

2种化感成分对木麻黄幼苗小枝活性氧含量和保护酶活性的影响

李 键¹, 刘 奕¹, 洪 滔¹, 林勇明¹, 吴承祯^{1,2}, 洪 伟^{1,①}

(1. 福建农林大学林学院, 福建 福州 350002; 2. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘要: 采用水培法,对 0(对照)、12.5、25、50、100、200 和 400 mg · L⁻¹ 槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A)和槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B)处理 0~72 h 木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Forst.)幼苗小枝活性氧代谢及保护酶活性的动态变化进行了研究。结果表明:随 Q3A 和 Q3B 质量浓度的提高和处理时间的延长,小枝的 O₂⁻产生速率、H₂O₂ 和 MDA 含量均显著增加且总体上显著高于对照,仅各指标峰值出现的时间有差异,且用 400 mg · L⁻¹ Q3A 和 Q3B 处理后 O₂⁻产生速率、H₂O₂ 和 MDA 含量均最高。随处理时间延长,各处理组 SOD、CAT 和 POD 活性均呈先增后降的变化趋势,仅峰值出现的时间有差异;各处理组处理 12~60 h 时 SOD 和 CAT 活性和处理 12~48 h 时 POD 活性均显著高于对照;用 400 mg · L⁻¹ Q3A 或 Q3B 处理 12 h 或 24 h 时 SOD、CAT 和 POD 活性均最高;总体上看,随 Q3A 和 Q3B 质量浓度提高,SOD、CAT 和 POD 活性在处理的前、中期逐渐增加,在处理的中、后期均呈先增后降的变化趋势。不同浓度 Q3B 处理后木麻黄活性氧代谢水平及 SOD 和 CAT 活性高于相应浓度 Q3A 处理,POD 活性则低于相应浓度 Q3A 处理,表明 Q3A 和 Q3B 对木麻黄的化感机制存在差异。

关键词: 木麻黄; 槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A); 槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B); 化感作用; 活性氧含量; 保护酶活性

中图分类号: Q945.78; S718.43 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2013)02-0030-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2013.02.04

Effect of two allelochemicals on reactive oxygen content and protective enzyme activity in branchlet of *Casuarina equisetifolia* seedling LI Jian¹, LIU Yi¹, HONG Tao¹, LIN Yongming¹, WU Chengzhen^{1,2}, HONG Wei^{1,①} (1. College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. College of Ecology and Resource Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.* 2013, 22(2): 30-38

Abstract: The dynamic change of reactive oxygen metabolism and protective enzyme activity in branchlet of *Casuarina equisetifolia* Forst. seedling treated by 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 mg · L⁻¹ quercetin-3- α -araboside (Q3A) and quercetin-3- β -glucoside (Q3B) for 0-72 h was studied by hydroponics. The results show that with rising of mass concentrations of Q3A and Q3B and prolonging of treatment time, O₂⁻ production rate and contents of H₂O₂ and MDA in branchlet all significantly increase and generally are significantly higher than those of the control, only appearance time of peak value of every index is various. And O₂⁻ production rate and contents of H₂O₂ and MDA treated by 400 mg · L⁻¹ Q3A and Q3B are the highest. With prolonging of treatment time, activities of SOD, CAT and POD in all treatment groups appear the trend of increasing firstly and then decreasing, only appearance time of peak value of every index is various. Activities of SOD and CAT treated for 12-60 h and POD activity treated for 12-48 h in all treatment groups are higher than those of the control. Activities of SOD, CAT and POD treated by 400 mg · L⁻¹ Q3A or Q3B for 12 h or 24 h all are the highest. Generally, with rising of mass

收稿日期: 2012-09-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30671664); 国家教育部博士学科点专项基金资助项目(20093515120008); 福建省科技重大专项资助项目(2006NZ0001A)

作者简介: 李 键(1982—),男,福建泰宁人,博士研究生,讲师,主要从事植物生理生态和海岸带森林与环境方面的研究。

①通信作者 E-mail: fjhongwei@126.com

concentrations of Q3A and Q3B, activities of SOD, CAT and POD gradually increase at the early and middle stages, while appear the trend of increasing firstly and then decreasing at the middle and late stages. After treated by Q3B with different concentrations, reactive oxygen metabolism level and activities of SOD and CAT all are higher and POD activity is lower than those of treatment groups treated by Q3A with same concentrations, meaning that allelopathy mechanism of Q3A and Q3B to *C. equisetifolia* is different.

Key words: *Casuarina equisetifolia* Forst.; quercetin-3- α -araboside (Q3A); quercetin-3- β -glucoside (Q3B); allelopathy; reactive oxygen content; protective enzyme activity

大量研究证实:逆境胁迫会导致植物细胞内活性氧(reactive oxygen species, ROS)生成和清除的动态平衡破坏而出现 ROS 的积累^[1-3],同时也会导致植物体内的保护酶系统,如过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)及超氧化物歧化酶(SOD)等保护酶活性提高^[4-5],从而清除植物细胞内过多的 ROS,减缓逆境胁迫对植物细胞膜系统^[6]、色素^[7]、蛋白质^[8]及核酸^[9]的损伤。因此研究植物活性氧代谢及其清除系统对于揭示植物的逆境适应机制有重要意义。

木麻黄(*Casuarina equisetifolia* Forst.),又名短枝木麻黄,广泛分布于热带和亚热带地区^[10]。因其具有坚固厚重的材性和良好的抗风、速生、耐盐碱、耐贫瘠、耐涝等特点^[11],引种至中国后在东南沿海生态防护林、纸浆用材林及薪碳林的营建中扮演着重要角色,在维持海岸带生态系统稳定、保护沿海农业生产、改良受盐碱危害的沿海沙地和防潮汐侵蚀固沙等方面都起到其他树种无法替代的作用^[12]。但木麻黄防护林可持续经营面临着生长年限短、林分二次更新困难、连栽导致生产力下降和防护功能衰退等问题^[13-14],许多学者试图从植物化感作用的角度解释其衰退原因。Suresh 等^[15]发现木麻黄小枝水浸提物能够抑制向日葵(*Helianthus annuus* Linn.)、豇豆[*Vigna unguiculata* (Linn.) Walp.]和高粱[*Sorghum bicolor* (Linn.) Moench]的发芽和生长;而邓桂兰等^[16]从木麻黄中分离鉴定出化感物质,并用生物检测方法证实这些化感物质对其幼苗的生长有显著的抑制作用;林武星等^[17-21]用木麻黄根系水浸提液处理水培木麻黄幼苗,研究了木麻黄幼苗的生长、营养吸收、内源激素、叶绿素及糖类、活性氧代谢的变化,证实了木麻黄的化感作用,并对其自身的生长与更新有显著影响;黄舒静等^[22]发现来源于短枝木麻黄小枝的单宁对其幼苗的生长和发育有影响;王春晴等^[23]的研究结果表明:木麻黄根系、凋落物及根际土壤水浸提液均对青皮(*Vatica mangachapoi* Blanco)种子的萌发有抑制

