

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第2期 Vol.33 No.2 **2013**

中国生态学会
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 33 卷 第 2 期 2013 年 1 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

- 岩溶山区水分时空异质性及植物适应机理研究进展..... 陈洪松, 聂云鹏, 王克林 (317)
- 红树林植被对大型底栖动物群落的影响 陈光程, 余 丹, 叶 勇, 等 (327)
- 淡水湖泊生态系统中砷的赋存与转化行为研究进展..... 张 楠, 韦朝阳, 杨林生 (337)
- 纳米二次离子质谱技术(NanoSIMS)在微生物生态学研究中的应用 胡行伟, 张丽梅, 贺纪正 (348)
- 城市系统碳循环: 特征、机理与理论框架 赵荣钦, 黄贤金 (358)
- 城市温室气体排放清单编制研究进展..... 李 晴, 唐立娜, 石龙宇 (367)

个体与基础生态

- 科尔沁沙地家榆林的种子散布及幼苗更新..... 杨允菲, 白云鹏, 李建东 (374)
- 环境因子对木棉种子萌发的影响 郑艳玲, 马焕成, Scheller Robert, 等 (382)
- 五花米草与短叶荳蔻落物分解过程中碳氮磷化学计量学特征 欧阳林梅, 王 纯, 王维奇, 等 (389)
- 性别、季节和体型大小对吐鲁番沙虎巢域的影响 李文蓉, 宋玉成, 时 磊 (395)
- 遮蔽行为对海刺猬摄食、生长和性腺性状的影响..... 罗世滨, 常亚青, 赵 冲, 等 (402)
- 水稻和玉米苗上饲养的稻纵卷叶螟对温度的反应 廖怀建, 黄建荣, 方源松, 等 (409)

种群、群落和生态系统

- 亚热带不同林分土壤表层有机碳组成及其稳定性 商素云, 姜培坤, 宋照亮, 等 (416)
- 禁牧条件下不同类型草地群落结构特征 张鹏莉 陈 俊 崔树娟, 等 (425)
- 高寒退化草地狼毒与赖草种群空间格局及竞争关系 任 珩, 赵成章 (435)
- 小兴安岭 4 种典型阔叶红松林土壤有机碳分解特性 宋 媛, 赵溪竹, 毛子军, 等 (443)
- 新疆富蕴地震断裂带植被恢复对土壤古菌群落的影响 林 青, 曾 军, 张 涛, 等 (454)
- 长期施肥对紫色土农田土壤动物群落的影响 朱新玉, 董志新, 况福虹, 等 (464)
- 潮虫消耗木本植物凋落物的可选择性试验 刘 燕, 廖允成 (475)
- 象山港网箱养殖对近海沉积物细菌群落的影响 裘琼芬, 张德民, 叶仙森, 等 (483)
- 2005 年夏季东太平洋中国多金属结核区小型底栖生物研究 王小谷, 周亚东, 张东声, 等 (492)
- 川西亚高山典型森林生态系统截留水文效应 孙向阳, 王根绪, 吴 勇, 等 (501)

景观、区域和全球生态

- 中国水稻生产对历史气候变化的敏感性和脆弱性 熊 伟, 杨 婕, 吴文斌, 等 (509)
- 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势 贺 伟, 布仁仓, 熊在平, 等 (519)
- 地表太阳辐射减弱和臭氧浓度增加对冬小麦生长和产量的影响 郑有飞, 胡会芳, 吴荣军, 等 (532)

资源与产业生态

- 基于环境卫星数据的黄河湿地植被生物量反演研究 高明亮, 赵文吉, 官兆宁, 等 (542)
- 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异 陈 涛, 常庆瑞, 刘 京, 等 (554)

不同水稻栽培模式下小麦秸秆腐解特征及对土壤生物学特性和养分状况的影响..... 武 际,郭熙盛,鲁剑巍,等 (565)

施氮时期对高产夏玉米光合特性的影响 吕 鹏,张吉旺,刘 伟,等 (576)

城乡与社会生态

城市景观组分影响水质退化的阈值研究 刘珍环,李正国,杨 鹏,等 (586)

长株潭地区生态可持续性 戴亚南,贺新光 (595)

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响 朱涵毅,陈益军,劳佳丽,等 (603)

达里诺尔湖沉积物中无机碳的形态组成 孙园园,何 江,吕昌伟,等 (610)

绿洲土 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染下重金属的形态特征和生物有效性 武文飞,南忠仁,王胜利,等 (619)

柠檬酸和 EDTA 对铜污染土壤环境中吊兰生长的影响 汪楠楠,胡 珊,吴 丹,等 (631)

研究简报

海州湾生态系统服务价值评估 张秀英,钟太洋,黄贤金,等 (640)

内蒙古羊草群落、功能群、物种变化及其与气候的关系 谭丽萍,周广胜 (650)

氮磷供给比例对长白落叶松苗木磷素吸收和利用效率的影响 魏红旭,徐程扬,马履一,等 (659)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 352 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 38 * 2013-01



封面图说: 科尔沁沙地榆树——榆树疏林草原属温带典型草原地带,适应半干旱半湿润气候的隐域性沙地顶级植物群落,具有极强的适应性、稳定性,生物产量较高。在我国仅见于科尔沁沙地和浑善达克沙地。是防风固沙、保护沙区生态环境和周边土地资源的一种重要的植物群落类型,是耐旱沙生植物的重要物种基因库和荒漠野生动物的重要避难所和栖息地。这些年来,由于人类毁林开荒、过度放牧、甚至片面地建立人工林群落等的干扰,不同程度地破坏了榆树疏林的生态环境,影响了其特有的生态作用。

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

DOI: 10.5846/stxb201111251802

朱涵毅, 陈益军, 劳佳丽, 沈梁, 李菲菲, 米兰, 王慧中, 薛大伟. 外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响. 生态学报, 2013, 33(2): 0603-0609.

Zhu H Y, Chen Y J, Lao J L, Shen L, Li F F, Mi L, Wang H Z, Xue D W. The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0603-0609.

