

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第10期

Vol.33 No.10

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

淀山湖百年营养演化历史及营养物基准的建立	李小平, 陈小华, 董旭辉, 董志, 孙敦平 (3301)
矿化度作为蒙新高原湖泊营养物基准影响指标的可行性	席北斗, 张亚丽, 许秋瑾 (3308)
小波分析在湖泊常见浮游藻类荧光识别测定中的应用	张翠, 苏荣国, 宋志杰, 张珊珊, 王修林 (3314)
湖面亮温对巢湖水华影响的遥感监测分析	张红, 黄勇, 李堃 (3323)
基于地下水暴露途径的健康风险评价及修复案例研究	姜林, 钟茂生, 贾晓洋, 夏天翔, 姚珏君, 樊艳玲, 张丽娜, 唐振强 (3329)
基于多生物标志物污染指数法的北部湾潮间带污染程度评价	杜秀萍, 孟范平, 王志峰, 李祥蕾, 杨菲菲, 程凤莲, 杨跃志, 李正炎 (3336)
东海无机氮排海通量年际变化估算	吴家林, 方倩, 石晓勇, 李克强, 张传松, 王修林 (3344)
海洋酸化对大型海藻生长以及磷酸盐、硝酸盐吸收利用的影响	于娟, 张瑜, 杨桂朋, 田延旺 (3352)
北黄海表层沉积物中颗粒态磷的形态分布	孟佳, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (3361)
湖泊疏浚对沉积物再悬浮及磷迁移影响的模拟研究	余居华, 钟继承, 张银龙, 范成新, 何伟, 张雷, 唐阵武 (3368)
降雨条件下岩溶泉水中悬浮颗粒物的运移特征及来源分析	杨平恒, 刘子琦, 贺秋芳 (3376)
三峡水库试验性蓄水前后大宁河富营养化状态比较	张佳磊, 郑丙辉, 刘录三, 王丽婧, 吴光应 (3382)
三峡库区不同土地利用类型氮磷流失特征及其对环境因子的响应	曾立雄, 黄志霖, 肖文发, 田耀武 (3390)
山地城市地表径流源区水质特征监测研究	李立青, 单保庆, 赵建伟, 郭树刚, 高勇 (3397)
唐山开滦煤矿区土壤及地表水中 Se 元素赋存状态及其生态效应研究	张秀芝, 马忠社, 王荫楠, 王志军, 谢伟民 (3404)
西藏地表水中砷的分布	王明国, 李社红, 王慧, 肖唐付, 郑宝山 (3411)
锡林河流域地表水痕量元素的时空分布	薛丽洋, 吴锦奎, 张明泉, 丁永建, 叶柏生 (3417)
天津滨海地区表层沉积物中持久性有机污染物的含量特征与生态风险	卢晓霞, 张姝, 陈超琪, 侯珍, 杨君君 (3426)
松花江流域河流沉积物中多氯联苯的分布、来源及风险评价	聂海峰, 赵传冬, 刘应汉, 彭敏, 李括, 杨柯, 刘飞 (3434)
长江口近岸表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	李涛, 侯立军, 刘敏, 赵迪, 尹国宇, 郑艳玲, 赵慧 (3443)
烟台四十里湾柱状沉积物氮形态地球化学特征	杨玉玮, 高学鲁, 李培苗 (3449)
黄河口湿地土壤中正构烷烃分子指标及物源指示意义	姚鹏, 尹红珍, 姚庆祯, 陈洪涛, 刘月良 (3457)
含藻水中壬基酚的光降解转化研究	彭章娥, 冯劲梅, 何淑英, 吴峰 (3466)
硝酸铁-过硫酸盐改性 GAC 催化 H ₂ O ₂ 氧化橙黄 IV	张瑛洁, 徐淑芬, 廖霞, 曹天静, 杨榕, 李大鹏 (3473)
Pd/CMK-3 的合成、表征及对甲酸的电催化氧化性能研究	还中科, 宗恩敏, 魏丹, 万海勤, 郑寿荣, 许昭怡 (3479)
曝气稳定塘处理农村生活污水曝气控制条件研究	李怀正, 姚淑君, 徐祖信, 陈卫兵 (3484)
以亲水改性聚氨酯为多孔载体的生物膜移动床反应器处理污水中试研究	王玉晓, 孔秀琴, 冯权, 卢海涛, 王德源, 唐黎明, 邢新会 (3489)
光催化降解渗滤液 DOM 不同组分的相对分子量变化特征	贾陈忠, 王焰新, 张彩香 (3495)
短程硝化-反硝化生物滤池脱氮机制研究	孙迎雪, 徐栋, 田媛, 李燕飞 (3501)
CANON 反应器运行稳定性及温度冲击的影响	付昆明, 张杰, 曹相生, 李冬, 孟雪征 (3507)
MUCT 工艺全程硝化和短程硝化模式下反硝化除磷研究	曾薇, 王向东, 张立东, 李博晓, 彭永臻 (3513)
活性污泥胞外聚合物 (EPS) 的分层组分及其理化性质的变化特征研究	袁冬琴, 王毅力 (3522)
有机负荷条件对间歇式气提内循环反应器中好氧颗粒污泥形成的影响	刘孟媛, 周丹丹, 高琳琳, 马德方, 张予萌, 李克宇 (3529)
厌氧污泥降解蔡动力学与生物多样性研究	曹新垲, 杨琦, 郝春博 (3535)
雌二醇在土壤/沉积物中的吸附特征及猪粪 DOM 对吸附的影响	张丰松, 李艳霞, 黄泽春, 杨明 (3542)
近海沉积物对粪固醇的等温吸附和热力学研究	张晓蕾, 薛文平, 徐恒振, 马新东 (3547)
甲苯在北京褐潮土中的运移分布及其 STOMP 模拟研究	韩春媚, 冉娟, 张慧, 李发生, 李雁, 谷庆宝 (3554)
聚丙烯酸钠为结合相的梯度扩散薄膜技术预测甘蔗田土壤中镉的生物有效性	王芳丽, 宋宁宁, 赵玉杰, 张长波, 沈跃, 刘仲齐 (3562)
土壤改良剂及其组合原位钝化果园土壤中的 Pb、Cd	汤民, 张进忠, 张丹, 陈舜, 张训, 刘万平, 余建 (3569)
基于不同通车时间的路旁土壤重金属健康风险:以连霍高速郑州—商丘段为例	谷蕾, 全致琦, 宋博, 马建华 (3577)
生活污水污泥制备的生物质炭对红壤酸度的改良效果及其环境风险	卢再亮, 李九玉, 姜军, 徐仁扣 (3585)
沉积物中多环芳烃对反硝化功能基因垂直分布的影响	吴艳阳, 黄珊, 叶嘉欣, 张恒军, 张仁铎 (3592)
阴离子黏土(层状双氢氧化物)对鲱鱼精 DNA 在重金属作用下的保护作用研究	唐旖旎, 吴平霄, 朱能武 (3598)
预处理后生物成因施氏矿物的矿物学特征及对 As(III) 吸附的影响	梁剑茹, 李浙英, 刘奋武, 周立祥 (3606)
铜绿假单胞菌 ZGKD2 的重金属耐性机制研究	张玉秀, 王姣, 柴团耀, 张倩, 刘金光, 李霞, 白志强, 苏增健 (3613)
1 株 1,2-二氯乙烷降解菌的分离及降解特性研究	王小春, 陈东之, 金小君, 陈建孟 (3620)
PCBs 降解菌的筛选及其降解特性研究	史舜燕, 冯流, 龚吉 (3627)
青草沙水库蓄水期间细菌群落结构变化的初步研究	彭青, 谢冰, 袁琦, 黄智婷, 崔璐璐, 王文婷 (3634)
华北平原玉米-小麦轮作农田 N ₂ O 交换通量的研究	裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 伦小秀, 牟玉静 (3641)
影响南京地区的两次典型空气污染过程分析	王飞, 朱彬, 康汉清, 高晋徽, 王瑛, 江琪 (3647)
济南市夏季环境空气 VOCs 污染特征研究	刘泽常, 张帆, 侯鲁健, 刘玉堂, 吕波 (3656)
活性炭分解臭氧机制研究	刘海龙, 张智辉, 张忠明, 焦媛媛, 王瑞军 (3662)
大气 O ₃ 浓度升高对 2 种基因型矮菜豆丛枝菌根 (AM) 结构及球囊霉素蛋白产生的影响	王鹏腾, 刁晓君, 王曙光 (3667)
铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响	王明霞, 黄建国, 袁玲, 周志峰 (3675)
锌冶炼不同群落生境蟋蟀汞污染	郑冬梅, 李昕馨, 罗庆 (3680)
《环境科学》征订启事 (3313) 《环境科学》征稿简则 (3322) 信息 (3328, 3512, 3561, 3640)	

铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响

王明霞, 黄建国, 袁玲*, 周志峰

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 采用液体培养方法, 研究了 4 个不同菌株 (*Bo* 02、*Bo* 15、*Pt* 715 和 *Sl* 08) 的抗铝性及其在铝胁迫下加入 0、0.25、0.5、1.0 mmol·L⁻¹ Ca²⁺ 处理后抗氧化保护酶活性的变化, 旨在了解钙在缓解外生菌根真菌铝毒方面的作用。结果表明, 不同菌株抗铝性不同, *Pt* 715 和 *Sl* 08 的抗铝性强于 *Bo* 02 和 *Bo* 15。铝胁迫可显著提高外生菌根真菌 *Bo* 02 CAT 和 SOD 活性、*Bo* 15 SOD 活性、*Sl* 08 CAT 和 POD 活性, 说明外生菌根真菌中这几种酶活性的提高与铝毒胁迫密切相关。4 个菌株中, *Bo* 02 酶活性对外源钙最敏感, 外源钙对 *Bo* 02 铝胁迫的缓解作用最好。较高浓度的钙 (≥0.5 mmol·L⁻¹) 可缓解或消除 *Sl* 08 铝胁迫造成的抗氧化酶活性上升。

关键词: 铝; 钙; 外生菌根真菌; 过氧化氢酶; 过氧化物酶; 超氧化物歧化酶

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)10-3675-05

Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress

WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, ZHOU Zhi-feng

(College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: In order to investigate the function of Ca²⁺ in the alleviation of Al³⁺ stress in ectomycorrhizal fungi, four strains (*Bo* 02, *Bo* 15, *Pt* 715 and *Sl* 08) were grown in liquid culture media to study the Al resistance of different strains and the effect of exogenous Ca²⁺ (0, 0.25, 0.5, 1.0 mmol·L⁻¹) on the activity of antioxidative protective enzymes under Al³⁺ stress. It was showed that ectomycorrhizal fungal species varied in resistance to Al³⁺ stress. *Pt* 715 and *Sl* 08 were more tolerant to Al³⁺ than *Bo* 02 and *Bo* 15 *in vitro*. The activities of CAT and SOD in *Bo* 02, SOD in *Bo* 15, CAT and POD in *Sl* 08 increased significantly under Al³⁺ stress. It was showed that the activities of these enzymes in ectomycorrhizal fungi had a close relationship with Al³⁺ stress. The enzymes in *Bo* 02 were most sensitive to exogenous Ca²⁺ and the function of Ca²⁺ in resisting Al³⁺ stress was the best in the four strains. A high concentration of Ca²⁺ (≥0.5 mmol·L⁻¹) could alleviate or offset the increased activities of antioxidative protective enzymes by Al³⁺ stress in *Sl* 08.

