

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

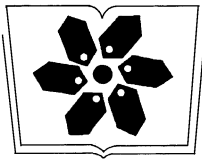
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第8期 Vol.32 No.8 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 8 期

2012 年 4 月 (半月刊)

目 次

东北地区 5 种阔叶树苗木对火烧的生理响应.....	王 荣, 胡海清 (2303)
梭梭木虱发生规律及其影响因子.....	李粉莲, 吴雪海, 王佩玲, 等 (2311)
基于遥感降尺度估算中国森林生物量的空间分布.....	刘双娜, 周 涛, 舒 阳, 等 (2320)
流域景观格局与河流水质的多变量相关分析.....	赵 鹏, 夏北成, 秦建桥, 等 (2331)
内蒙古达赉湖地区赤狐生境选择及生境景观特征分析.....	张洪海, 李成涛, 窦华山, 等 (2342)
雅鲁藏布江流域底栖动物多样性及生态评价.....	徐梦珍, 王兆印, 潘保柱, 等 (2351)
用组合模型综合比较的方法分析气候变化对朱鹮潜在生境的影响.....	翟天庆, 李欣海 (2361)
2010 年牧区 2 代草地螟成虫迁飞的虫源分析	张 丽, 张云慧, 曾 娟, 等 (2371)
基于细胞色素 b 基因的中国岩羊不同地理种群遗传差异分析.....	李楠楠, 刘振生, 王正寰, 等 (2381)
喀斯特峰丛洼地不同退耕还林还草模式的土壤微生物特性.....	鹿士杨, 彭晚霞, 宋同清, 等 (2390)
永定河沿河沙地杨树人工林生态系统呼吸特征.....	方显瑞, 张志强, 查同刚, 等 (2400)
基于湿地植物光谱的水体总氮估测.....	刘 克, 赵文吉, 郭逍宇, 等 (2410)
背瘤丽蚌 F 型线粒体基因组全序列分析	陈 玲, 汪桂玲, 李家乐 (2420)
流域“源-汇”景观格局变化及其对磷污染负荷的影响——以天津于桥水库流域为例	李崇巍, 胡 婕, 王 飒, 等 (2430)
线虫群落对抚顺煤矸石山周边土壤可溶性盐污染的响应.....	张伟东, 吕 莹, 肖 莹, 等 (2439)
地上竞争对林下红松生物量分配的影响.....	汪金松, 范秀华, 范 娟, 等 (2447)
湿地松和马尾松人工林土壤甲烷代谢微生物群落的结构特征.....	王 芸, 郑 华, 陈法霖, 等 (2458)
马尾松和杉木树干韧皮部水溶性糖 $\delta^{13}\text{C}$ 值对气象因子的响应	卢钰茜, 王振兴, 郑怀舟, 等 (2466)
沙坡头人工植被演替过程的土壤呼吸特征.....	高艳红, 刘立超, 贾荣亮, 等 (2474)
豫西刺槐能源林的热值动态.....	谭晓红, 刘诗琦, 马履一, 等 (2483)
铁皮石斛种子的室内共生萌发	吴慧凤, 宋希强, 刘红霞 (2491)
红光与远红光比值对温室切花菊形态指标、叶面积及干物质分配的影响	杨再强, 张继波, 李永秀, 等 (2498)
扑草净对远志幼苗根系活力及氧化胁迫的影响.....	温银元, 郭平毅, 尹美强, 等 (2506)
地表臭氧浓度增加和 UV-B 辐射增强及其复合处理对大豆光合特性的影响	郑有飞, 徐卫民, 吴荣军, 等 (2515)
AMF 对喀斯特土壤枯落物分解和对宿主植物的养分传递	何跃军, 钟章成, 董 鸣 (2525)
传统豆酱发酵过程中细菌多样性动态.....	葛菁萍, 柴洋洋, 陈 丽, 等 (2532)
定位施肥对紫色菜园土磷素状况的影响.....	孙倩倩, 王正银, 赵 欢, 等 (2539)
基于生态需水保障的农业生态补偿标准.....	庞爱萍, 孙 涛 (2550)
保障粮食安全造成的生态价值损失评估模型及应用.....	芦蔚叶, 姜志德, 张应龙, 等 (2561)
专论与综述	
疏浚泥用于滨海湿地生态工程现状及在我国应用潜力.....	黄华梅, 高 杨, 王银霞, 等 (2571)
问题讨论	
厌氧氨氧化菌群体感应系统研究.....	丁 爽, 郑 平, 张 萌, 等 (2581)
基于形态结构特征的洞庭湖湖泊健康评价.....	帅 红, 李景保, 夏北成, 等 (2588)
研究简报	
黄土高原不同树种枯落叶混合分解效应.....	刘增文, 杜良贞, 张晓曦, 等 (2596)
不同经营类型毛竹林土壤活性有机碳的差异.....	马少杰, 李正才, 王 斌, 等 (2603)
干旱对辣椒光合作用及相关生理特性的影响	欧立军, 陈 波, 邹学校 (2612)
硅和干旱胁迫对水稻叶片光合特性和矿质养分吸收的影响	陈 伟, 蔡昆争, 陈基宁 (2620)



封面图说: 红树林粗大的气生根——红树林是热带、亚热带海湾及河口泥滩上特有的常绿灌木或乔木群落。由于海水环境条件特殊, 红树林植物具有一系列特殊的生态和生理特征。其中之一就是气根, 红树从根部长出许多指状的气生根露出海滩地面, 以便在退潮时甚至潮水淹没时用以通气, 故称呼吸根。在中国, 红树林主要分布在海南、广西、广东和福建省沿海, 它一般分布于高潮线与低潮线之间的潮间带, 往往潮差越大, 红树的呼吸根就长得越高越粗大。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201109281427

温银元, 郭平毅, 尹美强, 闫晗, 王玉国. 扑草净对远志幼苗根系活力及氧化胁迫的影响. 生态学报, 2012, 32(8): 2506-2514.

Wen Y Y, Guo P Y, Yin M Q, Yan H, Wang Y G. Effect of prometryne on root activity and oxidative stress of *Polygala tenuifolia* Willd. seedling roots. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(8): 2506-2514.

扑草净对远志幼苗根系活力及氧化胁迫的影响

温银元, 郭平毅*, 尹美强, 闫 晗, 王玉国

(山西农业大学农学院, 太谷 030801)

摘要:以远志(*Polygala tenuifolia* Willd.)为材料,应用组织化学和生物化学的方法研究不同浓度扑草净(0—400 mg/L)对远志幼苗生长、根系活力、膜脂过氧化、活性氧含量及抗氧化酶活性等的影响。10 mg/L 扑草净对远志幼苗根系活力、细胞膜完整性及活性氧的积累几乎无显著影响,而 25—400 mg/L 扑草净处理则显著增加活性氧的积累,明显抑制根系活力且破坏细胞膜完整性;上述结果进一步被膜脂过氧化、质膜完整性、活性氧产生(O_2^- 和 H_2O_2)的非损伤组织化学染色所证明。远志幼苗可通过多种抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX 等)和非酶抗氧化剂(如脯氨酸)的相互协调作用,清除低浓度扑草净胁迫诱发生产生的活性氧,减轻对细胞的伤害。研究表明,发芽期是远志对扑草净处理的敏感时期,较为安全的扑草净临界浓度为 10 mg/L;25 mg/L 扑草净处理即引起远志幼苗氧化胁迫和膜脂过氧化,使细胞膜的完整性受到破坏,根系活力下降,抑制了远志幼苗的生长发育。该研究为远志抗除草剂胁迫机制及其栽培过程中除草剂的安全合理使用提供理论依据。