作用。但迄今为止尚未见有关木麻黄化感物质对其幼苗生理代谢影响的研究报道。

作者以木麻黄品种‘惠安1号’(‘Hui’an No. 1’)水培苗为实验材料,研究槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A)和槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B)2种存在于木麻黄中的化感成分^[21]对其水培幼苗小枝活性氧代谢、膜质过氧化作用及保护酶活性的影响,探寻自毒胁迫下木麻黄生理代谢的响应机制,为抗自毒木麻黄无性系的筛选以及木麻黄连栽困难问题的解决提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 材料

水培木麻黄枝条由福建省泉州市惠安县赤湖国有防护林场提供,为保证材料的基因型一致,枝条均采集自‘惠安1号’木麻黄采穗圃同一株截于母树当年萌出的小枝。

供试用槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A)和槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B)购自美国 Sigma 公司,经 HPLC 检测纯度分别大于 95% 和 90%。

1.2 方法

1.2.1 水培苗培养方法 实验于 2012 年 5 月至 9 月在福建农林大学森林生态研究所进行。在 5 月下旬培育水培苗,采集长度约 9~10 cm 小枝,用质量浓度 60 mg·L⁻¹ 茶乙酸浸泡(液面在小枝基部 2 cm 处) 24 h 后用去离子水冲洗干净,放入灭菌的小玻璃瓶中,每瓶 20 根,用去离子水培养(液面在小枝基部 3 cm 处)。白天置于阳光直射处,夜间移入室内保温,每日更换去离子水 1 次。水培 30 d 后选取株高 15~16 cm、具 5~6 个分枝、根系长势较一致的植株,移至 MGC-800B 型人工气候箱(上海一恒科学仪器有限公司)中,于白天(6:00 至 18:00) 28℃~30℃、夜间(18:00 至次日 6:00) 24℃~26℃、白天光照强

度 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 、昼夜空气相对湿度 60% ~ 70% 的条件下恢复培养;并使用增氧泵为根系供氧。2 周后用于化感处理。

1.2.2 化感处理方法 准确称取 Q3A 和 Q3B 各 400 mg, 分别用 2 mL 甲醇溶解再用去离子水稀释至 500 mL, 用 RE-2000A 型旋转蒸发器(上海亚荣生化仪器厂)于 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 旋转蒸发, 待溶液体积减少约 20% 后加 100 mL 去离子水, 重复操作 4 次, 以去除溶液中的甲醇, 然后用去离子水定容至 1 L, 并用去离子水稀释至质量浓度 12.5、25、50、100、200 和 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即可用于化感处理, 对照为去离子水。采用水培法进行化感处理, 水培期间气候箱参数设置与上述一致, 每日更换 1 次处理液, 每次 100 mL。实验共 14 个处理, 每处理 3 次重复, 每一重复 20 株, 分别于处理的 0、12、24、36、48、60 和 72 h 各选取 1 株, 剪取每株的第 1 分梢, 去除枝条顶端后混合, 用于生理指标测定, 若第 1 分梢质量不足, 则再剪取第 2 分梢。

1.2.3 指标测定方法 取 0.2 g 叶片, 加入 5 mL 预冷的 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液(pH 7.8), 于冰浴条件

下研磨, 然后于 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $10\,000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min, 上清液即可用于丙二醛(MDA)含量及 CAT、POD 和 SOD 活性的测定。参照文献[24]的方法测定 H_2O_2 含量; 参照文献[25]的方法测定 O_2^- 产生速率; 按赵世杰等[26]的方法测定 MDA 含量; 采用紫外吸收法[27]¹⁶⁵ 测定 CAT 活性; 采用愈创木酚法[27]¹⁶⁴ 测定 POD 活性; 采用氮蓝四唑法[27]¹⁶⁷⁻¹⁶⁹ 测定 SOD 活性。

1.3 数据处理

采用 SPSS 18.0 软件进行差异显著性检验(LSD, $P < 0.05$) 及方差分析。

2 结果和分析

2.1 对 O_2^- 产生速率以及 H_2O_2 和 MDA 含量的影响

2.1.1 对 O_2^- 产生速率的影响 经不同质量浓度 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 O_2^- 产生速率的动态变化见表 1。由表 1 可以看出: 在对照条件下木麻黄幼苗小枝的 O_2^- 产生速率在实验期内(0 ~ 72 h) 均在 $0.4 \text{ nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ 左右, 变化幅度很小;

表 1 用 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 O_2^- 产生速率的动态变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Dynamic change of O_2^- production rate in branchlet of *Casuarina equisetifolia* Forst. seedling after hydroponics with Q3A and Q3B ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	不同处理时间 O_2^- 产生速率/ $\text{nmol} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{g}^{-1}$ O_2^- production rate at different treatment times						
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
A1	0.43±0.03Aa	0.42±0.02Aa	0.44±0.02Aa	0.43±0.02Aa	0.42±0.02Aa	0.41±0.02Aa	0.42±0.01Aa
A2	0.40±0.04Aa	0.45±0.05Aab	0.58±0.04Aab	1.61±0.18Bb	2.21±0.22Cb	2.81±0.21Db	3.50±0.26Eb
A3	0.40±0.04Aa	0.49±0.02Aab	0.64±0.04Aab	1.77±0.06Bb	2.61±0.26Cc	3.52±0.32Dc	4.01±0.08Ec
A4	0.42±0.02Aa	0.55±0.03ABb	0.85±0.03Bb	2.34±0.25Cc	3.43±0.33Cd	4.08±0.26Dd	4.22±0.13Dcd
A5	0.41±0.02Aa	0.84±0.04Bc	1.62±0.31Cc	2.70±0.20Dc	3.84±0.18Ee	4.33±0.06dFe	4.43±0.08Fde
A6	0.40±0.04Aa	1.26±0.10Bd	2.55±0.04Cd	3.88±0.47Dd	4.29±0.09Ef	4.63±0.20Ee	4.65±0.16Ee
A7	0.42±0.01Aa	1.71±0.12Be	3.38±0.36Ce	4.51±0.27De	4.75±0.14Dg	4.71±0.25De	4.63±0.13De
B1	0.41±0.03Aa	0.40±0.01Aa	0.40±0.02Aa	0.41±0.02Aa	0.41±0.02Aa	0.42±0.01Aa	0.40±0.03Aa
B2	0.39±0.04Aa	0.52±0.03Ab	0.75±0.09Aab	1.54±0.28Bb	2.61±0.36Cb	3.25±0.27Db	3.67±0.39Db
B3	0.40±0.03Aa	0.59±0.03ABbc	0.87±0.04Bb	2.13±0.06Cbc	3.33±0.51Dc	3.78±0.05Ec	4.20±0.11Fc
B4	0.42±0.01Aa	0.65±0.03Ac	1.43±0.29Bc	2.56±0.19Cc	3.89±0.09Dd	4.27±0.10Ed	4.37±0.08Ecd
B5	0.40±0.03Aa	0.95±0.04Bd	2.07±0.43Cd	3.47±0.59Dd	4.23±0.20Ede	4.53±0.11Ee	4.61±0.08Ede
B6	0.41±0.03Aa	1.37±0.09Be	2.77±0.07Ce	4.83±0.39De	4.73±0.11Def	4.73±0.08Dd	4.85±0.15De
B7	0.41±0.02Aa	1.83±0.12Bf	3.29±0.26Cf	5.36±0.49De	5.21±0.45Df	5.07±0.08Df	4.94±0.20De

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一化合物不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different concentration treatments of the same compound ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示同一浓度处理在不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different times in the same concentration treatment ($P < 0.05$).