Key words: Al; Ca²⁺; ectomycorrhizal fungi; catalase; peroxidase; superoxide dismutase

通常情况下, 铝对植物是无毒的。但当土壤酸化时, 铝即活化成活性铝, 对植物生长发育造成很大威胁^[1]。目前, 随着酸沉降面积扩大和酸性化肥的施用, 铝毒害逐年加剧。铝可以抑制植物对钙的吸收^[2], 破坏细胞膜结构与功能^[3], 诱发胞内自由基暴发。产生的自由基攻击生物大分子, 使 DNA 分子断裂, 导致微核和染色体畸变^[4,5]。近年来的研究显示, 钙在提高植物对铝和重金属毒害、盐害和干旱胁迫等非生物胁迫和生物胁迫 (病虫害) 抗性方面均有重要作用^[6,7]。增施钙对荞麦等铝毒的缓解效应已有报道^[8]。关于铝胁迫下钙对植物根系抗氧化保护酶活性的影响, 在一些植物如小麦、水稻、黑麦、大豆上也有报道^[9~12]。

外生菌根真菌是森林生态系统的重要组成部分。许多优良的外生菌根真菌与树木形成外生菌根

后, 可以促进树木生长, 提高抗逆能力, 增加养分吸收等。研究表明, 铝胁迫时, 接种外生菌根真菌 *Paxillus involutus*、双色蜡蘑等能提高树木抗铝能力^[13,14]。因此, 研究外生菌根真菌的抗铝机制对于森林营造和保护生态环境有重要意义。本研究以外生菌根真菌为材料, 探讨了铝胁迫下加入外源 Ca²⁺ 对外生菌根真菌抗氧化保护酶活性的影响, 试图了解钙在缓解外生菌根真菌铝毒方面的作用, 进而阐明外生菌根真菌的抗铝毒机制, 以期为抗铝毒菌根苗木的生产提供理论依据。

收稿日期: 2012-01-19; 修订日期: 2012-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171215); 重庆市自然科学基金项目 (cstc2011jjA0286)

作者简介: 王明霞 (1980~), 女, 博士研究生, 实验师, 主要研究方向为植物营养学, E-mail: wmx921@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lingyuanh@hotmail.com

1 材料与方法

1.1 供试菌种

试验选取 4 株不同的外生菌根真菌为供试菌株,分别是:采自重庆市金佛山马尾松林土壤的褐环乳牛肝菌 *Suillus luteus* (Sl 08) 和牛肝菌 *Boletus* sp. (*Bo* 02 和 *Bo* 15)、采自四川西昌桉树林的彩色豆马勃 *Pisolithus tinctorius* (*Pt* 715)。

取保存 3~4 个月的上述菌种(株),接种于 Pachlewski 固体培养基上培养 21 d 备用。培养基组成($\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)为:酒石酸铵 0.5,磷酸二氢钾 1.0,硫酸镁 0.5,葡萄糖 20,维生素 B₁ 0.1,琼脂 20 及 $1\text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ 微量元素混合液(每升混合液内含 8.45 g 硼酸、5 g 硫酸锰、6 g 硫酸亚铁、0.625 g 硫酸铜、2.27 g 氯化锌和 0.27 g 钼酸铵)。

1.2 试验设计

1.2.1 铝对外生菌根真菌生长的影响

用 AlCl_3 提供活性铝,配成含 Al^{3+} 浓度分别为 0、0.2、0.4、 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Pachlewski 液体培养基,即形成无铝(对照)、低铝、中铝、高铝这 4 个处理,调节 pH 至 4.5。取 150 mL 三角瓶分装不同处理的液体培养基,每瓶 20 mL,封口后于 120°C 高压蒸汽灭菌 30 min。冷却后接种直径为 6 mm 的供试琼脂菌种 1 个,在 $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 的黑暗条件下静置培养 21 d 测定其生物量。重复 3 次。

1.2.2 铝对外生菌根真菌酶活性的影响

根据 1.2.1 节的试验结果,只有在高铝时铝才会对外生菌根真菌的生长产生一定胁迫。因此,采用 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ AlCl_3 溶液处理菌丝,以探讨铝对外生菌根真菌酶活性的影响。于 Pachlewski 液体培养基中培养供试菌株 21 d 后,将菌丝转移培养在含 0(-A1)、 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ AlCl_3 (+A1)溶液中。处理 24 h 后,吸干表面水分测定菌丝超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性。处理液 pH 均为 4.5,各处理重复 3 次。

1.2.3 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌酶活性的影响

将供试菌株培养至成熟后,转移培养在含有 0、0.25、0.5、 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ CaCl_2 的 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ AlCl_3 处理溶液中,处理 24 h 后,测定外生菌根真菌 CAT、POD 和 SOD 活性。处理液 pH 均为 4.5,各处理重复 3 次。