外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗抗氧化系统和微量元素积累的影响

朱涵毅, 陈益军, 劳佳丽, 沈 梁, 李菲菲, 米 兰, 王慧中, 薛大伟*

(杭州师范大学 生命与环境科学学院, 杭州 310036)

摘要: 重金属污染已成为世界范围的主要问题之一, 其中镉(Cd)毒害的范围最广。Cd 污染影响植物的生长和发育。一氧化氮(NO)作为植物体内的一种活性信号因子, 参与了植物对各种胁迫的应答。为了探讨外源 NO 对 Cd 胁迫下水稻苗期生理生化响应的调节作用, 以梗稻和籼稻为材料, 采用营养液水培的方法, 研究外源 NO 供体硝普钠(SNP)对 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd 胁迫下 2 个水稻基因型(ZF802 和 ZH11)幼苗生长、抗氧化酶系统和微量元素吸收的影响。结果表明, 1.5 mmol/L SNP 能明显缓解 Cd 胁迫对两种水稻幼苗生长的抑制作用, 提高幼苗对 Cd 的耐性。尽管存在一定的基因型差异, 但外源 NO 能使两个基因型叶片中的超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性下降, 降低了叶片中丙二醛(MDA)含量, 从而缓解 Cd 对水稻幼苗的毒害。另外, 外源 NO 影响 Cd 胁迫下水稻幼苗地上部和根部 Cd 和微量元素的积累, 这种影响的程度与水稻的品种有关, 具有显著的基因型差异, 且机制较复杂。

关键词: 水稻; 镉; 一氧化氮; 抗氧化酶; 微量元素

The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress

ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, SHEN Liang, LI Feifei, MI Lan, WANG Huizhong, XUE Dawei*

College of Life and Environmental Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 310036 China

Abstract: Heavy metal pollution has become one of the major problems the world, with cadmium (Cd) the most widespread pollution. Cd is a heavy metal without biological functions and highly toxic to plants and animals. Its accumulation in soil is becoming a severe threat to crop production as well as human health. The presence of excessive amount of Cd may cause toxicity to plants, resulting in stunted growth, strong reduction in biomass production, damage of the photosynthetic apparatus, reduction in chlorophyll content and disturbance of mineral nutrition and carbohydrate metabolism. Nitric oxide (NO) is a bioactive gas and is an important signaling molecule with diverse physiological functions in plants. Recently, a lot of researchers found that NO plays an important role in mediating some biotic and abiotic stress-induced oxidative stresses in plant kingdom. To understand the regulative effect of exogenous nitric oxide on the physiological and biochemical responses of rice seedlings under cadmium stress, in the present study, two rice cultivars, ZF802 (*indica*) and ZH11 (*japonica*) grown in IRRI's nutrient solution were used to investigate the effects of exogenous nitric oxide (sodium nitroprusside as NO donor) on the growth of seedlings, activities of antioxidant enzymes (SOD and POD) and

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30800676;31171535); 浙江省自然科学基金资助项目(Y3090114); 浙江省重点科技创新团队基金资助(2010R50039); 杭州师范大学生物科学国家特色专业本科生科技创新项目

收稿日期: 2011-11-25; 修订日期: 2012-05-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dwxue@hznu.edu.cn

microelements accumulation in two rice genotypes under 100 $\mu\text{mol/L}$ cadmium stress. The results showed that addition of 1.5 mmol/L exogenous SNP significantly alleviated the inhibitory effect of Cd^{2+} stress on the growth of rice seedlings. Exogenous SNP also decreased the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD), and the contents of malondialdehyde (MDA) in the leaves of rice seedlings under Cd stress, despite of certain genotype difference, suggesting that SNP could alleviate oxidative damage of rice seedlings caused by Cd. In addition, exogenous NO supply affected Cd and microelements accumulation of the shoots and roots of rice seedlings under Cd stress. The effects had significant genotypic difference and complex mechanism.

Key Words: rice; cadmium; NO; antioxidant enzyme; microelement

镉(Cd)是重要的工业和环境污染物质,也是毒性最强的重金属之一,极易被植物吸收并积累,超过一定限度时严重影响作物的产量和品质,进而严重威胁人类健康。作物生长在有毒重金属污染的土壤上,其生长发育将受到严重抑制。Cd对植物的毒害,在形态上主要表现为根、茎生长迟缓和叶片失绿、卷曲;生理生化方面多表现为光合作用和蒸腾作用受到抑制,引起氧化胁迫和膜的损伤等^[1]。现已明确,Cd对水稻的毒害主要有:阻碍水稻根系生长、影响种子萌发及植株生长,最终导致生物量和产量的下降;在生理上造成氧化胁迫以及叶绿素、糖类、蛋白质等大分子合成受阻,体内养分失调及其它一系列生理代谢紊乱^[2]。Cd还可能通过影响水稻细胞质膜的透性从而影响一些营养元素的吸收和积累,导致植株和籽粒中营养元素和成分的改变^[3]。Cd被认为是南方土壤污染中常见的重金属元素,一般土壤中的Cd含量已超过土壤正常值。因此,研究Cd对农作物,尤其是对水稻的影响,成为研究重金属污染的热点。