²⁾ A1-A7: 分别为 0(对照)、12.5、25、50、100、200 和 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ quercetin-3- α -araboside (Q3A) treatments, respectively; B1-B7: 分别为 0(对照)、12.5、25、50、100、200 和 $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ quercetin-3- β -glucoside (Q3B) treatments, respectively.

而 Q3A 和 Q3B 各处理组的 O_2^- 产生速率均高于对照, 且总体上差异达显著水平。

用 Q3A 进行化感处理, 随 Q3A 浓度的提高和处理时间的延长, O_2^- 产生速率总体上呈逐渐升高的趋势, 且在处理的 0~48 h 增速较快; 其中, 400 mg · L⁻¹ Q3A 处理组的 O_2^- 产生速率总体上均最高且增速最快, 在 48 h 达到最高值 (4.75 nmol · min⁻¹ · g⁻¹), 其后 O_2^- 产生速率略有下降, 但差异不显著; 100 和 200 mg · L⁻¹ Q3A 处理组 O_2^- 产生速率均在 72 h 达到峰值, 分别为 4.43 和 4.65 nmol · min⁻¹ · g⁻¹; 50、25 和 12.5 mg · L⁻¹ Q3A 处理组 O_2^- 产生速率在 0~24 h 增速较慢, 在 24 h 后 O_2^- 产生速率明显增加, 且均在 72 h 达到峰值, 分别为 4.22、4.01 和 3.50 nmol · min⁻¹ · g⁻¹。

用 Q3B 进行化感处理, 小枝中 O_2^- 产生速率变化趋势与 Q3A 处理类似 (表 1), 不同的是 O_2^- 产生速率在 0~36 h 的增速大于 Q3A 处理; 其中, 400 mg · L⁻¹ Q3B 处理组 O_2^- 产生速率在 36 h 达到最高值 (5.36 nmol · min⁻¹ · g⁻¹); 且总体上看, 在不同时期不同浓度 Q3B 处理组的 O_2^- 产生速率均高于相应浓度 Q3A 处理组。

2.1.2 对 H₂O₂ 含量的影响 经不同质量浓度 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 H₂O₂ 含量的动态变化见表 2。由表 2 可见: 在对照条件下木麻黄幼苗小枝中 H₂O₂ 含量为 0.71~0.79 μmol · g⁻¹, 变幅不大; 而 Q3A 和 Q3B 各处理组的 H₂O₂ 含量均高于对照, 总体上差异达显著水平。

随着处理浓度的提高和处理时间的延长, 各 Q3A 处理组的 H₂O₂ 含量总体上呈逐渐增加的趋势, 总体上在处理的 0~48 h 增速较快。其中, 用 400 mg · L⁻¹ Q3A 处理, H₂O₂ 含量增速最快且均最高, 在 48 h 达到最高值 (6.74 μmol · g⁻¹); 用 100 和 200 mg · L⁻¹ Q3A 处理, H₂O₂ 含量均在 72 h 达到最高值, 分别为 6.21 和 6.41 μmol · g⁻¹; 用 50、25 和 12.5 mg · L⁻¹ Q3A 处理, 0~24 h H₂O₂ 含量增幅较为缓慢, 至 72 h 达到峰值, 分别为 5.64、5.12 和 4.44 μmol · g⁻¹。

用不同浓度 Q3B 处理, 小枝中 H₂O₂ 含量的变化趋势与 Q3A 处理类似, 区别在于 0~36 h H₂O₂ 含量增速较快。用 400 mg · L⁻¹ Q3B 处理, H₂O₂ 含量在 36 h 达到最高值, 为 7.28 μmol · g⁻¹; 用 200 mg · L⁻¹ Q3B 处理, H₂O₂ 含量在 60 h 达到峰值 (6.54 μmol · g⁻¹)。

表 2 用 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 H₂O₂ 含量的动态变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 2 Dynamic change of H₂O₂ content in branchlet of *Casuarina equisetifolia* Forst. seedling after hydroponics with Q3A and Q3B ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	不同处理时间 H ₂ O ₂ 含量/μmol · g ⁻¹ H ₂ O ₂ content at different treatment times						
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
A1	0.71±0.04Aa	0.71±0.10Aa	0.79±0.08Aa	0.76±0.07Aa	0.72±0.04Aa	0.71±0.12Aa	0.75±0.03Aa
A2	0.76±0.10Aa	0.79±0.04Aa	1.02±0.16Aa	1.82±0.29Bb	3.29±0.36Cb	3.79±0.46Cb	4.44±0.39Db
A3	0.71±0.10Aa	0.84±0.09ABa	1.08±0.13Ba	2.29±0.14Cc	3.84±0.23Dc	4.36±0.13Ec	5.12±0.23Fc
A4	0.71±0.04Aa	1.18±0.15Bb	1.51±0.14Cb	2.89±0.04Dd	4.68±0.17Ed	5.38±0.16Fd	5.64±0.16Gd
A5	0.70±0.04Aa	1.60±0.06Bc	2.17±0.16Cc	4.02±0.17De	5.78±0.22Ee	5.98±0.25FEe	6.21±0.09Fe
A6	0.82±0.08Aa	2.14±0.13Bd	3.66±0.27Cd	5.73±0.15Df	6.14±0.25Ee	6.32±0.08Ee	6.41±0.09Ee
A7	0.76±0.12Aa	2.59±0.18Be	4.39±0.22Ce	6.33±0.31Dg	6.74±0.23Df	6.35±0.11De	6.29±0.12Ee
B1	0.74±0.04Aa	0.75±0.05Aa	0.76±0.03Aa	0.76±0.03Aa	0.78±0.05Aa	0.78±0.04Aa	0.76±0.04Aa
B2	0.73±0.08Aa	0.88±0.09Aab	1.04±0.09Aab	2.08±0.21Bb	3.37±0.33Cb	4.13±0.31Db	4.89±0.19Eb
B3	0.71±0.05Aa	1.14±0.08Bb	1.36±0.12Bb	2.72±0.13Cb	4.18±0.19Dc	4.89±0.13Ec	5.63±0.22Fc
B4	0.76±0.05Aa	1.58±0.17Bc	1.99±0.31Cc	3.52±0.33Dc	5.27±0.22Ed	5.75±0.12Fd	6.06±0.29Fd
B5	0.75±0.06Aa	1.97±0.21Bd	2.74±0.15Cd	4.34±0.20Dd	5.98±0.31Ee	6.14±0.07Ee	6.30±0.19Ede
B6	0.76±0.03Aa	2.54±0.23Be	3.79±0.47Ce	5.12±0.25De	6.39±0.29Ee	6.54±0.12Ef	6.43±0.20Ede
B7	0.74±0.03Aa	2.96±0.25Bf	5.34±0.51Cf	7.28±0.93Ef	7.14±0.38Ef	6.75±0.24Ef	6.58±0.20Ee