1.3 测定方法

过滤收集菌丝,去离子水洗净, $80^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 烘干

24 h 后称重,测定生物量。

抗氧化保护酶活性测定:紫外吸收法测定 CAT 活性,愈创木酚显色法测定 POD 活性,氮蓝四唑光还原法测定 SOD 活性^[15]。CAT 和 POD 酶活(以 FW 计)单位以 $\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$ 来表示。SOD 以抑制 NBT 光化还原 50% 所需酶量为 1 个酶活单位(U),酶活性(以 FW 计)单位以 $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}$ 来表示。

2 结果与分析

2.1 铝对外生菌根真菌生长的影响

由表 1 可见,当 Al^{3+} 浓度为 $0.2\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 $0.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,4 个菌株的生物量均与对照无显著差异。当 Al^{3+} 浓度达到 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,*Bo* 02、*Bo* 15 的生物量显著减少,分别比对照减少了 11.0% 和 14.2%;*Pt* 715 和 *Sl* 08 的生物量仍与对照无显著差异。同时,不同菌株的生长量差异较大,平均生物量由大到小依次为 *Sl* 08 (80.94 mg) > *Pt* 715 (54.88 mg) > *Bo* 15 (49.07 mg) > *Bo* 02 (44.12 mg)。*Sl* 08 生物量显著高于其他 3 个菌株。

表 1 铝对外生菌根真菌生物量的影响¹⁾/mg

Table 1 Effects of aluminum on hyphal biomass of

ectomycorrhizal fungi/mg				
处理	<i>Bo</i> 02	<i>Bo</i> 15	<i>Pt</i> 715	<i>Sl</i> 08
无铝(CK)	45.21 a	50.18 a	52.98 ab	78.98 a
低铝	45.87 a	52.64 a	58.33 a	83.38 a
中铝	45.13 a	50.37 a	55.64 ab	81.65 a
高铝	40.05 b	43.07 b	52.60 b	79.75 a

1) 表中同一列中不同小写字母表示差异显著($P=0.05$),下同

2.2 铝对外生菌根真菌抗氧化保护酶的影响

由表 2 可见,不同菌株 3 种酶活对铝处理的响应不同。*Bo* 02 CAT 和 SOD 活性显著增加,分别比对照增加了 405.3% 和 21.4%;POD 活性与对照差异不显著。*Bo* 15 SOD 活性显著增加,比对照增加了 59.4%;CAT 和 POD 活性无显著变化。*Pt* 715 SOD 活性显著降低,比对照减少了 17.5%;CAT 和 POD 活性无显著变化。*Sl* 08 CAT 和 POD 活性显著增加,分别比对照增加了 49.1% 和 150.0%;SOD 活性无显著变化。将各菌株不同酶活取平均值,CAT 活性由高到低依次为:*Sl* 08 [$326.15\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$] > *Bo* 15 [$249.08\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$] > *Bo* 02 [$75.76\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$] > *Pt* 715 [$7.55\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$]。POD 活性由高到低依次为:*Sl* 08 [$0.49\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$] > *Bo* 15 [$0.18\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$] > *Bo* 02 [$0.13\Delta A\cdot(\text{min}\cdot\text{g})^{-1}$] > *Pt* 715 [0.11

表 2 铝对外生菌根真菌膜抗氧化保护酶活性的影响¹⁾

Table 2 Effect of aluminum on the activities of antioxidative protective enzymes of ectomycorrhizal fungi

处理	<i>Bo</i> 02			<i>Bo</i> 15			<i>Pt</i> 715			<i>Sl</i> 08		
	CAT	POD	SOD	CAT	POD	SOD	CAT	POD	SOD	CAT	POD	SOD
- Al (CK)	25.03b	0.12a	754.02b	232.09a	0.15a	78.27b	5.71a	0.11a	368.11a	261.91b	0.28b	191.94a
+ Al	126.49a	0.14a	915.60a	266.06a	0.21a	124.74a	4.79a	0.10a	303.51b	390.39a	0.70a	199.39a

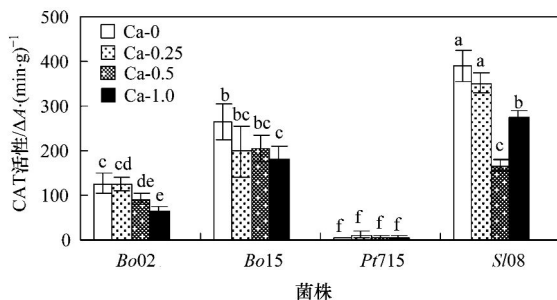
1) 表中 CAT、POD 活性单位为 $\Delta A \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1}$; SOD 活性单位为 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$

$\Delta A \cdot (\text{min} \cdot \text{g})^{-1}$]. SOD 活性由高到低依次为: *Bo* 02 ($834.81 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Pt* 715 ($335.81 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Sl* 08 ($195.67 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$) > *Bo* 15 ($101.51 \text{ U} \cdot \text{g}^{-1}$).

2.3 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌酶活性的影响

2.3.1 CAT

由图 1 可见, 铝胁迫下, 加入 $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca^{2+} 后, 4 个菌株 CAT 活性与对照无显著差异. 当 Ca^{2+} 为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Bo* 02 和 *Sl* 08 CAT 活性显著低于对照, 分别比对照降低了 27.4% 和 57.4%; *Bo* 15 和 *Pt* 715 CAT 活性仍与对照无显著差异. 当 Ca^{2+} 达 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Bo* 02、*Bo* 15 和 *Sl* 08 CAT 活性均显著低于对照, 分别比对照降低了 47.9%、33.2% 和 29.5%; *Pt* 715 CAT 活性仍无显著变化.