关键词:远志;扑草净;氧化胁迫;根系活力

Effect of prometryne on root activity and oxidative stress of *Polygala tenuifolia* Willd. seedling roots

WEN Yinyuan, GUO Pingyi*, YIN Meiqiang, YAN Han, WANG Yuguo

College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China

Abstract: Following prometryne treatment, *Polygala tenuifolia* Willd. (*Polygala*) seedlings were investigated histochemically and biochemically to determine the effects of prometryne on root activity, lipid peroxidation, membrane integrity, reactive oxygen species (ROS) accumulation and antioxidant enzyme activity. There was no significant difference between untreated controls and seedlings treated with 10 mg/L prometryne in terms of root activity, membrane permeability and ROS production. Seedlings treated with 25—400 mg/L prometryne showed significantly accelerated ROS production, enhanced loss of membrane integrity and inhibited root cell viability. Histochemical staining with Schiff's reagent, Evans blue, nitroblue tetrazolium and 3,3-diaminobenzidine was positively correlated with the accumulation of malondialdehyde (MDA), loss of membrane integrity, generation of superoxide radicals (O_2^-) and generation of hydrogen peroxide (H_2O_2), respectively. Prometryne-induced oxidative stress triggered significant changes in the antioxidant defense machinery. At lower prometryne concentrations, the antioxidant defense system of *Polygala* seedlings demonstrated very efficient and coordinated enzymatic (superoxide dismutase; catalase; ascorbate peroxidase; peroxidase) and non-enzymatic (non-protein amino acids; proline) scavenging of ROS to regulate the cascades of uncontrolled oxidation and protect plant cells from oxidative damage. Higher prometryne levels increase oxidative stress through excessive production of ROS and destruction of antioxidant systems, ultimately leading to seriously damaged *Polygala* seedlings. The presented results

基金项目:山西省科技攻关项目(20100321103);山西省重点留学基金项目(201004);山西省星火项目(20110510015-1);校创新基金(2009014)

收稿日期:2011-09-28; **修订日期:**2012-03-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: pyguo126@126.com

indicate that *Polygala* seedlings are very sensitive to prometryne exposure during germination; however, the application of 10 mg/L is safe for seedling growth. Treatment at 25 mg/L prometryne can cause significant oxidative stress and lipid peroxidation as well as damage cell membrane integrity, leading to decreased root activity and inhibited seedling growth. These results may provide a theoretical basis for the mechanisms of herbicide resistance and the safe use of herbicides during *Polygala* cultivation.

Key Words: *Polygala tenuifolia* Willd.; prometryne; oxidative stress; root activity

远志(*Polygala tenuifolia* Willd.)为远志科(Polygalaceae)远志属(*Polygala*)多年生草本植物,为我国大宗常用中药材,主要分布于中国北方地区(山西、陕西、河北等),其中山西省产量最大,为山西省的道地药材之一^[1]。远志的规范化种植已经在山西、陕西等地实施,取得了良好的经济效益,但苋科、藜科、菊科等阔叶杂草和稗草、马塘等禾本科杂草,成为阻碍远志规模化生产的主要难题之一。

化学除草是现代农业生产中控制杂草危害最高效的措施。然而除草剂的过度使用导致其在生态系统中大量积累,极易污染环境^[2]。扑草净是均三氮苯类选择性除草剂,化学名称为2-甲硫基-4,6-二(异丙氨基)-1,3,5-三氮苯,在环境中比较稳定,半衰期较长,经常在地下水、地表水,甚至母乳中检测到扑草净的存在^[3]。目前关于除草剂对植物生长的影响及其在环境中的降解方面的研究较多,而对于除草剂对植物和植物-土壤系统生理机能所产生的不利影响和除草剂污染土壤的诊断的研究较少^[4-5]。各种胁迫条件会诱导植物组织产生大量活性氧,如 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 等。植物自身具有一套由非酶抗氧化剂(谷胱甘肽、抗坏血酸、胡萝卜素等)和抗氧化酶类(SOD、POD、CAT、APX等)组成的保护系统,在受到胁迫时可通过调节抗氧化系统的活性降低伤害程度^[6]。已有研究表明,除草剂胁迫对小麦^[4,7-8]、水稻^[9]、大豆^[10]、谷子^[11]、罂粟^[12]等造成了明显的氧化伤害。

远志作为山西规模化种植及道地药材之一,迄今未见任何除草剂(包括扑草净)对其生长发育及氧化胁迫的报道,而根系对土壤环境的变化更敏感,受到的影响更大。因此本试验以远志为材料,研究了除草剂扑草净对远志幼苗根系的氧化伤害和抗氧化酶的影响,探讨了远志对扑草净胁迫的生理反应,为远志抗除草剂胁迫机制及其栽培过程中除草剂的安全使用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

1.1.1 种子萌发

本试验所用材料选用细叶远志(*Polygala tenuifolia* Willd.),该品种在远志道地性生产区(如山西)为主要的野生资源和主栽品种。试验用种子由山西农业大学药用植物研究所提供,试验时先用0.1% $HgCl_2$ 溶液消毒10 min,蒸馏水冲洗5次并在干燥滤纸上吸干,排列于铺有双层灭菌滤纸的9cm培养皿中,每皿50粒。培养皿置于25℃黑暗培养箱中萌发96 h,此时远志胚根长约1 cm。

1.1.2 除草剂处理

设置除草剂扑草净处理浓度为0(CK)、10、25、50、100、200、400 mg/L。将生长一致的远志种子整齐排列于铺有单层灭菌滤纸的9cm培养皿中,每皿50粒,每皿加处理液5 mL。所有培养皿置于光照培养箱中,培养条件为光照16 h,温度25℃,光照 $200\mu mol\cdot m^{-2}\cdot s^{-1}$,相对湿度60%;黑暗8 h,温度20℃,相对湿度80%。处理24 h后分别测定不同处理远志幼苗根系的细胞膜透性、根系活力、MDA含量、 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率、 H_2O_2 含量、抗氧化酶活性,同时进行膜脂过氧化、质膜完整性及活性氧产生的组织化学染色。处理的第6天测定远志幼苗的根长、芽长及其干重、鲜重。

1.2 方法

1.2.1 幼苗形态性状及干物质测定

在处理第6 d分别测量远志幼苗苗高、根长、鲜重,幼苗测量后于105℃烘箱中杀青30 min后在80℃下烘

干至恒重并称重。20 株为一个测定样本,每处理设 3 次重复。

1.2.2 生理指标测定方法

根系活力测定采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[13],以单位鲜重根在单位时间内还原的 TTC mg 数来表示根活力。用电导率法测根尖细胞膜相对透性^[13]。 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率测定参考王爱国^[14]的方法,单位为 $nmol \cdot g^{-1}$ 鲜重 $\cdot min^{-1}$ 。 H_2O_2 含量测定参照 Velikova 的方法^[15]。SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法^[16],以抑制 NBT 光化还原的 50% 为一个酶活力单位(U),酶活性以 U/g 鲜重表示。POD 活性测定采用愈创木酚法^[16],以 OD_{470} 每分钟增加 1 为一个酶活力单位(U),酶活性以 U/g 鲜重表示。CAT 和 APX 活性测定参照 Jiang^[4]的方法,CAT 以每分钟减少 $1 \mu mol H_2O_2$ 为一个酶活力单位(U),APX 以每分钟减少 1mmol 抗坏血酸为一个酶活力单位(U)。可溶性蛋白质和 MDA 含量测定参照高俊凤的方法^[16],分别采用考马斯亮蓝法和硫代巴比妥酸法。