一氧化氮(Nitric Oxide, NO)广泛存在于植物组织中,是植物体内一种重要的氧化还原信号分子,属于活性氮范畴。NO参与植物种子萌发、生长发育、光形态建成、衰老等一系列生理过程^[4-6]。近年来的研究表明,NO作为植物体内的一种活性信号因子,还参与了植物对各种胁迫的应答^[7-9]。研究发现,0.1和1 mmol/L SNP(硝普钠,一氧化氮供体)处理能显著增强小麦幼苗SOD和CAT活性,降低由NaCl处理引起的小麦叶片氧化损伤。NO能有效缓解Cu对水稻的毒害效应^[10]。NO还能通过提高盐胁迫下芦苇愈伤组织中质膜 H^+ -ATPase的表达和活性,进而提高组织中 K^+/Na^+ 而提高抗盐性^[11]。Wang和Yang研究发现NO能显著缓解Al对绿豆的毒害^[12],NO预处理能显著缓解Al对植株生长的抑制,减少Al胁迫引起的脂质过氧化和ROS的积累。刘建新等研究发现^[13],外源NO通过提高Cd胁迫下植株体内的SOD、APX、CAT活性及GSH含量,来增强活性氧的清除能力,保护由Cd胁迫引起的黑麦草幼苗叶片光合机构的破坏,缓解Cd胁迫对幼苗生长的抑制作用。Besson-Bard等通过对Cd胁迫下拟南芥基因差异表达分析发现,NO可能通过诱导根部IRT1基因的上调表达,使Cd大量截留在根部,减少地上部Cd的积累从而缓解Cd毒害,说明NO参与了Cd胁迫下植物对重金属离子的吸收与转移。目前NO缓解Cd对水稻毒害的研究特别是对微量元素积累的影响研究较少,因此本研究以两个基因型水稻幼苗为实验材料,通过对其生长状况、抗氧化酶系活性、Cd和3种微量元素的含量进行分析,研究外源NO对Cd胁迫下水稻幼苗的抗性和生理生化机制,以期为Cd污染治理和水稻的重金属Cd抗性研究提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试材料为籼稻品种ZF802和粳稻品种ZH11,浸种后催芽3 d,转入沙盒培养,采用1/2国际水稻所营养液配方^[14]浇灌。长至3叶期转入水培箱中培养,并进行处理。

1.2 试验设计

每个品种设置3个处理:对照组(采用国际水稻所营养液配方进行培养)、100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 和100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} +1.5 mmol/L SNP。3组分别用CK、Cd、Cd+1.5SNP表示。营养液每3 d更换1次,实验重复3次。培养

3 周后对水稻根和叶的各项指标进行测定。

1.3 测定方法

处理 3 周后取植株样,根系在乙二胺四乙酸二钠溶液中(20 mmol/L)浸泡 3 h 去除表面粘附的离子,再用蒸馏水洗净,分别测量株高和根长,并将地上部和根系分开,杀青后,80 °C 恒温烘干,用原子吸收光谱仪(AA6300, Shimadzu, Tokyo, Japan)分析 Cd 和微量元素^[15]。

丙二醛(MDA)含量测定采用硫代巴比妥酸分光光度法^[16];抗氧化酶活性测定参照张宪政介绍的方法^[17],并略加改动(主要增加 95% 乙醇二次洗涤过程,提高纯度)。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氯化硝基四氮唑蓝(NBT)光化还原法^[18];过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚氧化法。用 SHIMADZU UV-2410PC 分光光度计酶动力学软件测定吸光度的变化。

1.4 数据分析

利用 Excel 软件进行数据的分类汇总,用 SPSS15.0 软件进行数据分析及差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 外源 NO 对镉胁迫下水稻幼苗根长和株高的影响

水稻幼苗根系在 100 $\mu\text{mol/L}$ Cd^{2+} 处理 7 d 后呈现棕黄色,14 d 后变褐色并逐渐坏死。叶尖在处理 10 d 后逐步失绿,14 d 后叶尖呈现褐色的坏死斑,叶色变黄,植株生长矮小,两个基因型水稻在 Cd^{2+} 胁迫下根长和株高均明显下降(图 1)。添加 1.5 mmol/L SNP 有效缓解了水稻幼苗 Cd 毒害的症状,两个基因型的株高和根长均比 Cd 处理下显著提高,基本恢复到对照水平,其中籼稻 ZF802 的根长甚至超过了对照。

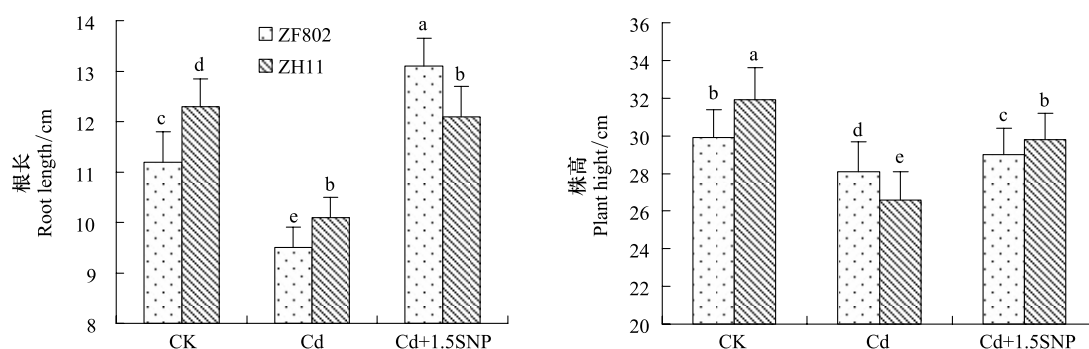


图 1 Cd 胁迫下外源 NO 对水稻幼苗根长株高的影响

Fig.1 Effect of exogenous NO on the roots length and the plant height of the rice seedlings under Cd stress

2.2 外源 NO 对不同基因型水稻 Cd 积累的影响

与野生型对比可以发现,Cd 处理下两种水稻幼苗地上部 Cd 含量均有显著提高,通过施加外源 1.5 mmol/L SNP 后发现,NO 对两种水稻品种地上部和根部 Cd 积累量影响差异较大。ZF802 地上部在施加 SNP 后,Cd 含量会明显降低;而 ZH11 则略有升高(图 2)。而在根部情况相反,外源 SNP 显著降低了 ZH11 根部的 Cd 含量,却提高 ZF802 的根部 Cd 含量(图 2),存在基因型差异。

2.3 外源 NO 对不同基因型水稻微量元素积累的影响

Cd 处理显著影响了植株对微量元素的吸收和分配,且存在一定的基因型差异。Cd 处理下,ZF802 和 ZH11 地上部 Mn 和 Zn 含量较对照下降,特别是 ZF802 地上部的 Mn 含量比对照下降了 64.5%;但在 Cd 处理下,ZF802 地上部 Cu 含量较对照增加,而 ZH11 的 Cu 含量却比对照下降了 34.9%(图 3)。