图中不同小写字母表示差异显著 ($P=0.05$), 下同

图 1 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌过氧化氢酶活性的影响

Fig. 1 Effect of calcium on the activities of CAT of ectomycorrhizal fungi under aluminum stress

2.3.2 POD

由图 2 可见, 铝胁迫下, 随着外源 Ca^{2+} 浓度的增加, *Bo* 02 POD 活性递减, 酶活比对照显著降低了 53.4% ~ 69.9%. *Bo* 15、*Pt* 715 和 *Sl* 08 在 Ca^{2+} 浓度为 $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的处理液中时, POD 活性与对照无显著差异. 当 Ca^{2+} 浓度达 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 3 个菌株酶活显著下降, 分别比对照降低了 44.8% (*Bo* 15)、46.4% (*Sl* 08) 和 32.4% (*Pt* 715).

2.3.3 SOD

由图 3 可见, 铝胁迫下, 加入 $0.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 外源 Ca^{2+} 后, *Bo* 02 和 *Pt* 715 SOD 活性显著下降, 分别比对照降低了 17.3% 和 42.2%; *Bo* 15 和 *Sl* 08 活

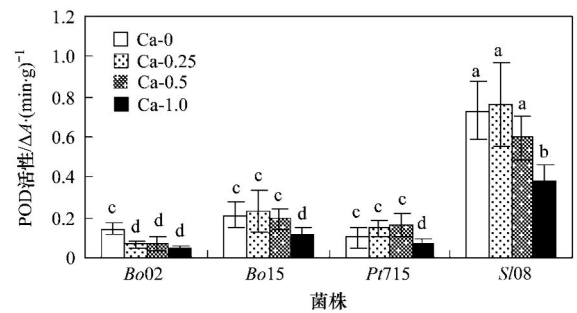


图 2 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌过氧化物酶活性的影响

Fig. 2 Effect of calcium on the activities of POD of ectomycorrhizal fungi under aluminum stress

性无显著变化. 当 Ca^{2+} 浓度为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Bo* 02 和 *Sl* 08 活性显著下降, 分别比对照降低了 37.0% 和 48.8%; *Bo* 15 和 *Pt* 715 活性无显著变化. 当 Ca^{2+} 浓度为 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Bo* 02、*Pt* 715 和 *Sl* 08 SOD 活性显著下降, 分别比对照降低了 34.5%、40.3% 和 39.5%; *Bo* 15 活性无显著变化.

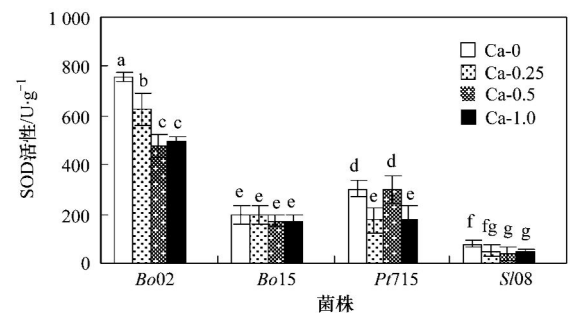


图 3 铝胁迫下外源钙对外生菌根真菌超氧化物歧化酶活性的影响

Fig. 3 Effect of calcium on the activities of SOD of ectomycorrhizal fungi under aluminum stress

3 讨论

在酸性森林土壤中, 外生菌根可显著提高树木的抗铝性受到众多学者的关注^[16, 17]. 但是, 不同菌种拮抗铝毒的能力不同. $0.03 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的铝能显著抑制 *Lactarius rufus* 和 *Lactarius hepaticus* 的生长, 而对双色腊蘑的影响不大^[18]. 本研究中, 当 Al^{3+} 浓度达到 $1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, *Bo* 02、*Bo* 15 的生物量显著减少, 但 *Pt* 715 和 *Sl* 08 的生物量无显著变化, 即

后两个菌株的抗铝性明显强于前两个菌株,说明在生产实践中,筛选高抗铝菌株用于酸化土壤植树造林具有可行性及现实意义。

CAT、POD 和 SOD 是生物体内活性氧清除系统中的关键酶。在非致死的逆境条件下,CAT、POD 和 SOD 活性会迅速升高,从而有效清除过多的氧自由基^[12],对增强膜质抗氧化保护能力有重要作用。铝胁迫可以诱导植物体内产生大量的活性氧,并导致相关代谢酶活性的改变^[19]。本研究表明,1.0 mmol·L⁻¹ Al³⁺ 胁迫可显著提高外生菌根真菌 *Bo* 02 CAT 和 SOD 活性、*Bo* 15 SOD 活性、*Sl* 08 CAT 和 POD 活性,说明外生菌根真菌中这几种酶活性的提高与铝毒胁迫密切相关。在 4 个供试菌株中,2 个抗铝菌株 *Pt* 715 和 *Sl* 08 的酶活反应不同。在铝胁迫下,*Sl* 08 CAT 和 POD 活性最高,可能与消除过多氧自由基的能力较强有关。而 *Pt* 715 CAT 和 POD 活性最低,且加铝后无显著变化,可能是 *Pt* 715 抗性较强,1.0 mmol·L⁻¹ 的铝浓度未对其造成影响,推测其抗铝性强于 *Sl* 08 或其抗铝机制不同于 *Sl* 08。2 个铝敏感菌株 *Bo* 02 和 *Bo* 15 的酶活反应也不同。*Bo* 02 SOD 活性最高,铝胁迫下 CAT 和 SOD 活性显著增加,其中 CAT 活性比对照增加了 405.3%。而 *Bo* 15 在铝胁迫下只有 SOD 活性显著增加,可能与其抗铝能力不强或抗铝机制不同于 *Bo* 02 有关。