1.2.3 组织化学染色

膜脂过氧化的组织化学染色方法参照 Yamamoto 等的方法^[17]。远志根系在希夫试剂(Schiff's reagent)中染色 30 min 后,用 0.5% 焦亚硫酸钾溶液(用 0.05mol/L HCl 配置)冲洗 3 次,然后用体视显微镜观察并拍照记录(下同)。用于测定细胞膜完整性的伊文斯蓝(Evans blue)染色时,将远志幼苗根系浸泡在 10mL 0.025% 伊文斯蓝溶液中(用 100 mmol/L $CaCl_2$ 配置, pH 5.6) 30min,然后用 100 mmol/L $CaCl_2$ (pH 5.6) 冲洗 3—5 次后拍照记录。

$O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 的组织化学染色参照 Song^[7] 和 Fryer^[18] 等的方法。 $O_2^{\cdot-}$ 用氮蓝四唑(NBT)染色;远志幼苗根系浸泡于 6mmol/L NBT(用 10mmol/L 柠檬酸缓冲液配置, pH6.0)中, 25℃ 照光染色 8h(此时有深蓝色不溶物甲臌产生),然后在乙醇中脱色 5min 后拍照。 H_2O_2 用 3,3'-二氨基联苯胺(DAB)染色;根系浸泡于 5mmol/L DAB (pH3.8)中, 25℃ 照光染色 6 h(此时 DAB 与 H_2O_2 反应生成深褐色聚合物),然后在乙醇中脱色 4h 后拍照。

1.2.4 数据分析和统计

采用 Excel 软件完成数据整理和计算,用 SAS 8.0 进行单因素方差分析(Anova)和多重比较(LSD 法)。各图表中的数据为平均数 $\pm$ SE,不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 扑草净对远志幼苗生长的影响

由表 1 可知,10—400 mg/L 扑草净处理 6 d 后,发芽期远志幼苗的根长、芽长、干重、鲜重均受到了不同程度的抑制,其抑制率随处理浓度的升高而增大。10 mg/L 处理分别抑制根长和芽长 16.2% 和 21.6%,扑草净浓度达到 200 mg/L 时,无芽的生长,远志幼苗的生长被完全抑制。相对于干物质的积累(干重),远志幼苗的根和芽的伸长及鲜重对扑草净更敏感,100 mg/L 处理使根长和芽长分别降低 52.7% 和 49.1%,根鲜重、芽鲜重分别降低 40.6% 和 46.7%,而根和芽的干重只降低 23.1% 和 10.8%。

表 1 扑草净对远志幼苗生长的影响

Table 1 Effect of prometryne on seedlings growth of *P. tenuifolia*

扑草净浓度/(mg/L) Prometryne contention	根长/cm Root length	芽长/cm Shoot length	鲜重 Fresh weight (mg/株)		干重 Dry weight (mg/株)	
			根 root	芽 shoot	根 root	芽 shoot
0	2.77 $\pm$ 0.14 a	1.71 $\pm$ 0.08 a	5.39 $\pm$ 0.07 a	13.66 $\pm$ 0.21 a	0.26 $\pm$ 0.05 a	1.11 $\pm$ 0.06 a
10	2.32 $\pm$ 0.07 b	1.34 $\pm$ 0.07 b	5.02 $\pm$ 0.14 b	10.60 $\pm$ 0.13 b	0.24 $\pm$ 0.03 ab	1.09 $\pm$ 0.03 ab
25	1.86 $\pm$ 0.19 c	1.09 $\pm$ 0.05 c	4.62 $\pm$ 0.11 c	9.21 $\pm$ 0.15 c	0.23 $\pm$ 0.02 ab	1.06 $\pm$ 0.03 abc
50	1.39 $\pm$ 0.11 d	0.93 $\pm$ 0.07 cd	3.93 $\pm$ 0.07 d	8.17 $\pm$ 0.06 d	0.22 $\pm$ 0.03 ab	1.03 $\pm$ 0.04 bc
100	1.31 $\pm$ 0.07 de	0.87 $\pm$ 0.04 d	3.2 $\pm$ 0.05 e	7.28 $\pm$ 0.09 e	0.2 $\pm$ 0.03 b	0.99 $\pm$ 0.03 c
200	1.12 $\pm$ 0.07 ef	—	1.68 $\pm$ 0.08 f	—	0.11 $\pm$ 0.01 c	—
400	1.03 $\pm$ 0.20 f	—	1.36 $\pm$ 0.05 g	—	0.09 $\pm$ 0.01 c	—

—: 无芽的产生;不同字母表示在 0.05 水平上的差异显著性

2.2 扑草净对远志幼苗根系膜脂过氧化、膜相对透性及根系活力的影响

从膜脂过氧化(图 1A, 希夫试剂染色)和细胞膜完整性(图 1B, 伊文斯蓝染色)的组织化学染色结果可以看出,不同浓度扑草净(10—400 mg/L)处理后,远志幼苗根系的膜脂过氧化和膜相对透性呈增强趋势,扑草净浓度小于 10 mg/L 时对远志幼苗根系几乎无影响,25—50 mg/L 扑草净处理增加了远志幼苗根系细胞膜的脂质过氧化和相对透性,处理浓度大于 100 mg/L 扑草净对远志幼苗根系产生很严重的影响。图 2 中的定量测定进一步证明了组织化学染色的结果,10—400 mg/L 扑草净处理显著增加远志幼苗根系中 MDA 的含量,且各处理间差异显著,扑草净浓度为 400 mg/L 时,远志幼苗根系中 MDA 含量比对照增加 110.4%。细胞膜相对透性的变化趋势与膜脂过氧化相同,扑草净浓度为 10mg/L 时远志幼苗根系细胞膜相对透性与对照无差异,处理浓度大于 25 mg/L 时膜相对透性显著高于对照,且各处理间的差异达显著水平(图 1B, 图 2)。远志幼苗的根系活力随扑草净处理浓度的增加而降低,10mg/L 和 25 mg/L 处理对根系活力无显著影响,50—400 mg/L 扑草净处理显著降低远志幼苗根系活力,分别比对照降低 45.6%、67.7%、86.1% 和 97.0% (图 2)。

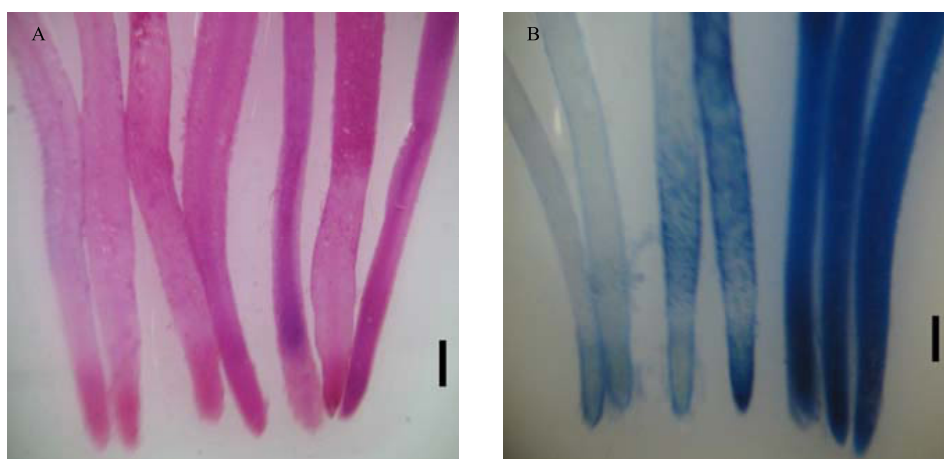


图 1 扑草净胁迫下远志幼苗根系膜脂过氧化(A)和质膜完整性(B)组织化学染色

Fig. 1 Histochemical detection of lipid peroxidation (A) and plasma membrane integrity (B) of *P. tenuifolia* seedling roots under prometryne stress