而在根部中,两个基因型 Zn、Mn、Cu 含量在 Cd 处理下变化更具差异,ZF802 根部 Mn、Cu 含量比对照均下降,而 Zn 含量显著升高;但 ZH11 恰恰相反,根部 Mn、Cu 含量比对照均增加,而 Zn 含量则下降(图 4)。外源 NO 的添加使 ZF802 地上部 Zn、Cu 的含量降低,Mn 含量升高;而 ZH11 地上部 Zn、Cu 含量在添加外源 NO 后比 Cd 处理有所升高,Mn 含量下降(图 3)。在根部中,除 Cu 外,施加外源 NO 后,两个基因型的 Mn、Zn 含

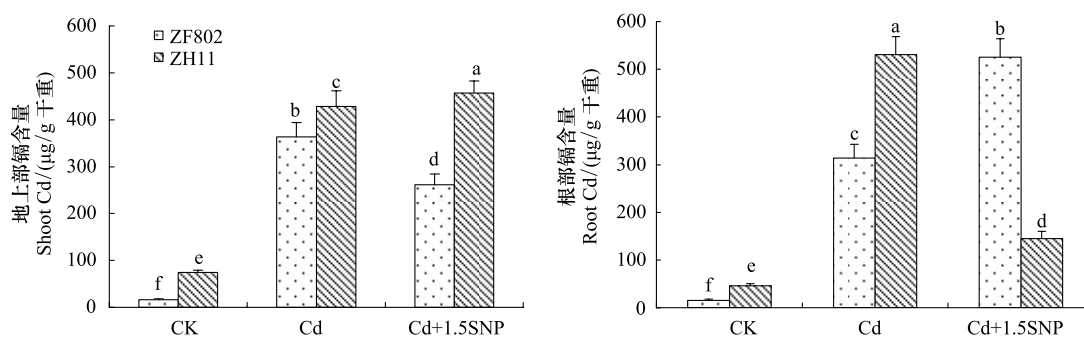


图2 外源 NO 对水稻幼苗地上部分和根部 Cd 含量的影响

Fig. 2 Effect of exogenous NO on Cd content in the shoot and the root of rice seedlings under Cd stress

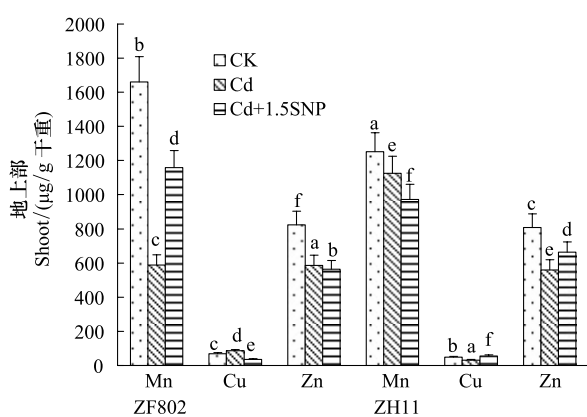


图3 外源 NO 对水稻幼苗地上部微量元素含量的影响

Fig. 3 Effect of exogenous NO on microelements content in the shoot of rice seedlings under Cd stress

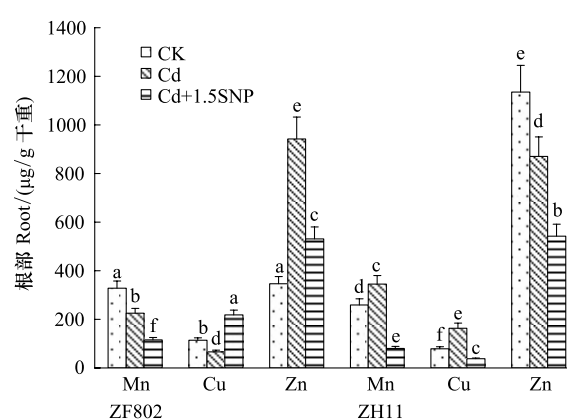


图4 外源 NO 对水稻幼苗根部微量元素含量的影响

Fig. 4 Effect of exogenous NO on microelements content in the root of rice seedlings under Cd stress

量均较 Cd 处理显著下降,ZF802 和 ZH11 的 Zn 含量分别较 Cd 处理下降了 43.7% 和 37.7%;添加 SNP 后,ZF802 根部的 Cu 含量显著上升,但 ZH11 的 Cu 含量却显著下降,具有明显的基因型差异。

2.4 镉胁迫下外源 NO 对抗氧化酶系统的影响

SOD 是植物体内清除氧自由基的一种重要的保护酶。两个基因型在处理之间 SOD 活性的变化存在显著的差异,Cd 处理 3 周后,ZF802 的 SOD 活性比对照略低,而加入外源 SNP 与 Cd 处理相比 SOD 活性也基本没有变化,但是 ZH11 在 Cd 处理下,SOD 活性显著上升,加入外源 SNP 后,SOD 活性与 Cd 处理相比下降(图 5)。总体上 ZH11 的 SOD 活性高于 ZF802,能有效地清除自由基,说明 SNP 能缓解 Cd 毒害引起的氧化胁迫。从图 6 中可以看出,两个基因型叶片 POD 活性在 Cd 胁迫下均显著上升。添加外源 SNP 后,两个基因型叶片 POD 活性较 Cd 处理有所下降,基本能恢复到对照水平,这也说明了 SNP 可以缓解 Cd 胁迫下水稻体内的氧化胁迫。

2.5 镉胁迫下外源 NO 对丙二醛含量的影响

植物器官在逆境条件下会发生脂膜过氧化作用,丙二醛是脂膜过氧化作用的最终产物之一,也是膜系统受害的重要指标之一,可用于表示细胞脂膜过氧化程度和植物对逆境条件反应的强弱。图 7 反映了 Cd 胁迫下两个基因型的 MDA 含量,结果表明,Cd 胁迫 3 周后,二者的叶片 MDA 含量均上升,其中 ZF802 上升较 ZH11 显著,说明细胞膜伤害较严重。而添加外源 NO 后,两个基因型叶片的 MDA 含量均回落,ZF802 叶片的 MDA 含量比 Cd 处理下降了 36.5%,但仍高于对照;而 ZH11 的 MDA 含量比 Cd 处理下降了 22.5%,甚至略低于对照水平。这也说明 NO 在缓解 Cd 胁迫下植物细胞脂膜过氧化过程中具有重要作用,同时不同基因型间

