污染进化及其遗传生态学代价[J]. 生态学杂志, 1997, **16** (1): 53 - 57.
XIONG Zhiting. Pollution resistant evolution in plants and its genecological costs [J]. *Chin J Ecol*, 1997, **16** (1): 53 - 57.
- [2] 杨学军, 唐东芹, 徐东新, 等. 上海地区绿化树种重金属污染防治特征的研究[J]. 应用生态学报, 2004, **15** (4): 687 - 690.
YANG Xuejun, TANG Dongqin, XU Dongxin, et al. Characters of greening tree species in heavy metal pollution protection in Shanghai[J]. *Chin J Appl Ecol*, 2004, **15** (4): 687 - 690.
- [3] 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.
JI Kongshu, WANG Zhangrong, WEN Xiaorong. Growth heterosis and plywood characters of *Liriodendron chinense* × *L. tulipifera*[J]. *J Nanjing For Univ Nat Sci Ed*, 2005, **29** (1): 71 - 74.
- [4] 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.
- [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] 王鹏, 刘三军. 不同葡萄品种抗旱性、抗盐性及抗涝性的比较[J]. 河南农业科学, 2005 (10): 76 - 79.
WANG Peng, LIU Sanjun. Comparison of drought tolerance, salt tolerance, moisture tolerance in some varieties grape [J]. *J Henan Agric Sci*, 2005 (10): 76 - 79.
- [7] 张利红, 李培军, 李雪梅, 等. 镉胁迫对小麦幼苗生长及生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2005, **24** (4): 458 - 460.
ZHANG Lihong, LI Peijun, LI Xuemei, et al. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of wheat seedlings [J]. *Chin J Ecol*, 2005, **24** (4): 458 - 460.
- [8] 孔祥生, 郭秀璞, 张妙霞, 等. 镉胁迫对玉米幼苗生长及生理生化的影响[J]. 华中农业大学学报, 1999, **18** (2): 111 - 113.
KONG Xiangsheng, GUO Xiupu, ZHANG Miaoxia, et al. Effect of cadmium stress on seedling growth and physiology-chemistry of maize[J]. *J Huazhong Agric Univ*, 1999, **18** (2): 111 - 113.
- [9] 张玲, 李俊梅, 王焕校. 镉胁迫下小麦根系的生理生态变化[J]. 土壤通报, 2002, **33** (1): 62 - 65.
ZHANG Ling, LI Junmei, WANG Huanxiao. Physiological and ecological responses of wheat (*Triticum aestivum* L.) root to cadmium stress [J]. *Chin J Soil Sci*, 2002, **33** (1): 62 - 65.

- [10] 王林, 史衍玺. 镉铅及其复合污染对辣椒生理生化的影响[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2005, **36** (1): 107 – 112.
- WANG Lin, SI Yanxi. Effects of cadmium, lead and their combined pollution on the physiological and biochemical characteristics of *Capsicum annuum* [J]. *J Shandong Agric Univ Nat Sci Ed*, 2005, **36** (1): 107 – 112.
- [11] 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.
- ZHU Yulin. *Studies on The Physiological Response and Resistant Mechanisms of Ginkgo under Cd and Pb Single and Combined Pollution* [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2006.
- [12] ALAVALA M R, SURABHI G K, GOTTIMUKKALA J, *et al.* Lead induces changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. *Chemosphere*, 2005, **60** (9): 97 – 101.
- [13] KAVITA S, RIYSMBHARA G K, SHALINI V, *et al.* Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings [J]. *Plant Sci*, 2001, **161** (6): 1135 – 1144.
- [14] 王云, 陈尧, 钱亚茹, 等. 镉胁迫对不同品种小麦幼苗生长和生理特征的影响[J]. 生态学杂志, 2008, **27** (5): 767 – 770.
- WANG Yun, CHEN Yao, QIAN Yaru, *et al.* Effects of cadmium stress on the seedlings growth and physiological characteristics of different wheat cultivars [J]. *Chin J Ecol*, 2008, **27** (5): 767 – 770.
- [15] 李亚藏, 王庆成. 镉污染胁迫对 4 种北方阔叶树苗木膜质过氧化和保护酶活性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2007, **35** (5): 24 – 26.
- LI Yazang, WANG Qingcheng. Effects of cadmium stress in soil on activity of membrane lipid peroxidation and protective enzymes in seedlings of four northern broadleaves tree species [J]. *J Northeast For Univ*, 2007, **35** (5): 24 – 26.
- [16] 章秀福, 王丹英, 储开富, 等. 镉胁迫下水稻 SOD 活性和 MDA 含量的变化及其基因型差异 [J]. 中国水稻科学, 2006, **20** (2): 194 – 198.
- ZHANG Xiufu, WANG Danying, CHU Kaifu, *et al.* Changes of SOD activity and MDA content in rice exposed to Cd stress as affected by genotype [J]. *Chin J Rice Sci*, 2006, **20** (2): 194 – 198.

中外专家共探森林生态安全智能空间

2009 年 6 月 13 日, 由香港科技大学、浙江林学院、西安交通大学、美国伊利诺伊理工大学和杭州电子科技大学等高校共同建设的森林生态安全智能空间联合实验室第 1 次工作会议在浙江林学院召开。

会上, 实验室首席科学家香港科技大学刘云浩教授作了“greenorbs”基本情况报告, 他从无线传感器网络应用于森林生态监测的角度, 就实验室的组成、研究意义、发展方向、存在的挑战以及应对的策略等 5 个方面作了介绍, 并提出了“用 1 000 个监测结点, 部署 1 年时间, 建立 1 个新的观念”的近期目标。

莫路锋