钙作为植物的必需营养元素,对于维持细胞壁、细胞膜的稳定性和阴阳离子的平衡具有重要作用;同时,Ca²⁺ 作为第二信使感受、传递和响应环境信号的变化,可能直接调控部分抗氧化酶的活力^[20]。土壤中过量铝的累积可减少植物对钙的吸收^[21]。许多研究证明,增加 Ca²⁺ 浓度可消除或缓解 Al³⁺ 毒性^[22~24]。本研究表明,铝胁迫下加入 0.25 mmol·L⁻¹ Ca²⁺ 时,外生菌根真菌 *Bo* 02 的 POD、SOD 活性就显著低于对照,当 Ca²⁺ 浓度 ≥ 0.5 mmol·L⁻¹ 时,*Bo* 02 的 3 种酶活均显著低于对照,对钙表现出较强的应答,说明 4 个菌株中钙对 *Bo* 02 铝胁迫的缓解作用最好。当 Ca²⁺ 为 0.5 mmol·L⁻¹ 时,*Sl* 08 CAT 和 SOD 活性显著低于对照;Ca²⁺ 为 1.0 mmol·L⁻¹ 时,*Sl* 08 POD 和 SOD 活性显著低于对照,说明较高浓度的钙(≥0.5 mmol·L⁻¹)可缓解或消除 *Sl* 08 铝胁迫造成的抗氧化酶活性上升。铝的原初毒害作用位于细胞原生质膜,它与 Ca²⁺ 竞争结合位点,抑制 Ca²⁺ 通道的功能,导致 Ca²⁺ 吸收量下降,从而影响细胞的结构和功能^[25]。推测外生菌根真菌增加钙供应后,Ca²⁺ 对 Al³⁺ 在膜上的竞争作

用增强,减轻了 Al³⁺ 对细胞原生质膜的毒害,从而缓解了铝胁迫。铝胁迫下 SOD 活性显著增加的 *Bo* 15 加入外源钙后 SOD 活性无显著变化,推测外源钙对 *Bo* 15 铝胁迫无缓解作用或者其缓解铝毒机制不同,具体机制还有待进一步研究。

4 结论

(1) 不同菌种的抗铝性不同,*Pt* 715 和 *Sl* 08 的抗铝性强于 *Bo* 02 和 *Bo* 15。

(2) 1.0 mmol·L⁻¹ Al³⁺ 胁迫可显著提高外生菌根真菌 *Bo* 02 CAT 和 SOD 活性、*Bo* 15 SOD 活性、*Sl* 08 CAT 和 POD 活性,说明外生菌根真菌中这几种酶活性的提高与铝毒胁迫密切相关。

(3) 4 个菌株中,外源钙对 *Bo* 02 铝胁迫的缓解作用最好。较高浓度的钙(≥0.5 mmol·L⁻¹)可缓解或消除 *Sl* 08 铝胁迫造成的抗氧化酶活性上升。

参考文献:

- [1] Delhaize E, Ryan P R. Aluminum toxicity and tolerance in plants [J]. *Plant Physiology*, 1995, **107**(2): 315-321.
- [2] Clarkson D T, Sanderson J. Inhibition of the uptake and long-distance transport of calcium by aluminium and other polyvalent cations [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1971, **22**(4): 837-851.
- [3] Siegel N, Haug A. Aluminum interaction with calmodulin: evidence for altered structure and function from optical and enzymatic studies [J]. *Plant Physiology*, 1983, **744**(1): 36-45.
- [4] 孔繁翔, 桑伟莲, 蒋新, 等. 铝对植物毒害及植物抗铝作用机理 [J]. *生态学报*, 2000, **20**(5): 855-862.
- [5] Yi M, Yi H L, Li H H, et al. Aluminum induces chromosome aberrations, micronuclei, and cell cycle dysfunction in root cells of *Vicia faba* [J]. *Environmental Toxicology*, 2010, **25**(2): 124-129.
- [6] Liang Y C, Sun W C, Zhu Y G, et al. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of abiotic stresses in higher plants: a review [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(2): 422-428.
- [7] 蒋廷惠, 占新华, 徐阳春, 等. 钙对植物抗逆能力的影响及其生态学意义 [J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(5): 971-976.
- [8] 罗虹, 刘鹏, 李淑. 硅、钙对水土保持植物荞麦铝毒的缓解效应 [J]. *水土保持学报*, 2005, **19**(3): 101-104.
- [9] 王伟, 杨野, 郭再华, 等. 铝胁迫对不同耐铝小麦品种根生理结构及活性氧代谢酶的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2010, **29**(6): 715-720.
- [10] 石贵玉. 铝对水稻幼苗生长和生理的影响 [J]. *广西植物*, 2004, **24**(1): 77-80.
- [11] 刘鹏, 徐根娣, 姜雪梅, 等. 铝对大豆幼苗膜脂过氧化和体内保护系统的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2004, **23**(1): 51-54.
- [12] 李其星, 唐新莲, 沈方科, 等. 铝胁迫下外源 Ca²⁺ 对黑麦幼