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一化合物不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different concentration treatments of the same compound ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示同一浓度处理在不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different times in the same concentration treatment ($P < 0.05$).

²⁾ A1–A7: 分别为 0 (对照)、12.5、25、50、100、200 和 400 mg · L⁻¹ 槲皮黄素-3-α-阿拉伯糖苷 (Q3A) 处理 Representing 0 (CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 mg · L⁻¹ quercetin-3-α-araboside (Q3A) treatments, respectively; B1–B7: 分别为 0 (对照)、12.5、25、50、100、200 和 400 mg · L⁻¹ 槲皮黄素-3-β-葡萄糖苷 (Q3B) 处理 Representing 0 (CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 mg · L⁻¹ quercetin-3-β-glucoside (Q3B) treatments, respectively.

总体上看,用不同浓度 Q3B 处理不同时期, H_2O_2 含量均高于相应浓度的 Q3A 处理组。

综合分析结果显示:木麻黄幼苗小枝 H_2O_2 含量对 Q3A 和 Q3B 处理的响应规律与 O_2^- 产生速率类似,不同浓度 Q3B 处理组 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量的增幅均高于相应浓度的 Q3A 处理组,且用 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3B 处理后 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量峰值出现的时间均由 48 h 提前至 36 h。

2.1.3 对 MDA 含量的影响 经不同质量浓度 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 MDA 含量的动态变化见表 3。由表 3 可见:在对照条件下木麻黄幼苗小枝中 MDA 含量均低于 $1.97\ \mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$,且变幅不大;而 Q3A 和 Q3B 各处理组的 MDA 含量均高于对照,且总体上差异达显著水平。

表3 用 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 MDA 含量的动态变化 ($\bar{x}\pm SD$)¹⁾
Table 3 Dynamic change of MDA content in branchlet of *Casuarina equisetifolia* Forst. seedling after hydroponics with Q3A and Q3B ($\bar{x}\pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	不同处理时间 MDA 含量/ $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$ MDA content at different treatment times						
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
A1	1.87±0.12Aa	1.88±0.16Aa	1.85±0.10Aa	1.92±0.17Aa	1.88±0.09Aa	1.89±0.14Aa	1.90±0.16Aa
A2	1.83±0.26Aa	2.23±0.20Aab	3.33±0.21Bb	4.37±0.44Bb	5.28±0.17Bb	6.03±0.70Cb	6.67±0.48Cb
A3	1.87±0.27Aa	2.60±0.17Bb	4.00±0.20Bc	4.88±0.23Bb	6.15±0.64Bb	7.33±0.56Cc	8.15±0.79Cc
A4	1.89±0.13Aa	3.23±0.27Bc	4.54±0.20Cd	5.60±0.16Dc	7.47±0.37Ec	8.90±0.40Fd	10.41±0.42Gd
A5	1.89±0.10Aa	4.19±0.15Bd	6.45±0.38Ce	8.69±0.31Dd	11.00±0.26Ed	11.45±0.60Ee	11.72±0.67Ee
A6	1.89±0.16Aa	5.55±0.39Be	9.38±0.33Cf	11.26±0.57De	14.03±0.68Ee	14.65±0.60Eef	14.99±0.37Ff
A7	1.92±0.11Aa	7.88±0.24Bf	12.22±0.40Cg	15.70±0.61Df	17.34±0.82Ef	17.75±0.38Eg	17.98±0.67Eg
B1	1.97±0.20Aa	1.92±0.08Aa	1.94±0.14Aa	1.92±0.18Aa	1.88±0.15Aa	1.90±0.13Aa	1.96±0.14Aa
B2	1.93±0.19Aa	2.60±0.39Aa	2.69±0.29Aa	4.31±0.83Bb	6.73±0.76Cb	7.23±0.74Cb	9.64±1.21Db
B3	1.92±0.13Aa	3.11±0.25ABab	4.30±0.71BCb	5.43±0.96Cb	7.24±0.80Db	8.69±1.18Eb	11.01±0.91Fb
B4	1.88±0.11Aa	4.45±0.29Bbc	6.42±0.33Cc	8.04±0.80Dc	9.35±0.34Ec	11.41±0.94Fc	12.77±0.79Gc
B5	1.90±0.10Aa	5.56±0.29Bc	8.72±0.57Cd	11.50±1.08Dd	13.88±0.71Ed	14.02±0.88Ed	14.41±0.71Ed
B6	1.94±0.15Aa	7.15±0.76Bd	11.48±0.68Ce	14.99±1.15De	17.20±1.25Ee	17.31±0.93Ee	17.53±0.87Ee
B7	1.88±0.10Aa	10.67±1.83Be	16.15±1.12Cf	18.91±1.19Cdf	19.79±2.10Df	19.89±2.61Df	19.92±1.29Df

1) 同列中不同的小写字母表示同一化合物不同浓度处理间差异显著 ($P<0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different concentration treatments of the same compound ($P<0.05$); 同行中不同的大写字母表示同一浓度处理在不同时间间差异显著 ($P<0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different times in the same concentration treatment ($P<0.05$).

2) A1-A7: 分别为 0(对照)、12.5、25、50、100、200 和 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ quercetin-3- α -araboside (Q3A) treatments, respectively; B1-B7: 分别为 0(对照)、12.5、25、50、100、200 和 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ quercetin-3- β -glucoside (Q3B) treatments, respectively.