具有明显的差异。

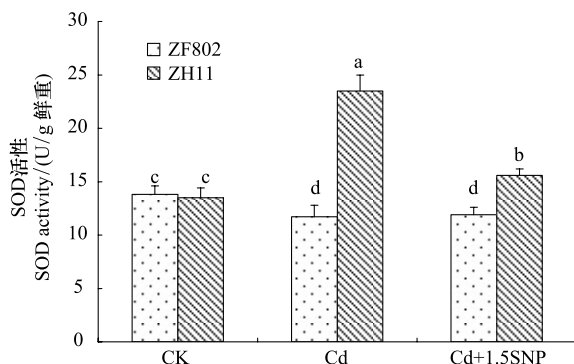


图5 Cd胁迫下外源NO对水稻幼苗SOD活性的影响

Fig. 5 Effect of exogenous NO on activity of SOD in rice seedlings under Cd stress

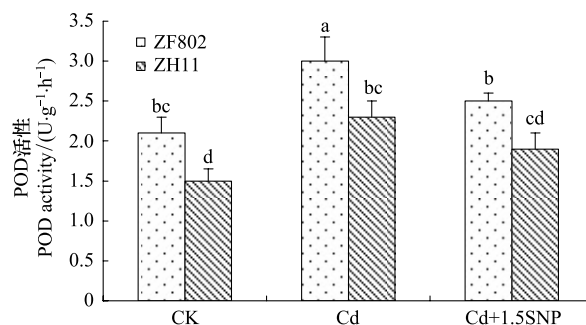


图6 Cd胁迫下外源NO对水稻幼苗POD活性的影响

Fig. 6 Effect of exogenous NO on activity of POD in rice seedlings under Cd stress

3 讨论

Cd是目前对农作物毒害最普遍的重金属之一,Cd胁迫对植物的伤害是多方面的。它能诱导活性氧的产生,导致膜质过氧化和生物大分子的损伤,从而使光合作用等生理过程发生紊乱,抑制植株的生长。本实验结果表明,不同基因型水稻在Cd胁迫下根长和株高均受到抑制,水稻生长发育受影响,与前人结果相同。NO是植物体内的一种重要的活性信号因子,可参与植物对各种胁迫的应答。SNP是一种最常用的外源NO供体,研究表明,0.5 mmol/L SNP大约可释放2.0 μmol/L的NO。Laspina等发现SNP处理可以显著缓解Cd胁迫对向日葵幼苗生长的抑制,提高了向日葵抗Cd胁迫的能力^[19]。本研究发现通过施加外源NO供体SNP可以缓解Cd胁迫对水稻幼苗生长的抑制。

逆境胁迫对植物的伤害是多方面的,其中膜系统是植物受伤害的敏感部位和原初位点。逆境首先引起植物离子失衡和高渗胁迫,并导致包括氧化伤害的次生胁迫,例如各种活性氧(ROS)的积累,导致膜结构完整性的破坏,叶绿素降解、蛋白质变性、核酸断裂,甚至细胞死亡。植物体内SOD、POD等抗氧化酶活性对维持膜结构完整性和防御活性氧自由基对膜的攻击有重要作用^[20],SOD和POD共同作用可将H₂O₂转化为H₂O,使自由基维持在一个较低水平,从而避免膜伤害。酶活性测定结果表明,Cd胁迫下诱导两个基因型叶片POD显著上升(图6),说明Cd胁迫诱导抗氧化酶活性增强,从而清除自由基,阻止植物体内ROS的积累。但Cd处理后两个基因型SOD活性表现差异显著,其中ZH11叶片SOD活性显著增强,而ZF802叶片SOD活性在处理3周后下降,这可能是由于Cd胁迫时间过长,导致ZF802的叶片保护酶系统的崩溃,而ZH11对Cd耐受性较强,叶片保护酶系统破坏较小。已有大量报道表明外源NO能够起到缓解重金属胁迫的作用^[21],但其解毒机制一直未明确。现在主要认为是由于外源NO通过减少氧化胁迫来缓解重金属毒害。Tewari等研究表明外源NO能够缓解Cu毒害引起的人参不定根中产生的氧化胁迫^[22],Wang等的研究也表明外源NO是通过缓解氧化胁迫来降低Al对肉桂根系的毒害作用。而对于外源NO缓解氧化胁迫的机理目前主要存在两种观点。Kopyra和Gwóźdz认为外源NO的这种抗氧化胁迫是通过直接清除ROS来实现的^[23],刘建新等人认为NO的抗氧化胁迫能力并非直接参与ROS的清除,而是提高了抗氧化酶系的活性,这与Jiang等^[24]和胡向阳等^[25]的

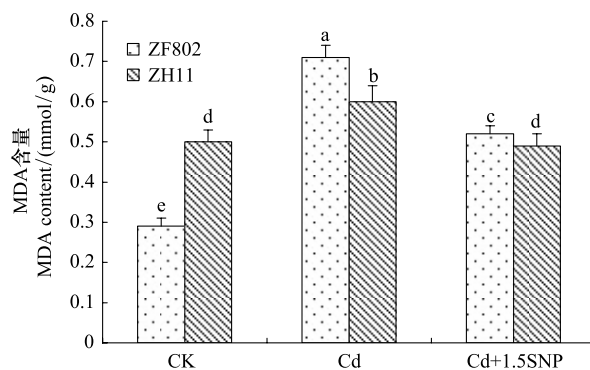


图7 Cd胁迫下外源NO对水稻幼苗丙二醛含量的影响

Fig. 7 Effect of exogenous NO on MDA content in rice seedlings under Cd stress

观点一致。本研究表明,加入外源 SNP 后,两个基因型叶片中的 SOD 和 POD 活性均下降,NO 可以作为抗氧化剂直接清除体内积累的 ROS,使 Cd 胁迫下活性增强的酶活性下降。