- 根膜脂过氧化及保护酶活性的影响[J]. 广西农业科学, 2006, **37**(3): 249-252.
- [13] Schier G A, McQuattie C J. Effect of aluminum on the growth, anatomy, and nutrient content of ectomycorrhizal and nonmycorrhizal eastern white pine seedlings [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1995, **25**(8): 1252-1262.
- [14] Khosla B, Kaur H, Reddy M S. Influence of ectomycorrhizal colonization on the growth and mineral nutrition of *Populus deltoides* under Aluminum toxicity [J]. Journal of Plant Interactions, 2009, **4**(2): 93-99.
- [15] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002. 119-122.
- [16] Heim A, Brunner I, Frossard E, *et al.* Aluminum effects on *Picea abies* at low solution concentrations [J]. Soil Science Society of America Journal, 2003, **67**(3): 895-898.
- [17] Martino E, Perotto S. Mineral transformations by mycorrhizal fungi[J]. Geomicrobiology Journal, 2010, **27**(6-7): 609-623.
- [18] Jongbloed R H, Borst-Pauwels G W F H. Effects of aluminium and pH on growth and potassium uptake by three ectomycorrhizal fungi in liquid culture[J]. Plant and Soil, 1992, **140**(2): 157-165.
- [19] Achary V M M, Jena S, Panda K K, *et al.* Aluminium induced oxidative stress and DNA damage in root cells of *Allium cepa* L [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **70**(2): 300-310.
- [20] 陈文荣, 刘鹏, 徐根娣, 等. 施钙处理对大豆铝毒缓解作用的研究[J]. 浙江师范大学学报(自然科学版), 2008, **31**(2): 201-207.
- [21] Yan J, Chen J B, Zhang T T, *et al.* Evaluation of aluminum tolerance and nutrient uptake of 50 centipedegrass accessions and cultivars[J]. Hortscience, 2009, **44**(3): 857-861.
- [22] 蔡妙珍, 刘鹏, 徐根娣, 等. 钙、硅对铝胁迫下莽麦光合生理的影响[J]. 水土保持学报, 2008, **22**(2): 206-208.
- [23] Hossain M A, Ismail M R, Ashrafuzzaman M, *et al.* Reduction of Al-induced oxidative damage in wheat[J]. Australian Journal of Crop Science, 2011, **5**(10): 1157-1162.
- [24] Vangelova E I, Hirano Y, Eldhuset T D, *et al.* Tree fine root Ca/Al molar ratio-Indicator of Al and acidity stress[J]. Plant Biosystems, 2007, **141**(3): 460-480.
- [25] Rengel Z, Zhang W H. Role of dynamics of intracellular calcium in aluminium-toxicity syndrome[J]. New Phytologist, 2003, **159**(2): 295-314.