2.2 对 SOD、CAT 和 POD 活性的影响

2.2.1 对 SOD 活性的影响 经不同质量浓度 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 SOD 活性的动态变化见表 4。由表 4 可见:随处理时间延长,不同浓度 Q3A 和 Q3B 处理组 SOD 活性均呈现先增后降的变化

随着处理浓度的提高和处理时间的延长,不同质量浓度 Q3A 处理组的 MDA 含量均呈逐渐增加的趋势,且均在 72 h 达到最高;其中, $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3A 处理组 MDA 含量在不同时期均最高;100、200 和 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3A 处理组 MDA 含量在 0~48 h 增速较快、在 48~72 h 增速减缓;而 50、25 和 $12.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3A 处理组 MDA 含量的增速相对缓慢。

用不同浓度 Q3B 处理,小枝中 MDA 含量变化趋势与 Q3A 处理类似,不同的是 $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3B 处理组的 MDA 含量在 0~36 h 增速较快、在 36~72 h 增速减缓。总体上看,用不同浓度 Q3B 处理不同时间,MDA 含量均高于相应浓度的 Q3A 处理组,且木麻黄小枝 MDA 含量对不同浓度 Q3A 和 Q3B 化感处理的响应规律与 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量相似。

趋势,仅到达峰值的时间有所不同;其中, $400\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3A 处理组 SOD 活性在 12 h 达到峰值,200、100、50、25 和 $12.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3A 处理组 SOD 活性分别在 24、36、48、60 和 60 h 达到峰值;400、200、100、50、25 和 $12.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Q3B 处理组的 SOD 活性分别在 12、24、

24、36、48 和 48 h 达到峰值。与相应浓度 Q3A 处理组相比, 100、50、25 和 12.5 mg · L⁻¹ Q3B 处理组 SOD 活性均提前 12 h 达到峰值。各处理组 SOD 活性在处理的 12 ~ 60 h 均高于对照, 总体上差异达显著水平; 而在处理的 72 h 各处理组 SOD 活性与对照差异不显

著。在处理的 12 ~ 24 h, 随 Q3A 和 Q3B 浓度的提高 SOD 活性逐渐增加; 而在处理的 36 ~ 60 h, 随 Q3A 和 Q3B 浓度的提高 SOD 活性呈现先增后降的变化趋势, 其中, 用 400 mg · L⁻¹ Q3A 或 400 mg · L⁻¹ Q3B 处理 12 h, SOD 活性均最高。

表 4 用 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 SOD 活性动态的变化 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Dynamic change of SOD activity in branchlet of *Casuarina equisetifolia* Forst. seedling after hydroponics with Q3A and Q3B ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	不同处理时间 SOD 活性/U · g ⁻¹ SOD activity at different treatment times						
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
A1	38.80±2.33Aa	38.39±3.22Aa	40.24±1.29Aa	40.50±1.72Aa	37.95±2.75Aa	39.93±1.00Aa	40.63±1.34Aa
A2	40.59±3.46Aa	43.13±2.68Aab	44.55±5.50Aab	46.71±4.91Ab	46.81±3.16Abc	47.51±2.84Ab	40.52±2.88Aab
A3	39.68±4.13Aa	43.62±1.44ABab	46.50±1.25BCab	49.55±1.26Cdb	51.26±3.62CDcd	53.95±5.45Dc	40.02±1.38Aab
A4	38.84±3.48Aa	45.70±1.61BCb	50.57±3.23CEfbc	51.70±3.57EFbd	54.24±3.17Fd	47.41±4.33CEb	41.19±0.95ABab
A5	40.09±2.63Aa	47.72±0.48Bbc	52.13±3.35Cbc	55.79±2.93Cd	47.71±1.57Bbc	45.77±1.79Bb	38.30±1.16Aab
A6	39.41±1.62Aa	52.05±3.60Bc	57.26±5.24Cc	51.52±2.30Bbd	48.52±0.96Bdc	46.37±1.67Db	40.59±1.68Aab
A7	39.38±1.02Aa	62.25±6.62Bd	57.25±5.59Bc	47.97±4.60Cb	43.14±2.28ACb	42.64±1.57ACab	41.66±1.40ACb
B1	39.99±1.05Aa	39.86±1.53Aa	42.08±3.74Aa	40.88±2.19Aa	38.68±3.56Aa	38.50±2.27Aa	40.69±2.88Aa
B2	40.45±2.87ABa	43.66±3.82ABCab	46.81±4.37BCab	48.34±3.40Cbc	50.00±6.00Cb	44.77±3.48ABCb	39.08±1.39Aa
B3	40.13±1.42Aa	46.34±2.16BCb	49.83±2.56CDbc	52.48±3.33DEcd	56.72±2.56Ec	52.53±5.30DEc	42.00±1.10ABa
B4	40.67±1.60Aa	48.45±1.53Bbc	56.22±4.12Ccd	57.48±3.22Cd	50.01±4.07Bb	44.89±2.26ABb	39.96±1.61Aa
B5	40.36±1.08Aa	52.04±3.24Bc	61.24±4.12Cde	49.05±3.58BDbc	46.68±1.87DEb	43.51±1.66AEab	40.92±2.08Aa
B6	39.39±1.86Aa	60.20±2.65Bd	63.61±6.41Bde	47.66±2.75Cbc	44.68±1.38ACab	42.97±3.07ACab	40.63±0.52Aa
B7	40.23±1.97Aa	70.53±4.86Be	65.95±2.06Be	45.46±2.79Aab	44.07±1.82Aab	41.33±2.22Aab	40.73±2.35Aa

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一化合物不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different concentration treatments of the same compound ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示同一浓度处理在不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different times in the same concentration treatment ($P < 0.05$).

²⁾ A1-A7: 分别为 0 (对照)、12.5、25、50、100、200 和 400 mg · L⁻¹ 槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷 (Q3A) 处理 Representing 0 (CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 mg · L⁻¹ quercetin-3- α -araboside (Q3A) treatments, respectively; B1-B7: 分别为 0 (对照)、12.5、25、50、100、200 和 400 mg · L⁻¹ 槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷 (Q3B) 处理 Representing 0 (CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 mg · L⁻¹ quercetin-3- β -glucoside (Q3B) treatments, respectively.

2.2.2 对 CAT 活性的影响 经不同质量浓度 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 CAT 活性的动态变化见表 5。由表 5 可见, 随处理时间延长, 不同浓度 Q3A 和 Q3B 处理组 CAT 活性均呈现先增后降的变化趋势, 仅到达峰值的时间有所不同; 其中, 400 和 200 mg · L⁻¹ Q3A 处理组 CAT 活性在 24 h 达到峰值, 100、50、25 和 12.5 mg · L⁻¹ Q3A 处理组 CAT 活性分别在 36、48、60 和 60 h 达到峰值; 400、200、100、50、25 和 12.5 mg · L⁻¹ Q3B 处理组 CAT 活性分别在 24、24、24、36、48 和 48 h 达到峰值, 与相应浓度 Q3A 处理组相比较, 100、50、25 和 12.5 mg · L⁻¹ Q3B 处理组 CAT 活性均提前 12 h 达到峰值。除 400 和 200 mg · L⁻¹ Q3B 处理组外, 各处理组 CAT 活性在处理的 12 ~ 60 h 均高于对照, 且总体上差异达显著水平; 而在处理的 72 h 各处理组 CAT 活性与对照差异不大。在处理的 12 ~