从左至右扑草净浓度依次为 0, 10, 25, 50, 100, 200, 400 mg/L, A 为希夫试剂染色, B 为伊文斯蓝染色; 标尺为 1mm

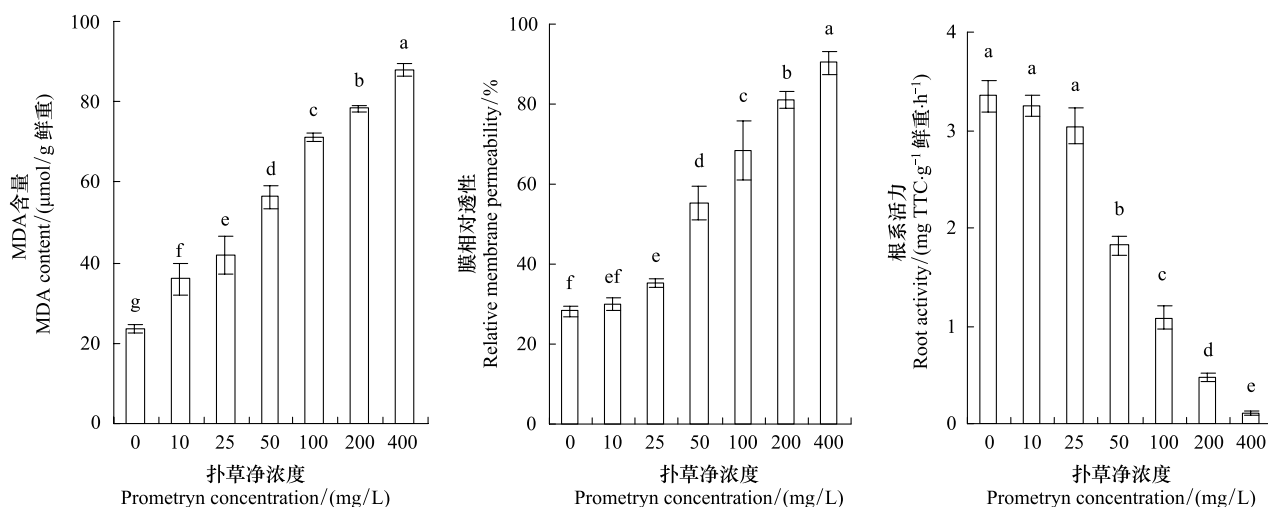


图 2 扑草净对远志幼苗根系膜脂过氧化、膜相对透性及根系活力的影响

Fig. 2 Effect of prometryne on Lipid peroxidation, relative membrane permeability and roots activity of *P. tenuifolia* seedling roots

2.3 扑草净对远志幼苗根系活性氧的影响

氮蓝四唑(NBT)和3,3'-二氨基联苯胺(DAB)染色分别对超氧阴离子($O_2^{\cdot-}$,图3A)和过氧化氢(H_2O_2 ,图3B)进行组织化学分析。组织化学分析和图4定量测定的结果表明,10mg/L扑草净处理未引起远志幼苗根系中 $O_2^{\cdot-}$ 的产生,但已显著增加其 H_2O_2 含量,比对照增加21.9%。扑草净浓度高于25mg/L的处理显著增加远志幼苗根系中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 H_2O_2 含量,且各处理间差异显著(除50mg/L和100mg/L处理间 H_2O_2 的含量无显著差异),400mg/L扑草净处理时远志幼苗根系中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 H_2O_2 含量达最大值,分别比对照增加6.9倍和1.4倍(图4)。

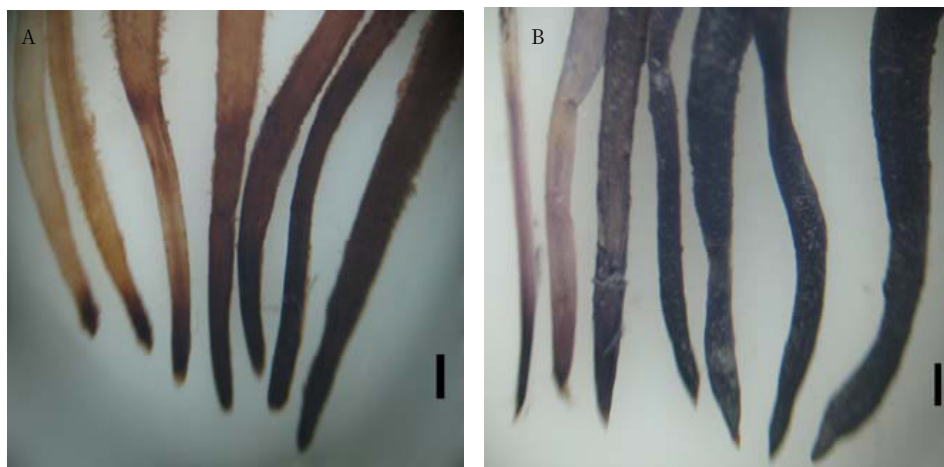


图3 扑草净胁迫下远志幼苗根系超氧阴离子和过氧化氢组织化学染色

Fig. 3 Histochemical detection of superoxide radicals and hydrogen peroxide of *P. tenuifolia* seedling roots under prometryne stress

从左至右扑草净浓度依次为0, 10, 25, 50, 100, 200, 400 mg/L. A为NBT染色,B为DAB染色. 标尺为1mm

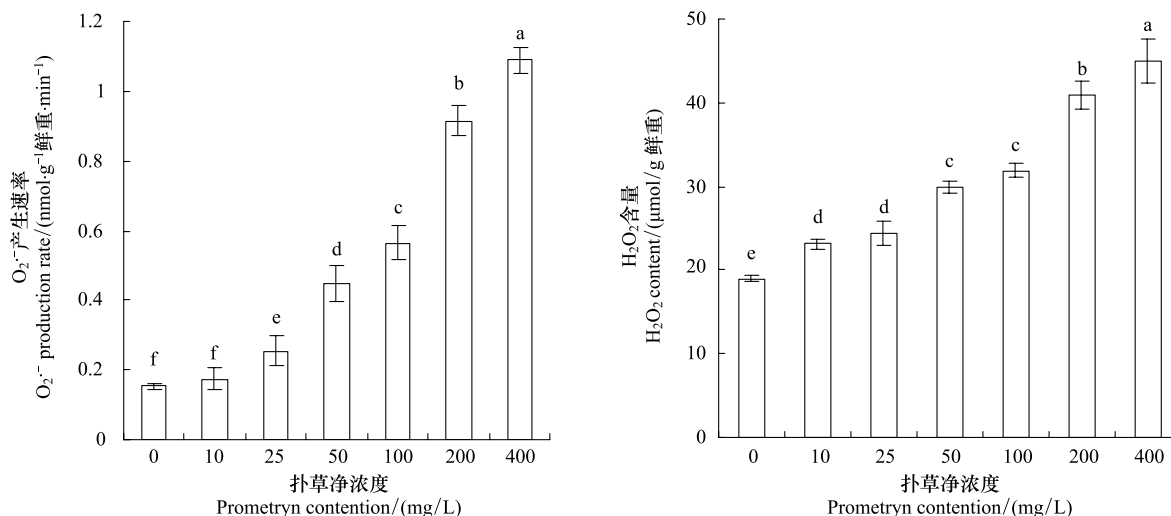


图4 扑草净对远志幼苗根系超氧阴离子产生速率和过氧化氢含量的影响

Fig. 4 Effect of prometryne on production rate of superoxide radicals and hydrogen peroxide content of *P. tenuifolia* seedling roots