植物在逆境胁迫下,活性氧的过量积累会引起膜脂过氧化,破坏细胞膜系统稳定和完整,进而导致植物细胞结构的损伤^[26]。本研究也发现,Cd 处理使水稻幼苗叶片 MDA 含量升高,特别是 ZF802 细胞膜伤害更加严重。MDA 含量增加到一定程度的时候可能对抗氧化酶活性有一定的影响,从实验结果中可以发现,在 Cd 处理 3 周后,MDA 的积累很高的 ZF802,SOD 的活性受到抑制而有所下降(图 5,图 7),而 POD 的活性增强(图 6),也就是说高度积累的 MDA 对于 SOD 的活性起抑制作用,而对于 POD 活性并没有大的抑制作用。施加外源 SNP 后,两个基因型叶片的 MDA 含量比 Cd 处理下明显下降,说明 NO 在缓解 Cd 胁迫下植物细胞脂膜过氧化过程中具有重要作用,与前人在小麦中的研究一致^[27]。

通过化学调控手段缓解 Cd 毒害,是降低作物对 Cd 吸收与积累是作物安全生产的重要手段。前人的研究表明,NO 参与了 Cd 胁迫下植物对重金属离子的吸收与转移,通过诱导基因表达,使 Cd 积累在根部,从而缓解地上部的 Cd 毒害。本研究发现籼稻品种 ZF802 与前人的研究相符,Cd 胁迫下地上部和地下部 Cd 含量均增加,施加外源 NO 后,地上部 Cd 含量下降,根部含量增加。但是粳稻品种 ZH11 却相反,施加外源 SNP 后,地上部 Cd 含量略有升高,而在根部 Cd 含量却降低(图 2),说明 NO 的施加促使 ZH11 中的 Cd 含量从根部更多的转移到了地上部。这也说明 Cd 在水稻的体内转移和分配机制比较复杂,有待于进一步研究。Cd 作为一种重金属离子,在植物体内可能与必需营养元素竞争根部的吸收位点,也可能通过影响植物对养分的吸收,从而影响植物的正常生长^[28]。本研究中,Cd 胁迫下 3 种微量元素在根部和地上部的分布存在基因型差异。Cd 的存在抑制了 ZH11 根部对 Zn 的吸收,增加了对 Mn 和 Cu 的积累,但 ZF802 却情况相反,根部 Zn 含量上升。地上部 Cu 的含量也存在基因型差异。目前对于 Cd 胁迫影响植物对微量元素的吸收有一些研究,但是得出的结论很不一致^[29-30],有些研究认为 Cd 对微量元素的影响是通过协同作用^[31],而有的认为是通过拮抗作用^[32]。本研究表明,Cd 对 Zn、Mn、Cu 等微量元素吸收的影响存在基因型差异,与张国平等在小麦上的结果一致^[33]。外源 SNP 能减少 Cd 胁迫下两个基因型根部对 Zn、Mn 的积累,但是对根部 Cu 的积累和地上部 3 中微量元素含量的影响却存在基因型差异。这也说明水稻中 NO 对 Cd 处理下微量元素吸收的影响存在基因型差异,且机制比较复杂,需进一步探讨。

References:

- [1] Di Toppi L S, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41(2): 105-130.
- [2] Wu F B, Dong J, Jia G X, Zheng S J, Zhang G P. Genotypic difference in the responses of seedling growth and Cd toxicity in rice (*Oryza sativa* L.). *Agricultural Sciences in China*, 2006, 5(1): 68-76.
- [3] Liu J G, Liang J S, Li K Q, Zhang Z J, Yu B Y, Lu X L, Yang J C, Zhu Q S. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress. *Chemosphere*, 2003, 52(9): 1467-1473.
- [4] Besson-Bard A, Gravot A, Richaud P, Auroy P, Duc C, Gaymard F, Taconnat L, Renou J P, Pugin A, Wendehenne D. Nitric oxide contributes to cadmium toxicity in arabidopsis by promoting cadmium accumulation in roots and by up-regulating genes related to iron uptake. *Plant Physiology*, 2009, 149(3): 1302-1315.
- [5] Brennan T, Frenkel C. Involvement of hydrogen peroxide in the regulation of senescence in pear. *Plant Physiology*, 1977, 59(3): 411-416.
- [6] Li H Y, Li C G, Guan L J, Shao S. Effect of nitric oxide (NO) on heat-shock-induced chilling tolerance in maize seedlings. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 25(3): 503-507.
- [7] Delledonne M, Xia Y J, Dixon R A, Lamb C. Nitric oxide functions as a signal in plant disease resistance. *Nature*, 1998, 394(6693): 585-588.
- [8] Beligni M V, Lamattina L. Nitric oxide: a non-traditional regulator of plant growth. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(11): 508-509.
- [9] Beligni M V, Lamattina L. Nitric oxide counteracts cytotoxic processes mediated by reactive oxygen species in plant tissues. *Planta*, 1999, 208(3): 337-334.
- [10] Singh H P, Batish D R, Kaur G, Arora K, Kohli R K. Nitric oxide (as sodium nitroprusside) supplementation ameliorates Cd toxicity in hydroponically grown wheat roots. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63(1/3): 158-167.
- [11] Zhao L Q, Zhang F, Guo J K, Yang Y L, Li B B, Zhang L X. Nitric oxide functions as a signal in salt resistance in the calluses from two ecotypes of reed. *Plant Physiology*, 2004, 134(2): 849-857.
- [12] Wang Y S, Yang Z M. Nitric oxide reduces aluminum toxicity by Preventing oxidative stress in the roots of *Cassia tora* L. *Plant and Cell Physiology*, 2005, 46(12): 1915-1923.