24 h, 随 Q3A 浓度提高 CAT 活性逐渐增加; 而在处理的 36 ~ 72 h, 随 Q3A 浓度提高 CAT 活性呈现先增后降的变化趋势。在处理的 12 ~ 36 h, 随 Q3B 浓度提高 CAT 活性逐渐增加; 而在处理的 48 ~ 72 h, 随 Q3B 浓度提高 CAT 活性呈现先增后降的变化趋势。总体上看, 用 400 mg · L⁻¹ Q3A 或 400 mg · L⁻¹ Q3B 处理 24 h, CAT 活性均最高。

2.2.3 对 POD 活性的影响 经不同质量浓度 Q3A 和 Q3B 水培处理后木麻黄幼苗小枝 POD 活性的动态变化见表 6。由表 6 可以看出, 随着处理时间的延长, 不同浓度 Q3A 和 Q3B 处理组 POD 活性均呈现先增后降的变化趋势, 仅到达峰值的时间有所不同; 其中, 400 和 200 mg · L⁻¹ Q3A 处理组 POD 活性在 12 h 达到峰值, 100、50、25 和 12.5 mg · L⁻¹ Q3A 处理组 POD 活性分别在 24、36、36 和 36 h 达到峰值; 400、

表5 用Q3A和Q3B水培处理后木麻黄幼苗小枝CAT活性的动态变化($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 5 Dynamic change of CAT activity in branchlet of *Casuarina equisetifolia* Forst. seedling after hydroponics with Q3A and Q3B ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	不同处理时间CAT活性/ $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ CAT activity at different treatment times						
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
A1	63.07±2.47Aa	60.84±4.49Aa	65.87±2.78Aa	62.30±7.32Aa	65.16±2.18Aa	59.94±1.34Aa	65.32±2.78Aa
A2	62.24±4.66Aa	66.66±4.01ABab	75.29±4.42BCa	79.76±5.83CDB	85.34±5.30DEbc	92.25±5.60Ebc	59.41±5.51Aab
A3	63.73±3.19Aa	74.99±2.46Bbc	86.86±4.17Cb	92.10±3.21CDBc	95.64±2.91CDed	100.26±12.56Db	62.71±1.69Aab
A4	64.31±2.52Aa	78.02±2.53Bc	91.96±5.69CDB	95.04±7.61Dc	99.42±7.86Dd	83.03±8.47BCed	65.07±1.37Aa
A5	64.48±1.50ADa	86.64±2.20Bd	95.81±4.94Bb	110.24±5.90Cd	87.71±7.53Bbc	72.10±6.81Dad	61.50±3.50Aab
A6	65.06±2.59ADa	88.91±7.55Bd	112.11±8.49Cc	92.39±6.40Bbc	82.96±6.94Bb	70.99±6.05Dad	57.48±5.67Ab
A7	64.46±3.13AEa	98.32±7.36Be	123.46±8.85Cd	104.80±11.73Bcd	81.56±5.18Db	69.01±3.20Ea	56.19±3.52Ab
B1	62.81±4.80Aa	62.80±4.32Aa	61.21±4.89Aa	58.73±6.03Aa	63.49±2.62Aa	64.52±2.47Aa	61.77±7.60Aab
B2	61.79±6.58Aa	71.40±4.55Ba	82.50±2.76Cb	94.20±4.01Db	98.43±4.43Db	72.81±8.75Bab	61.33±3.69Aab
B3	62.21±5.98Aa	81.17±5.81Bb	92.50±2.76Cb	102.53±4.97CDB	109.35±5.29Dc	78.11±11.99Bb	61.98±1.66Aab
B4	60.79±6.78Aa	88.93±1.56Bbc	108.55±7.29Cc	114.12±6.46Cc	98.05±7.22Bb	73.74±4.36Dab	64.80±2.54ADb
B5	63.45±6.36Aa	94.44±3.73Bcd	121.28±9.37Cd	115.58±6.47Cc	84.02±8.09Bd	72.08±4.31Aab	62.71±1.93Aab
B6	62.83±3.04Aa	102.75±8.72Bd	128.86±7.72Cde	116.56±8.74Dc	76.97±2.98Ed	63.22±7.00Aa	57.84±6.47Aab
B7	63.77±5.66Aa	113.41±7.06Be	135.43±6.84Ce	121.66±8.01Bc	75.01±4.23Dd	61.67±5.30Aa	55.23±2.65Aa

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一化合物不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different concentration treatments of the same compound ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示同一浓度处理在不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different times in the same concentration treatment ($P < 0.05$).

²⁾ A1-A7: 分别为0(对照)、12.5、25、50、100、200和400 $mg \cdot L^{-1}$ 槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 $mg \cdot L^{-1}$ quercetin-3- α -araboside (Q3A) treatments, respectively; B1-B7: 分别为0(对照)、12.5、25、50、100、200和400 $mg \cdot L^{-1}$ 槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 $mg \cdot L^{-1}$ quercetin-3- β -glucoside (Q3B) treatments, respectively.

表6 用Q3A和Q3B水培处理后木麻黄幼苗小枝POD活性的动态变化($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 6 Dynamic change of POD activity in branchlet of *Casuarina equisetifolia* Forst. seedling after hydroponics with Q3A and Q3B ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 ²⁾ Treatment ²⁾	不同处理时间POD活性/ $U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$ POD activity at different treatment times						
	0 h	12 h	24 h	36 h	48 h	60 h	72 h
A1	30.68±0.72Aa	29.81±2.74Aa	30.53±0.50Aa	31.31±2.89Aa	31.74±1.53Aa	31.14±3.86Aa	30.00±0.80Aa
A2	28.69±3.11Aa	33.76±1.34ABa	37.19±2.30Bab	46.33±6.52Cb	32.05±4.68ABa	32.96±2.23ABa	30.30±3.66ABa
A3	30.49±1.84Aa	35.79±2.44Aa	43.17±5.33Cbc	51.48±7.00Dbc	32.77±2.60Aa	33.85±4.07Aa	31.32±2.92Aa
A4	29.93±3.04Aa	41.21±2.06Bab	48.79±2.43Cc	56.01±6.08Dc	34.63±3.45ABa	34.46±5.57ABa	30.25±3.96Aa
A5	29.65±1.89Aa	49.23±8.96Bb	58.94±9.54Bd	34.15±3.59Aa	34.33±4.64Aa	34.31±4.25Aa	30.90±2.93Aa
A6	29.77±2.87Aa	63.67±9.35Bc	36.68±3.16Aab	37.37±2.91Aa	36.33±7.24Aa	34.17±4.29Aa	30.69±2.65Aa
A7	29.27±2.09Aa	73.28±11.35Bc	33.74±3.11Aa	35.65±2.99Aa	34.85±4.45Aa	30.83±3.50Aa	29.76±2.11Aa
B1	29.65±4.01Aa	31.35±2.58Aa	30.60±3.36Aa	29.57±3.85Aa	30.79±2.70Aa	30.81±2.65Aa	30.40±0.27Aa
B2	30.37±3.84Aa	33.76±3.37Aab	40.66±2.05Bb	43.74±1.84Bb	46.10±3.82Bb	29.49±2.82Aa	30.75±2.94Aa
B3	31.26±4.09Aa	37.42±2.85Bbc	45.30±3.10Cbc	48.82±2.17CDbd	52.74±2.74Dbc	31.37±3.68Aa	32.04±1.59Aa
B4	30.10±0.57Aa	40.30±2.03Bc	49.31±2.50Ccd	54.41±2.70CDed	58.77±7.75Dc	31.73±3.44Aa	31.04±2.87Aa
B5	30.09±2.62Aa	46.18±3.15Bd	53.85±1.94Cd	60.62±5.18Dc	32.00±2.17Aa	29.36±3.83Aa	31.97±2.36Aa
B6	31.27±2.09Aa	53.48±2.87Be	59.55±3.41Bd	53.18±3.06Bd	31.83±6.00Aa	30.95±3.87Aa	32.00±3.08Aa
B7	30.40±1.65Aa	59.76±2.99Bf	66.06±5.16Bf	36.08±6.31Aa	34.04±7.23Aa	30.94±3.88Aa	31.40±6.18Aa