2.4 扑草净对远志幼苗根系抗氧化酶活性的影响

随扑草净浓度增大,4种抗氧化酶活性的变化趋势相同,即都是先上升而后又降低。扑草净浓度为10mg/L时,远志幼苗根系中POD活性和SOD活性高于对照,但不显著,CAT和APX活性则比对照增加35.6%和49.7%,达显著水平(图5)。25 mg/L扑草净处理后远志幼苗根系4种抗氧化酶(POD、SOD、CAT、APX)活性均显著高于对照,浓度在50mg/L时POD和SOD活性都最强,分别比对照高75.3%和49.0%,之

后 POD 和 SOD 活性呈下降趋势,扑草净浓度为 400 mg/L 时显著低于对照。远志幼苗根系中 CAT 活性在扑草净浓度为 100 mg/L 时达最大值,比对照增加 118.4%,达极显著水平,而 400 mg/L 的扑草处理则使 CAT 活性显著低于对照(-25.1%)。扑草净浓度为 25 mg/L 时 APX 活性最强,比对照增加 140.0%,当处理浓度 ≥ 100 mg/L 时,APX 活性则低于对照,且在 400 mg/L 时达显著水平,比对照降低 29.0% (图 5)。

由图 5 所示,远志幼苗根系 4 种抗氧化酶对扑草净的敏感性不同,在本试验条件下,APX 似乎最为敏感,在处理浓度较低(10mg/L)时就显著高于对照,且在 25 mg/L 时达到最大值, CAT、POD 次之, SOD 相对来说最不敏感,其活性最大值(扑草净浓度 50mg/L 时)仅比对照增加 49.0%,且在处理浓度最大时(400 mg/L)与对照无差异,而其余 3 种酶(POD、CAT、APX)活性均显著低于对照。

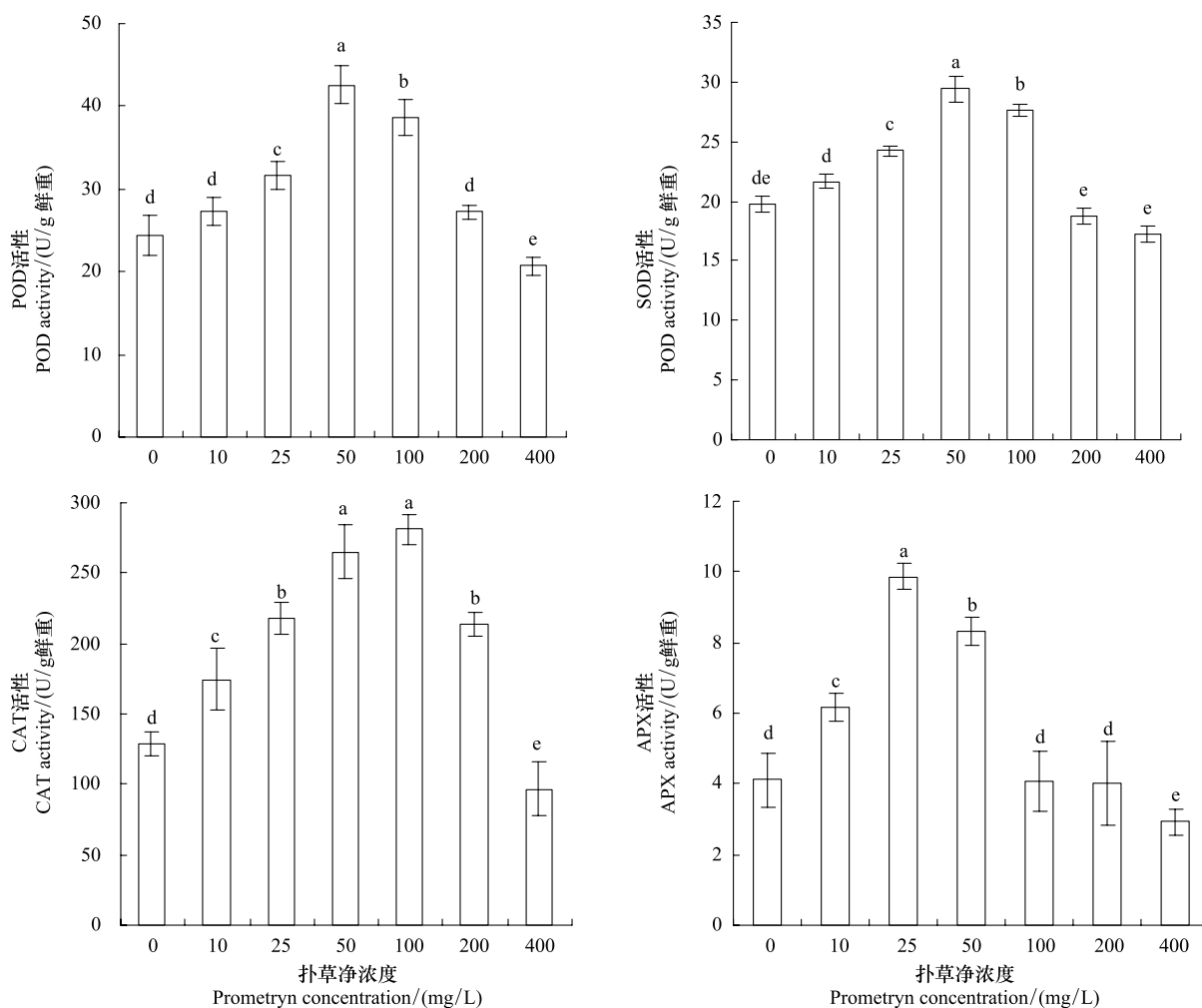


图 5 扑草净对远志幼苗根系 POD、SOD、CAT 和 APX 活性的影响

Fig.5 Effect of prometryne on activity of POD, SOD, CAT and APX of *P. tenuifolia* seedling roots

2.5 扑草净对远志幼苗根系脯氨酸和可溶性蛋白含量的影响

图 6 为扑草净对远志幼苗根系渗透调节物质的影响。随扑草净浓度增加,远志幼苗根系脯氨酸含量逐渐增加,在 50 mg/L 时达到最大,比对照增加 74.6%,之后其含量又降低,当浓度为 200 mg/L 和 400 mg/L 时,脯氨酸含量显著低于对照,分别比对照低 23.4% 和 48.5%。蛋白质含量随扑草净浓度的变化趋势与脯氨酸不同,即呈逐渐降低的趋势,扑草净浓度小于 25mg/L 时,远志幼苗根系蛋白质含量和对照差异不显著,50—400 mg/L 扑草净处理显著降低蛋白质含量,分别比对照降低 16.7%、23.0%、45.3% 和 69.4%,且 200 mg/L 和 400 mg/L 处理与对照间的差异达极显著水平。