- [13] Liu J X, Hu H B, Wang X. Effects of an exogenous nitric oxide donor on active oxygen metabolism, photosynthesis and the xanthophyll cycle in Ryegrass (*Lolium perenne* L.) seedlings under cadmium stress. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(3): 626-633.
- [14] Yoshida S, Forna D A, Cock J H, Gomez K A. Laboratory manual for physiological studies of rice // International Rice Research Institute. Los Baños; Philippines, 1976; 62-63.
- [15] Xue D W, Chen M C, Zhang G P. Mapping of QTLs associated with cadmium tolerance and accumulation during seedling stage in rice (*Oryza sativa* L.). *Euphytica*, 2009, 165(3): 587-596.
- [16] Zhang X Q, Wu K L, Xue D W. Effects of waterlogging stress on antioxidative enzyme system in different barley genotypes. *Journal of Zhejiang University: Agriculture and Life Sciences*, 2009, 35(3): 315-320.
- [17] Zhang X Z, Tan G R, Huang Y J, Song Y H. *Experimental Techniques of Plant Physiology*. Shenyang: Liaoning Science and Technology Publishing House, 1989; 107-108.
- [18] Zheng D F, Zhao L M, Ma N J. Effects of plant growth regulators (PGRs) on endogenous hormone contents and activities of protective enzymes in soybean leaves. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(7): 1233-1239.
- [19] Laspina N V, Groppa M D, Tomaro M L, Tomaro M P, Benavides. Nitric oxide protects sunflower leaves against Cd induced oxidative stress. *Plant Science*, 2005, 169(2): 323-330.
- [20] Baisak R, Rana D, Acharya P B B, Kar M. Alterations in the activities of active oxygen scavenging enzymes of wheat leaves subjected to water stress. *Plant and Cell Physiology*, 1994, 35(3): 489-495.
- [21] Sandalio L M, Dalurzo H C, Gómez M, Romero-Puertas M C, Del Río L A. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(364): 2115-2126.
- [22] Tewari R K, Hahn E J, Paek K Y. Modulation of copper toxicity-induced oxidative damage by nitric oxide supply in the adventitious roots of *Panax ginseng*. *Plant Cell Reports*, 2008, 27(1): 17-181.
- [23] Kopyra M, Gwózdź E A. Nitric oxide stimulates seed germination and counteracts the Inhibitory effect of heavy metals and salinity on root growth of *Lupinus luteus*. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2003, 441(11/12): 1011-1017.
- [24] Jiang M Y, Zhang J H. Effect of abscisic acid on active oxygen species, antioxidative defence system and oxidative damage in leaves of maize seedlings. *Plant and Cell Physiology*, 2001, 42(11): 1265-1273.
- [25] Hu X Y, Cai W M. Nitric oxide and elicitor-induced plant defense responses. *Chinese Bulletin of Life Sciences*, 2005, 17(2): 176-182.
- [26] Lin C C, Kao C H. Effect of NaCl stress on H₂O₂ metabolism in rice leaves. *Plant Growth Regulation*, 2000, 30(2): 151-155.
- [27] Zheng C F, Jiang D, Dai T B, Jing Q, Cao W X. Effects nitroprusside, a nitric oxide donor, on carbon and nitrogen metabolism and the activity of the antioxidation system in wheat seedlings under salt stress. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5): 1174-1183.
- [28] Tu C, Zheng C R, Chen H M. Advances on interaction of heavy metals and nutrient elements in soil plant system. *China Environmental Science*, 1997, 17(6): 526-529.
- [29] Bjerre G K, Schierup H H. Uptake of six heavy metals by oat as influenced by soil type and additions of cadmium, lead, zinc and copper. *Plant and Soil*, 1985, 88(1): 57-69.
- [30] Guo Z, Huang S Z, Yuan H Y. Effects of Cd stress on the development, Cd accumulation and microelements absorption of two species of Iris. *Ecology and Environment*, 2008, 17(2): 651-656.
- [31] Smith G C, Brennan E G. Cadmium-zinc interrelationship in tomato plants. *Phytopathology*, 1983, 73: 8679-882.
- [32] Oliver D P, Hannam R, Tiller K G, Wilhelm N S, Merry R H, Cozens G D. The effect of Zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain. *Journal of Environmental Quality*, 1994, 23: 705-711.
- [33] Zhang G P, Fukami M, Guan B G. Difference between two wheat cultivars in Cd and mineral nutrient uptake under different Cd levels. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(4): 454-458.

参考文献:

- [6] 李海燕, 李春光, 关丽杰, 邵双. 一氧化氮对热激诱导玉米幼苗耐冷性的影响. *江苏农业学报*, 2009, 25(3): 503-507.
- [13] 刘建新, 胡浩斌, 王鑫. 外源一氧化氮供体对镉胁迫下黑麦草幼苗活性氧代谢、光合作用和叶黄素循环的影响. *环境科学学报*, 2009, 29(3): 626-633.
- [16] 张晓勤, 吴克利, 薛大伟. 湿害对不同大麦基因型抗氧化酶系统的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2009, 35(3): 315-320.
- [17] 张宪政, 谭桂茹, 黄元极, 宋玉华. *植物生理学实验技术*. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1989; 107-108.
- [18] 郑殿峰, 赵黎明, 冯乃杰. 植物生长调节剂对大豆叶片内源激素含量及保护酶活性的影响. *作物学报*, 2008, 34(7): 1233-1239.
- [25] 胡向阳, 蔡伟明. 一氧化氮与激发子诱导的植物抗病防卫反应. *生命科学*, 2005, 17(2): 176-182.
- [27] 郑春芳, 姜东, 戴廷波, 荆奇, 曹卫星. 外源一氧化氮供体硝普钠浸种对盐胁迫下小麦幼苗碳氮代谢及抗氧化系统的影响. *生态学报*, 2010, 30(5): 1174-1183.
- [28] 涂从, 郑春荣, 陈怀满. 土壤-植物系统中重金属与养分元素交互作用. *中国环境科学*, 1997, 17(6): 526-529.
- [30] 郭智, 黄苏珍, 原海燕. Cd 胁迫对马蔺和鸢尾幼苗生长、Cd 积累及微量元素吸收的影响. *生态环境*, 2008, 17(2): 651-656.
- [33] 张国平, 深见元弘, 关本根. 不同镉水平下小麦对镉及矿质养分吸收和积累的品种间差异. *应用生态学报*, 2002, 13(4): 454-458.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol.33 ,No.2 January ,2013(Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- Spatio-temporal heterogeneity of water and plant adaptation mechanisms in karst regions; a review CHEN Hongsong, NIE Yunpeng, WANG Kelin (317)
- Impacts of mangrove vegetation on macro-benthic faunal communities CHEN Guangcheng, YU Dan, YE Yong, et al (327)
- Advance in research on the occurrence and transformation of arsenic in the freshwater lake ecosystem ZHANG Nan, WEI Chaoyang, YANG Linsheng (337)
- Application of nano-scale secondary ion mass spectrometry to microbial ecology study HU Hangwei, ZHANG Limei, HE Jizheng (348)
- Carbon cycle of urban system; characteristics, mechanism and theoretical framework ZHAO Rongqin, HUANG Xianjin (358)
- Research and compilation of urban greenhouse gas emission inventory LI Qing, TANG Lina, SHI Longyu (367)