¹⁾ 同列中不同的小写字母表示同一化合物不同浓度处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column indicate the significant difference among different concentration treatments of the same compound ($P < 0.05$); 同行中不同的大写字母表示同一浓度处理在不同时间间差异显著 ($P < 0.05$) Different capitals in the same row indicate the significant difference among different times in the same concentration treatment ($P < 0.05$).

²⁾ A1-A7: 分别为0(对照)、12.5、25、50、100、200和400 $mg \cdot L^{-1}$ 槲皮黄素-3- α -阿拉伯糖苷(Q3A)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 $mg \cdot L^{-1}$ quercetin-3- α -araboside (Q3A) treatments, respectively; B1-B7: 分别为0(对照)、12.5、25、50、100、200和400 $mg \cdot L^{-1}$ 槲皮黄素-3- β -葡萄糖苷(Q3B)处理 Representing 0(CK), 12.5, 25, 50, 100, 200 and 400 $mg \cdot L^{-1}$ quercetin-3- β -glucoside (Q3B) treatments, respectively.

200、100、50、25 和 12.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Q3B 处理组 POD 活性分别在 24、24、36、48、48 和 48 h 达到峰值, Q3B 各处理组 POD 活性峰值出现的时间均较相应浓度 Q3A 处理组延后 12 h。

各处理组 POD 活性在处理的 12~48 h 均高于对照, 总体上差异达显著水平; 而在处理的 60~72 h 各处理组 POD 活性均与对照差异不显著。在处理的 12 h, 随 Q3A 浓度提高 POD 活性逐渐增加; 而在处理的 24~72 h, 随 Q3A 浓度提高 POD 活性呈现先增后降的变化趋势。在处理的 12~24 h, 随 Q3B 浓度提高 POD 活性逐渐增加; 而在处理的 36~72 h, 随 Q3B 浓度提高 POD 活性呈现先增后降的变化趋势。总体上看, 用 400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Q3A 处理 12 h 或用 400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Q3B 处理 24 h, POD 活性均最高。

3 讨 论

诸多研究表明: 化感作用下植物细胞内活性氧自由基代谢失衡进而引起自由基积累和膜脂过氧化, 使膜系统结构和功能受到损伤, 是化感作用造成细胞伤害的重要原因之一^[5-9, 28]。本实验结果显示: 随着外源化感成分 Q3A 和 Q3B 质量浓度提高和处理时间延长, 木麻黄幼苗小枝中 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量呈逐渐增加的趋势, 且在高浓度 (400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Q3A 处理条件下 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量均在 48 h 达到峰值, 而 400 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Q3B 处理组的 O_2^- 产生速率和 H_2O_2 含量则提前 12 h 达到峰值。木麻黄幼苗小枝中 MDA 含量也随处理时间延长及 Q3A 和 Q3B 质量浓度提高呈增加趋势。说明在化感作用下, 活性氧代谢平衡被打破, 木麻黄幼苗小枝中 O_2^- 和 H_2O_2 快速积累, MDA 含量持续升高, 引起膜质过氧化作用加剧, 使质膜透性不断增大且质膜稳定性持续降低。Q3A 和 Q3B 对木麻黄幼苗小枝 ROS 代谢的影响机制类似但影响程度不同, Q3B 处理 0~36 h 木麻黄幼苗小枝 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 含量和 MDA 含量增速快于 Q3A, 且 Q3B 各处理组 O_2^- 产生速率、 H_2O_2 含量和 MDA 含量水平均高于相应浓度的 Q3A 处理组, 因此, 相对于 Q3A, Q3B 对木麻黄小枝细胞造成的伤害更严重。

在逆境条件下植物体内 ROS 的增加除对细胞造成严重伤害外, 还可以作为防御化学信号分子, 启动植物体内的抗氧化系统^[3, 29], 这是植物在长期进化过程中所形成的抗性机制, 其中 SOD、POD 和 CAT 等是

抗氧化系统中主要的活性氧清除酶。本实验结果显示: 在 Q3A 和 Q3B 化感作用下木麻黄幼苗小枝中 SOD、POD 和 CAT 活性呈先增后降的趋势; 在化感作用初期, 随 ROS 累积量增加, SOD、POD 和 CAT 活性也随之提高; 在高浓度 (400 和 200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 化感作用条件下, 活性氧积累急剧增加, SOD、POD 和 CAT 活性也显著提高; 其后随处理时间延长 3 个酶的活性降低, 且化感成分浓度越低各保护酶活性增加越缓慢。这种现象与胁迫后期 O_2^- 和 H_2O_2 积累过量, 导致保护酶合成下降或降解增强所致。但林武星^[21]的研究结果表明: 木麻黄小枝 POD、CAT 和 SOD 活性随木麻黄根系水浸提液浓度升高而下降, 而 MDA 和 H_2O_2 含量及 O_2^- 产生速率则逐渐增加, 这与本研究结果有一定的差异, 其原因与木麻黄不同器官化感成分存在差异有关, 也说明水溶性化感成分组成复杂, 要明晰其化感作用机制更为困难。在外源 Q3A 化感作用下木麻黄幼苗小枝保护酶活性的变化趋势与外源 Q3B 化感处理基本一致仅达到峰值的时间不同, 在中度 (100 和 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和轻度 (25 和 12.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Q3B 化感作用下 SOD 和 CAT 活性的峰值较相应浓度 Q3A 处理均提前 12 h, 且 Q3B 各处理组 SOD 和 CAT 活性的峰值高于 Q3A; 而其 POD 活性的峰值出现的时间较 Q3A 均延后 12 h, 且 Q3B 各处理组 POD 活性的峰值低于 Q3A。表明这 2 种外源化感成分对木麻黄幼苗小枝保护酶合成或降解的影响程度有差异。