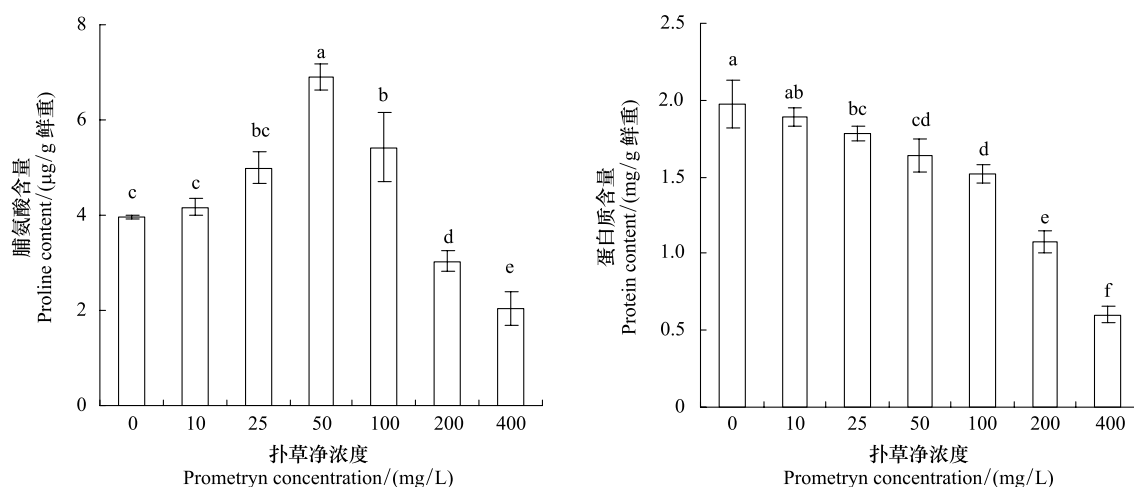


图6 扑草净对远志幼苗根系脯氨酸和蛋白质含量的影响

Fig. 6 Effect of prometryne on content of proline and protein of *P. tenuifolia* seedling roots

3 讨论

环境污染(例如重金属、有机污染物等)引起植物产生各种生理胁迫或氧化胁迫,其中最明显的症状是抑制植物的生长。研究表明土壤中过量的除草剂抑制植物的生长和生物量的积累^[7]。土壤中4—24 mg/kg 扑草净^[4]和5—25 mg/kg 绿麦隆^[7]抑制了小麦幼苗的生长及干物质的积累,0.1—0.8 mg/kg 氯氟吡氧乙酸显著抑制水稻幼苗地上部的生长,而对根系生长的抑制作用不显著^[8]。扑草净显著抑制远志幼苗根和芽的伸长,表现出一定的浓度效应,且对于干重的影响不敏感(表1),表明这种抑制效应可能是通过抑制细胞的分裂和伸长而产生的^[9]。

细胞的抗氧化系统是活性氧积累的传感器,在正常情况下,ROS的产生和清除被多种抗氧化防御机制所调控而保持一种动态平衡^[19]。当植物受到各种生物和非生物胁迫时,这种平衡被打破而使细胞ROS迅速积累导致膜脂过氧化^[6]。MDA含量和细胞膜完整性反映脂质过氧化作用的程度。土壤中除草剂残留诱发植物细胞内ROS(如 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2)的积累^[9]。扑草净处理远志幼苗后,随着浓度增加远志幼苗根系中 $O_2^{\cdot-}$ 产生速率和 H_2O_2 的含量呈上升趋势(图4),导致远志幼苗根系膜脂过氧化作用增强(图1A),MDA含量增加(图2),细胞膜的完整性受到破坏(图1B),从而使电解质外渗(图2),功能丧失,表现为根系TTC活力降低(图2C)及抑制其生长等(表1)。说明在扑草净胁迫下,由于活性氧的产生和清除平衡被打破,远志幼苗根系内 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 迅速增加,MDA含量升高,导致膜脂过氧化程度加剧,质膜的稳定性降低,膜透性增大,引起细胞内各种电解质外渗,是造成细胞伤害的重要原因之一^[4,6-7,9,20-21],这对于进一步研究了解除草剂残留对植物根系生长的影响有重要意义。

组织化学染色研究表明,强光照射使拟南芥叶肉组织中 $O_2^{\cdot-}$ 的大量积累,而 H_2O_2 主要在维管组织中积累^[18];铝离子胁迫引起的膜脂过氧化和胼胝质的产生发生在豌豆根系表面,而细胞膜的破坏则在膜脂裂隙的周边^[17];除草剂胁迫引起小麦^[7]、水稻^[9]中 $O_2^{\cdot-}$ 积累主要发生在叶脉中, H_2O_2 则在整个叶片中都有发生。本试验中,扑草净胁迫引起远志幼苗根系的膜脂过氧化和细胞膜破损主要发生在根系的表面,且根尖部分最强(图1); $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 的积累在整个根系中都有发生,但根尖和中柱细胞中积累较多(图3)。表明非损伤原位组织化学染色是研究逆境条件下组织特异性氧化胁迫及活性氧代谢调节的一种有效方法,能直观反映活性氧产生及其造成氧化损伤的特定组织和部位^[17-18]。

除草剂胁迫影响植物体内的多种生理过程而破坏其活性氧代谢的动态平衡^[22]。植物体内存在一个多种抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX)相互协调作用的防御体系抑制活性氧对细胞产生的伤害,SOD被认为是生物抵御逆境的第一道防线,它催化 $O_2^{\cdot-}$ 通过歧化反应形成 H_2O_2 和 O_2 ,阻止 $O_2^{\cdot-}$ 进入由金属离子催化的

Haber-Weiss-type 反应而产生 $\text{OH}^\cdot$ 。SOD 活性的增加会导致 H_2O_2 含量增加,从而诱导或激活 H_2O_2 清除酶^[6]。CAT、POD、APX 分别通过不同的反应途径将 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2 ,从而提高植物对逆境的忍耐能力^[4]。在本试验中,低浓度扑草净(0—100mg/L, APX 为 0—50 mg/L)处理时 4 种抗氧化酶活性均高于对照,表明远志幼苗可通过提高自身抗氧化酶活性来适应中等强度扑草净胁迫^[23];而高浓度(200—400 mg/L)扑草净使抗氧化酶活性低于对照,此时, $\text{O}_2^{\cdot-}$ 、 H_2O_2 和 MDA 含量显著高于对照(图 2),这表明植株的抗氧化能力已经遭到严重破坏。由此可知,抗氧化酶活性的改变可以间接反映环境中有毒有害物质的存在,可作为一种生化标志物来监测土壤中扑草净胁迫对远志植物的伤害^[4,24]。

有研究表明,脯氨酸除了可作为重要的渗透调节物质和金属螯合剂外,还被认为是微生物、动物和植物所必需的重要抗氧化剂,通过抑制脂氧合酶活性和清除 ROS 以减轻各种逆境产生的 ROS 的不利影响^[25-26]。绿麦隆胁迫下小麦中游离脯氨酸和可溶性糖含量增加^[7],氯氟吡氧乙酸除草剂胁迫增加了水稻幼苗中脯氨酸含量^[9],三氮苯类除草剂处理降低了水稻幼苗中可溶性蛋白的含量^[27]。不同浓度扑草净处理降低了远志幼苗根系蛋白质含量(图 6),而脯氨酸含量在扑草净浓度为 0—50mg/L 时逐渐增加,之后随浓度增加而降低,且在 200 和 400 mg/L 显著低于对照(图 6)。表明远志幼苗可以通过蛋白质的降解和脯氨酸积累来增强其对较低浓度扑草净的适应性;在高浓度除草剂胁迫下远志幼苗中蛋白质降解可能转变为其他形式的含氮化合物,最终导致蛋白质分解和细胞结构的损伤。