Autecology & Fundamentals

- Seed dispersal and seedling recruitment of *Ulmus pumila* woodland in the Keerqin Sandy Land, China YANG Yunfei, BAI Yunpeng, LI Jiandong (374)
- Influence of environmental factors on seed germination of *Bombax malabaricum* DC. ZHENG Yanling, MA Huancheng, Scheller Robert, et al (382)
- Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometric characteristics during the decomposition of *Spartina alterniflora* and *Cyperus malaccensis* var. *brevifolius* litters OUYANG Linmei, WANG Chun, WANG Weiqi, et al (389)
- Home range of *Teratoscincus roborowskii* (Gekkonidae): influence of sex, season, and body size LI Wenrong, SONG Yucheng, SHI Lei (395)
- Effects of the covering behavior on food consumption, growth and gonad traits of the sea urchin *Glyptocidaris crenularis* LUO Shibin, CHANG Yaqing, ZHAO Chong, et al (402)
- Biological response of the rice leaffolder *Cnaphalocrocis medinalis* (Güenée) reared on rice and maize seedling to temperature LIAO Huaijian, HUANG Jianrong, FANG Yuansong, et al (409)

Population, Community and Ecosystem

- Composition and stability of organic carbon in the top soil under different forest types in subtropical China SHANG Suyun, JIANG Peikun, SONG Zhaoliang, et al (416)
- The community characteristics of different types of grassland under grazing prohibition condition ZHANG Pengli, CHEN Jun, CUI Shujuan, et al (425)
- Spatial pattern and competition relationship of *Stellera chamaejasme* and *Aneurolepidium dasystachys* population in degraded alpine grassland REN Heng, ZHAO Chengzhang (435)
- SOC decomposition of four typical broad-leaved Korean pine communities in Xiaoxing' an Mountain SONG Yuan, ZHAO Xizhu, MAO Zijun, et al (443)
- The influence of vegetation restoration on soil archaeal communities in Fuyun earthquake fault zone of Xinjiang LIN Qing, ZENG Jun, ZHANG Tao, et al (454)
- Effects of fertilization regimes on soil faunal communities in cropland of purple soil, China ZHU Xinyu, DONG Zhixin, KUANG Fuhong, et al (464)
- Woody plant leaf litter consumption by the woodlouse *Porcellio scaber* with a choice test LIU Yan, LIAO Yuncheng (475)
- The bacterial community of coastal sediments influenced by cage culture in Xiangshan Bay, Zhejiang, China QIU Qiongfeng, ZHANG Demin, YE Xiansen, et al (483)
- A study of meiofauna in the COMRA's contracted area during the summer of 2005 WANG Xiaogu, ZHOU Yadong, ZHANG Dongsheng, et al (492)
- Hydrologic regime of interception for typical forest ecosystem at subalpine of Western Sichuan, China SUN Xiangyang, WANG Genxu, WU Yong, et al (501)

Landscape, Regional and Global Ecology

- Sensitivity and vulnerability of China's rice production to observed climate change XIONG Wei, YANG Jie, WU Wenbin, et al (509)

Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005	HE Wei, BU Rencang, XIONG Zaiping, et al (519)
Combined effects of elevated O ₃ and reduced solar irradiance on growth and yield of field-grown winter wheat	ZHENG Youfei, HU Huifang, WU Rongjun, et al (532)
Resource and Industrial Ecology	
The study of vegetation biomass inversion based on the HJ satellite data in Yellow River wetland	GAO Mingliang, ZHAO Wenji, GONG Zhaoning, et al (542)
Temporal and spatial variability of soil available nutrients in arable Lands of Heyang County in South Loess Plateau	CHEN Tao, CHANG Qingrui, LIU Jing, et al (554)
Decomposition characteristics of wheat straw and effects on soil biological properties and nutrient status under different rice cultivation	WU Ji, GUO Xisheng, LU Jianwei, et al (565)
Effects of nitrogen application stages on photosynthetic characteristics of summer maize in high yield conditions	LÜ Peng, ZHANG Jiwang, LIU Wei, et al (576)
Urban, Rural and Social Ecology	
The degradation threshold of water quality associated with urban landscape component	LIU Zhenhuan, LI Zhengguo, YANG Peng, et al (586)
Ecological sustainability in Chang-Zhu-Tan region; a prediction study	DAI Yanan, HE Xinguang (595)
The effect of exogenous nitric oxide on activities of antioxidant enzymes and microelements accumulation of two rice genotypes seedlings under cadmium stress	ZHU Hanyi, CHEN Yijun, LAO Jiali, et al (603)
Forms composition of inorganic carbon in sediments from Dali Lake	SUN Yuanyuan, HE Jiang, LÜ Changwei, et al (610)
Fractionation character and bioavailability of Cd, Pb, Zn and Ni combined pollution in oasis soil	WU Wenfei, NAN Zhongren, WANG Shengli, et al (619)
Effects of CA and EDTA on growth of <i>Chlorophytum comosum</i> in copper-contaminated soil	WANG Nannan, HU Shan, WU Dan, et al (631)
Research Notes	
Values of marine ecosystem services in Haizhou Bay	ZHANG Xiuying, ZHONG Taiyang, HUANG Xianjin, et al (640)
Variations of <i>Leymus chinensis</i> community, functional groups, plant species and their relationships with climate factors	TAN Liping, ZHOU Guangsheng (650)
The effect of N:P supply ratio on P uptake and utilization efficiencies in <i>Larix olgensis</i> Henry. seedlings	WEI Hongxu, XU Chengyang, MA Lüyi, et al (659)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,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,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 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 33 卷 第 2 期 (2013 年 1 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 2 (January, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元