综上所述, 木麻黄幼苗小枝中 SOD、CAT 和 POD 对 H_2O_2 和 O_2^- 等 ROS 的清除受 2 类外源化感成分浓度和处理时间的影响, 在中度 (100 和 50 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 和轻度 (25 和 12.5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Q3A 和 Q3B 短期 (0~48 h) 作用下, ROS 积累速率较慢, 保护酶的清除作用有效; 但当化感成分浓度提高及处理超过一定时间后, 植物体内产生过量 ROS, 引起保护酶活性下降, 对 ROS 的清除效率降低, 引起膜质过氧化, 对植物造成不可逆的伤害, 这可能是这 2 种外源化感成分对木麻黄的毒害机制之一。实验结果还表明: 浓度和时间的叠加效应会加重化感物质对木麻黄的伤害。自然界中化感物质的释放和积累是一个漫长的过程, 因此在木麻黄造林过程中, 头茬种植的木麻黄会释放化感物质并对二次种植的木麻黄幼苗的生长产生化感作用。供试 2 类外源化感成分对木麻黄幼苗的化感作用程度存在差异, 造成这种差异的原因还有待进一步深入研究。

- 参考文献:**
- [1] 李兆佳, 喻杰, 樊大勇, 等. 克隆整合提高淹水胁迫下狗牙根根部的活性氧清除能力[J]. 生态学报, 2011, 31(17): 4992-4999.
- [2] 王小平, 宋东杰, 周泉澄, 等. Cr^{3+} 胁迫对苦草叶片活性氧清除系统和叶细胞超微结构的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2008, 17(2): 56-60.
- [3] 袁琳, 克热木·伊力, 张利权. NaCl胁迫对阿月浑子实生苗活性氧代谢与细胞膜稳定性的影响[J]. 植物生态学报, 2005, 29(6): 985-991.
- [4] 王鑫, 郭平毅, 原向阳, 等. 2,4-D丁酯对罂粟(*Papaver somniferum* L.)保护酶活性及脂质过氧化作用的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1098-1103.
- [5] 曹光球, 杨梅, 林思祖, 等. 邻羟基苯甲酸对不同化感型杉木无性系抗氧化酶活性的化感效应[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(6): 1267-1271.
- [6] FOYER C H, NOCTOR G. Oxygen processing in photosynthesis: regulation and signaling[J]. New Phytologist, 2000, 146: 359-388.
- [7] SALIN M L. Toxic oxygen species and protective system of the chloroplast[J]. Physiologia Plantarum, 1987, 72: 681-689.
- [8] SHAH K, KUMAR R G, VERMA S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. Plant Science, 2001, 161: 1135-1144.
- [9] MITTLER R, VANDERAUWERA S, GOLLERY M, et al. Reactive oxygen gene network of plants[J]. Trends in Plant Science, 2004, 9: 490-498.
- [10] MAIR A, FARES A. Throughfall characteristics in three non-native Hawaiian forest stands[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, 150(11): 1453-1466.
- [11] SCHMID J L, ADDISON D S, DONNELLY M A, et al. The effect of Australian pine (*Casuarina equisetifolia*) removal on Loggerhead Sea Turtle (*Caretta caretta*) incubation temperatures on Keewaydin Island, Florida[J]. Journal of Coastal Research, 2008, 55: 214-220.
- [12] 林武星, 叶功富, 谭芳林, 等. 沙岸木麻黄防护林不同更新模式土壤结构分形特征及其效应[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(6): 1352-1357.
- [13] 张水松, 叶功富, 徐俊森, 等. 木麻黄基干林带类型划分和更新造林关键技术研究[J]. 林业科学, 2002, 38(2): 44-53.
- [14] MANTZ G, RONCO L, MONACO C. First record in Argentina of powdery mildew of *Casuarina cunninghamiana* caused by *Oidium* sp. [J]. Journal of Plant Pathology, 2008, 90(2): 397.
- [15] SURESH K K, VINAYA A S. Studies on the allelopathic effects of some agroforestry tree crops [J]. The International Tree Crops Journal, 1987, 4: 109-115.
- [16] 邓桂兰, 孔垂华, 骆世明. 木麻黄小枝提取物的分离鉴定及其对幼苗的化感作用[J]. 应用生态学报, 1996, 7(2): 145-149.
- [17] 林武星, 洪伟, 叶功富. 木麻黄根系浸提液对幼苗营养吸收和生长的影响[J]. 浙江林学院学报, 2005, 22(2): 170-175.
- [18] 林武星. 木麻黄自身他感作用影响因素及缓解[J]. 防护林科技, 2006(6): 1-5.
- [19] 林武星. 自身他感作用对木麻黄幼苗叶绿素及糖类的影响[J]. 浙江林学院学报, 2007, 24(1): 12-16.
- [20] 林武星. 木麻黄自毒作用物对其幼苗内源激素的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(19): 100-103.
- [21] 林武星. 自身他感作用对木麻黄苗木活性氧代谢影响[J]. 福建农业学报, 2010, 25(1): 108-113.
- [22] 黄舒静, 曾琦, 张立华, 等. 短枝木麻黄小枝单宁对其幼苗生长及单宁含量的效应[J]. 热带亚热带植物学报, 2009, 17(5): 471-476.
- [23] 王春晴, 刘强, 张渝杰, 等. 木麻黄水浸提液对青皮种子的化感效应[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(3): 80-86.
- [24] PROCHAZKOVA D, SAIRAM R K, SRIVASTAVA G C, et al. Oxidative stress and antioxidant activity as the basis of senescence in maize leaves[J]. Plant Science, 2001, 161: 765-771.
- [25] KE D S, WANG A G, SUN G C, et al. The effect of active oxygen on the activity of ACC synthase induced by exogenous IAA[J]. Acta Botany Sinica, 2002, 44(5): 551-556.
- [26] 赵世杰, 许长成, 邹琦, 等. 植物组织中丙二醛测定方法的改进[J]. 植物生理学通讯, 1994, 30(3): 207-210.
- [27] 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.
- [28] POLITYCKA B. Peroxidase activity and lipid peroxidation in root of cucumber seedlings influenced by derivatives of cinnamic and benzoic acids[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 1996, 18(4): 365-370.
- [29] BANERJEE B D, SETH V, BHATTARYA A. Biochemical effects of some pesticides on lipid peroxidation and free-radical scavengers [J]. Toxicol Letters, 1999, 107: 33-47.

(责任编辑: 张明霞)