综上所述,扑草净胁迫引起远志幼苗根系中活性氧($\text{O}_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2)的产生和膜脂过氧化,从而使细胞膜的完整性受到破坏,根系活力下降,抑制了远志幼苗根系的伸长和干物质的积累。远志幼苗可通过多种抗氧化酶(SOD、POD、CAT、APX 等)和非酶抗氧化剂的相互协调作用,清除低浓度扑草净胁迫诱发生成的活性氧,减轻对细胞的伤害;而高浓度扑草净在诱发幼苗根系中活性氧大量积累的同时破坏了其抗氧化防御体系,从而对远志幼苗产生了严重的损伤。此外,膜脂过氧化的希夫试剂染色、细胞膜完整性的伊文斯蓝染色、 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 的 NBT 染色及 H_2O_2 的 DAB 染色等非损伤组织化学染色是研究活性氧引起的组织特异性氧化胁迫及其代谢调节的一种有效方法。该研究结果为远志幼苗对土壤中长残效除草剂的抗性机制及其在大田栽培过程中除草剂的安全合理使用提供可靠理论依据。

References:

- [1] Teng H M, Li J T, Hu Z H. Developmental and anatomical studies on the root of *polygala tenuifolia* willd. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28(1): 90-96.
- [2] Cao J, Yin X L, Bu W A, Chen F, Yang G. Study on the determination of prometryne residues in environment. *Journal of Analytical Science*, 2007, 23(4): 397-400.
- [3] Zhou J H, Li X C, Jiang Y, Wu Y, Chen J D, Hu F, Li H X. Combined effects of bacterial-feeding nematodes and prometryne on the soil microbial activity. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(3): 1243-1249.
- [4] Jiang L, Yang H. Prometryne-induced oxidative stress and impact on antioxidant enzymes in wheat. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2009, 72(6): 1687-1693.
- [5] Liu W, Li P J, Zhou Q X, Sun T H. Advances in the research of biomarkers of contaminated soils. *Chinese Journal of Ecology*, 2004, 23(5): 150-155.
- [6] Gill S S, Tuteja N. Reactive oxygen species and antioxidant machinery in abiotic stress tolerance in crop plants. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2010, 48(12): 909-930.
- [7] Song N H, Yin X L, Chen G F, Yang H. Biological responses of wheat (*Triticum aestivum*) plants to the herbicide chlorotoluron in soils. *Chemosphere*, 2007, 68(9): 1779-1787.
- [8] Wang M E, Zhou Q X. Effects of herbicide chlorimuron-ethyl on physiological mechanisms in wheat (*Triticum aestivum*). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2006, 64(2): 190-197.
- [9] Wu G L, Cui J, Tao L, Yang H. Fluroxypyr triggers oxidative damage by producing superoxide and hydrogen peroxide in rice (*Oryza sativa*). *Ecotoxicology*, 2010, 19(1): 124-132.
- [10] Ferreira L C, Cataneo A C, Remaeh L M R, Corniani N, de Fátima Fumis T, de Souza Y A, Scavroni J, Soares B J A. Nitric oxide reduces oxidative stress generated by lactofen in soybean plants. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 2010, 97(1): 47-54.
- [11] Guo Q H, Wang H F, Zhao X L, Shi Z Y. Effects of the POD activity and isoenzymes in millet seedlings after different prometryne treatments.

- Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2009, 37(7): 11-13.
- [12] Wang X, Guo P Y, Yuan X Y, Yao M S. Effect of 2, 4-D on the antioxidative enzyme activities and lipid peroxidation in opium poppy(*papaver somniferum* L.). Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1098-1193.
- [13] Zhang F, Tian T, Jin Z L, Huang C P, Tang G X, Ye Q F, Zhou W J. Effect of new herbicide ZJ0273 on seedling growth and root cell viability of *brassica napus*. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(10): 3522-3529.
- [14] Wang A G, Luo G H. Quantitative relation between the reaction of hydroxylamine and superoxide anion radicals in plants. Plant Physiology Communications, 1990, (6): 55-57.
- [15] Velikova V, Yordanov I, Edreva A. Oxidative stress and some antioxidant systems in acid rain-treated bean plants; protective role of exogenous polyamines. Plant Science, 2000, 151(1): 59-66.
- [16] Gao J F. Plant Physiology Experiments Guidance. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [17] Yoko Y, Kobayashi Y, Matsumoto H. Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. Plant Physiology, 2001, 125(1): 199-208.
- [18] Fryer M J, Oxborough K, Mullineaux P M, Baker N R. Imaging of photo-oxidative stress responses in leaves. Journal of Experimental Botany, 2002, 53(372): 1249-1254.
- [19] Zhang Q Z, Chen Z D, Wang W J, Liu H Y. Effects of chlorpyrifos stress on antioxidant enzyme activities and some related compound contents in pakchoi. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(9): 4524-4530.
- [20] Qian Y Q, Sun Z Y, Han L, Ju G S, Liu J X, Cao L. Response of reactive oxygen and its scavenging system in leaves of buchloe dactyloides (nutt.) engelm to water stress. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(7): 1920-1926.
- [21] Zhang W F, Zhang F, Raziuddin R, Gong H J, Yang Z M, Lu L, Ye Q F, Zhou W J. Effects of 5-aminolevulinic acid on oilseed rape seedling growth under herbicide toxicity stress. Journal of Plant Growth Regulation, 2008, 27(2): 159-169.
- [22] Chao L, Zhou Q X, Chen S, Cui S. Effects of herbicide acetochlor on physiological mechanisms in wheat and biomarkers identification. Environmental Science, 2007, 28(4): 866-871.
- [23] Li J, Hu X H, Guo S R, Wang S P, Wang M H. Effect of exogenous spermidine on polyamine content and antioxidant enzyme activities in roots of cucumber seedlings under root-zone hypoxia stress. Journal of Plant Ecology, 2006, 30(1): 118-123.
- [24] Wang L P, Zheng B H, Meng W. Molecular biomarkers in aquatic organisms in relation to the oxidative stress imposed by environmental pollutants. Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(1): 380-388.
- [25] Trovato M, Mattioli R, Costantino P. Multiple roles of proline in plant stress tolerance and development. Rendiconti Lincei, 2008, 19(4): 325-346.
- [26] Ashraf M, Foolad M R. Roles of glycine betaine and proline in improving plant abiotic stress resistance. Environmental and Experimental Botany, 2007, 59(2): 206-216.
- [27] Peng Y K, Zou L Z, Wang Z Y, Jin H Y, Feng Z Y. The effect of triazine herbicide atrazine on the chromosome structure, protein content and compositions in oryza sativa L. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(4): 497-502.

参考文献:

- [1] 滕红梅, 李金亭, 胡正海. 远志根的发育解剖学研究. 西北植物学报, 2008, 28(1): 90-96.
- [2] 曹军, 尹小乐, 布文安, 陈峰, 杨红. 环境中除草剂扑草净残留分析方法的研究. 分析科学学报, 2007, 23(4): 397-400.
- [5] 刘宛, 李培军, 周启星, 孙铁珩. 污染土壤的生物标记物研究进展. 生态学杂志, 2004, 23(5): 150-155.
- [11] 郭青海, 王宏富, 赵晓玲, 史志瑛. 扑草净不同处理对谷子幼苗过氧化物酶活力及同工酶的影响. 山西农业科学, 2009, 37(7): 11-13.
- [12] 王鑫, 郭平毅, 原向阳, 姚满生. 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. 生态学报, 2008, 28(3): 1098-1193.
- [13] 张帆, 田甜, 金宗来, 黄冲平, 唐桂香, 叶庆富, 周伟军. 新型除草剂丙酯草醚对油菜幼苗生长与根尖细胞活性的影响. 中国农业科学, 2009, 42(10): 3522-3529.
- [14] 王爱国, 罗广华. 植物的超氧物自由基与羟胺反应的定量关系. 植物生理学通讯, 1990, (6): 55-57.
- [16] 高俊凤. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] 张清智, 陈振德, 王文娇, 刘红玉. 毒死蜱胁迫对小白菜抗氧化酶活性和相关生理指标的影响. 生态学报, 2008, 28(9): 4524-4530.
- [20] 钱永强, 孙振元, 韩蕾, 巨关升, 刘俊祥, 曹丽. 野牛草叶片活性氧及其清除系统对水分胁迫的响应. 生态学报, 2010, 30(7): 1920-1926.
- [22] 晁雷, 周启星, 陈苏, 崔爽. 乙草胺对小麦生理机能的影响与生物标记物识别. 环境科学, 2007, 28(4): 866-871.
- [23] 李璟, 胡晓辉, 郭世荣, 王素平, 王鸣华. 外源亚精胺对根际低氧胁迫下黄瓜幼苗根系多胺含量和抗氧化酶活性的影响. 植物生态学报, 2006, 30(1): 118-123.
- [24] 王丽平, 郑丙辉, 孟伟. 环境污染对水生生物产生氧化压力的分子生物标志物. 生态学报, 2007, 27(1): 380-388.
- [27] 彭永康, 邹灵芝, 王振英, 金洪英, 冯正勇. 三氯苯类除草剂对水稻染色体结构、蛋白质含量及组分的影响. 作物学报, 2006, 32(4): 497-502.

CONTENTS

Physiological responses of five deciduous broad-leaved tree seedlings in the Northeast Area of China to burning	WANG Rong, HU Haiqing (2303)
The occurrence regularity of psyllid in <i>Haloxylon</i> spp and its influencing factors	LI Fenlian, WU Xuehai, WANG Peiling, et al (2311)
The estimating of the spatial distribution of forest biomass in China based on remote sensing and downscaling techniques	LIU Shuangna, ZHOU Tao, SHU Yang, et al (2320)
Multivariate correlation analysis between landscape pattern and water quality	ZHAO Peng, XIA Beicheng, QIN Jianqiao, et al (2331)
Red fox habitat selection and landscape feature analysis in the Dalai Lake Natural Reserve in Inner Mongolia	ZHANG Honghai, LI Chengtao, DOU Huashan, et al (2342)
Research on assemblage characteristics of macroinvertebrates in the Yalu Tsangpo River Basin	XU Mengzhen, WANG Zhaoyin, PAN Baozhu, et al (2351)
Climate change induced potential range shift of the crested ibis based on ensemble models	ZHAI Tianqing, LI Xinhai (2361)
Analysis of the sources of second generation meadow moth populations that immigrated into Chinese pastoral areas in 2010	ZHANG Li, ZHANG Yunhui, ZENG Juan, et al (2371)
Genetic diversity based on cytochrome <i>b</i> gene analysis of different geographic populations of blue sheep in China	LI Nannan, LIU Zhensheng, WANG Zhenghuan, et al (2381)
Soil microbial properties under different grain-for-green patterns in depressions between karst hills	LU Shiyang, PENG Wanxia, SONG Tongqing, et al (2390)
Ecosystem and soil respiration of a poplar plantation on a sandy floodplain in Northern China	FANG Xianrui, ZHANG Zhiqiang, ZHA Tonggang, et al (2400)
Estimating total nitrogen content in water body based on reflectance from wetland vegetation	LIU Ke, ZHAO Wenji, GUO Xiaoyu, et al (2410)
Analysis on complete F type of mitochondrial genome in <i>Lamprotula lei</i>	CHEN Ling, WANG Guiling, LI Jiale (2420)
The source-sink landscape pattern change and its effect on phosphorus pollution in Yuqiao watershed	LI Chongwei, HU Jie, WANG Sa, et al (2430)
Responses of soil nematode communities to soluble salt contamination around Gangue hill in Fushun	ZHANG Weidong, LV Ying, XIAO Ying, et al (2439)
Effect of aboveground competition on biomass partitioning of understory Korean pine (<i>Pinus koraiensis</i>)	WANG Jinsong, FAN Xiuhua, FAN Juan, et al (2447)
Research of methane metabolic microbial community in soils of slash pine plantation and Masson pine plantation	WANG Yun, ZHENG Hua, CHEN Falin, et al (2458)
$\delta^{13}\text{C}$ values of stem phloem water soluble sugars of <i>Pinus massoniana</i> and <i>Cunninghamia lanceolata</i> response to meteorological factors	LU Yuxi, WANG Zhenxing, ZHENG Huaizhou, et al (2466)
Soil respiration patterns during restoration of vegetation in the Shapotou area, Northern China	GAO Yanhong, LIU Lichao, JIA Rongliang, et al (2474)
Dynamics of caloric value of <i>Robinia pseudoacacia</i> L. energy forest in the west of Henan Province	TAN Xiaohong, LIU Shiqi, MA Luyi, et al (2483)
<i>Ex-situ</i> symbiotic seed germination of <i>Dendrobium catenatum</i>	WU Huifeng, SONG Xiqiang, LIU Hongxia (2491)
Effects of red/far red ratio on morphological index, leaf area and dry matter partitioning of cut chrysanthemum flower	YANG Zaiqiang, ZHANG Jibo, LI Yongxiu, et al (2498)
Effect of prometryne on root activity and oxidative stress of <i>Polygala tenuifolia</i> Willd. seedling roots	WEN Yinyuan, GUO Pingyi, YIN Meiqiang, et al (2506)
Combined effects of elevated O_3 concentration and UV-B radiation on photosynthetic characteristics of soybean	ZHENG Youfei, XU Weimin, WU Rongjun, et al (2515)
Nutrients transfer for host plant and litter decomposition by AMF in Karst soil	HE Yuejun, ZHONG Zhangcheng, DONG Ming (2525)
The dynamics of bacteria community diversity during the fermentation process of traditional soybean paste	GE Jingping, CHAI Yangyang, CHEN Li, et al (2532)
Effect of site-specific fertilization on soil phosphorus in purple garden soil	SUN Qianqian, WANG Zhengyin, ZHAO Huan, et al (2539)
A method of determining standards for ecological compensation in agricultural areas, giving priority to environmental flows in water allocation	PANG Aiping, SUN Tao (2550)
The loss of ecosystem services value caused by food security assessment model and its application	LU Weiye, JIANG Zhide, ZHANG Yinglong, et al (2561)
Review and Monograph	
Review of the current situation of coastal ecological engineering using dredged marine sediments and prospects for potential application in China	HUANG Huamei, GAO Yang, WANG Yinxia, et al (2571)
Discussion	
Quorum sensing in anaerobic ammonium oxidation bacteria	DING Shuang, ZHENG Ping, ZHANG Meng, et al (2581)
Health evaluation of Dongting Lake based on morphological characters	SHUAI Hong, LI Jingbao, XIA Beicheng, et al (2588)
Scientific Note	
Effects of mix-leaf litter decomposition of different trees in the Loess Plateau	LIU Zengwen, DU Liangzhen, ZHANG Xiaoxi, et al (2596)
Changes in soil active organic carbon under different management types of bamboo stands	MA Shaojie, LI Zhengcai, WANG Bin, et al (2603)
Effects of drought stress on photosynthesis and associated physiological characters of pepper	OU Lijun, CHEN Bo, ZOU Xuexiao (2612)
Effects of silicon application and drought stress on photosynthetic traits and mineral nutrient absorption of rice leaves	CHEN Wei, CAI Kunzheng, CHEN Jining (2620)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 8 期 (2012 年 4 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 8 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元