CONTENTS

Nutrient Dynamics over the Past 100 Years and Its Restoration Baseline in Dianshan Lake	LI Xiao-ping, CHEN Xiao-hua, DONG Xu-hui, <i>et al.</i> (3301)
Possibility of Total Dissolved Solid as one of Nutrient Baselines in Inner Mongolia-Xinjiang Plateau	XI Bei-dou, ZHANG Ya-li, XU Qiu-jin (3308)
Fluorescence Discrimination Technique for Phytoplankton Based on the Wavelet Analysis	ZHANG Cui, SU Rong-guo, SONG Zhi-jie, <i>et al.</i> (3314)
Analysis of Algae Bloom and Lake Surface Bright Temperature in Chaohu Lake Based on Remote Sensing Data	ZHANG Hong, HUANG Yong, LI Kun (3323)
Case Study on Groundwater Health Risk Assessment and Remediation Strategy Based on Exposure Pathway	JIANG Lin, ZHONG Mao-sheng, JIA Xiao-yang, <i>et al.</i> (3329)
Pollution Assessment in the Intertidal Zone of Beibu Gulf Using Multi-biomarker Pollution Index	DU Xiu-ping, MENG Fan-ping, WANG Zhi-feng, <i>et al.</i> (3336)
Estimation of the Flux of Inorganic Nitrogen Flowing into the East China Sea	WU Jia-lin, FANG Qian, SHI Xiao-yong, <i>et al.</i> (3344)
Effects of Ocean Acidification on Growth, Phosphate and Nitrate Uptake of Macroalgae	YU Juan, ZHANG Yu, YANG Gui-peng, <i>et al.</i> (3352)
Forms and Distributions of Particulate Phosphorus in the Surface Sediments of North Yellow Sea	MENG Jia, YAO Qing-zhen, CHEN Hong-tao, <i>et al.</i> (3361)
Influence of Dredging on Sediment Resuspension and Phosphorus Transfer in Lake; A Simulation Study	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, ZHANG Yin-long, <i>et al.</i> (3368)
Transportation and Sources of the Suspended Particle in a Karst Spring During a Storm Event	YANG Ping-heng, LIU Zi-qi, HE Qiu-fang (3376)
Comparison of Trophic Status Analysis of the Daning River Within the Three Gorges Reservoir Before and After Experimental Impoundment	ZHANG Jia-lei, ZHENG Bing-hui, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (3382)
Nitrogen and Phosphorus Loss in Different Land Use Types and Its Response to Environmental Factors in the Three Gorges Reservoir Area	ZENG Li-xiong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3390)
Research on Stormwater Runoff Quality of Mountain City by Source Area Monitoring	LI Li-qing, SHAN Bao-qing, ZHAO Jian-wei, <i>et al.</i> (3397)
Occurrence Form and Ecological Effect of Selenium in Soil and Surface Water of Kailuan Coalfield of Tangshan	ZHANG Xiu-zhi, MA Zhong-she, WANG Yin-nan, <i>et al.</i> (3404)
Distribution of Arsenic in Surface Water in Tibet	WANG Ming-guo, LI She-hong, WANG Hui, <i>et al.</i> (3411)
Spatial and Temporal Distribution of Trace Elements in Surface Water in the Xilin River Basin	XUE Li-yang, WU Jin-kui, ZHANG Ming-quan, <i>et al.</i> (3417)
Concentration Characteristics and Ecological Risk of Persistent Organic Pollutants in the Surface Sediments of Tianjin Coastal Area	LU Xiao-xia, ZHANG Shu, CHEN Chao-qi, <i>et al.</i> (3426)
Distribution, Sources and Ecological Risk Assessment of Polychlorinated Biphenyl in Sediments from Songhua River Basin	NIE Hai-feng, ZHAO Chuan-dong, LIU Ying-han, <i>et al.</i> (3434)
Distributions of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of the Yangtze Estuary	LI Tao, HOU Li-jun, LIU Min, <i>et al.</i> (3443)
Geochemical Characteristics of Nitrogen in Core Sediments from Sishili Bay, China	YANG Yu-wei, GAO Xue-lu, LI Pei-miao (3449)
Composition of <i>n</i> -Alkanes in Soils of the Yellow River Estuary Wetlands and Their Potential as Organic Matter Source Indicators	YAO Peng, YIN Hong-zhen, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (3457)
Study on the Degradation and Transformation of Nonylphenol in Water Containing Algae	PENG Zhang-e, FENG Jin-mei, HE Shu-ying, <i>et al.</i> (3466)
Degradation of Orange IV Dye Solution Catalyzed by $\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ Modified GAC in the Presence of H_2O_2	ZHANG Ying-jie, XU Shu-fen, LIAO Xia, <i>et al.</i> (3473)
Synthesis, Characterization and Electrocatalytic Performance of Pd/CMK-3 for Formic Acid Oxidation	HUAN Zhong-ke, ZONG En-min, WEI Dan, <i>et al.</i> (3479)
Research of Controlling Condition for Aeration Stabilization Pond Dealing with Sanitary Waste of Countryside	LI Huai-zheng, YAO Shu-jun, XU Zu-xin, <i>et al.</i> (3484)
Pilot-Scale Study on Treatment of Municipal Sewage by Moving-Bed Biofilm Reactor with the Hydrophobically Modified Polyurethane Cubes as Biofilm Carriers	WANG Yu-xiao, KONG Xiu-qin, FENG Quan, <i>et al.</i> (3489)
Variation Characteristics of Relative Molecular Mass of Different Fractions of Dissolved Organic Matter from Landfill Leachate During Photocatalytic Degradation	JIA Chen-zhong, WANG Yan-xin, ZHANG Cai-xiang (3495)
Mechanism of Nitrogen Removal by Partial Nitrification-Denitrification Biological Filter	SUN Ying-xue, XU Dong, TIAN Yuan, <i>et al.</i> (3501)
Performance Stability of CANON Reactor and Temperature Impact	FU Kun-ming, ZHANG Jie, CAO Xiang-sheng, <i>et al.</i> (3507)
Denitrifying Phosphorus Removal in a Modified University of Cape Town (MUCT) Process Treating Domestic Wastewater Under Nitrification and Nitritation	ZENG Wei, WANG Xiang-dong, ZHANG Li-dong, <i>et al.</i> (3513)
Study on the Stratification Components of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Activated Sludge and Their Variation Characteristics in Physicochemical Properties	YUAN Dong-qin, WANG Yi-li (3522)
Influence of Organic Loading Rate on the Start-up of a Sequencing Airlift Aerobic Granular Reactor	LIU Meng-yuan, ZHOU Dan-dan, GAO Lin-lin, <i>et al.</i> (3529)
Degradation Kinetics of Naphthalene by Anaerobic Sludge and Analysis of the Bacterial Biodiversity	CAO Xin-kai, YANG Qi, HAO Chun-bo (3535)
Sorption of 17β -estradiol to Soils and Sediment and Influence of Pig Manure DOM	ZHANG Feng-song, LI Yan-xia, HUANG Ze-chun, <i>et al.</i> (3542)
Sorption Isotherms and Sorption Thermodynamics of Faecal Sterols on Offshore Sediment	ZHANG Xiao-lei, XUE Wen-ping, XU Heng-zhen, <i>et al.</i> (3547)
Research on the Characteristic of Toluene Migration and Distribution in Fluvio-Aquic Soil and Its Simulation Using STOMP Model	HAN Chun-mei, RAN Juan, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (3554)
Predicting the Cadmium Bioavailability in the Soil of Sugarcane Field Based on the Diffusive Gradients in Thin Films with Binding Phase of Sodium Polycrylate	WANG Fang-li, SONG Ning-ning, ZHAO Yu-jie, <i>et al.</i> (3562)
<i>In Situ</i> Immobilization of Pb and Cd in Orchard Soil Using Soil Ameliorants	TANG Min, ZHANG Jin-zhong, ZHANG Dan, <i>et al.</i> (3569)
Health Assessment of Heavy Metals in Roadside Soils at Different Operation Time; A Case Study of Zhengzhou-Shangqiu Section Along the Lianyungang-Horgas Highway	GU Lei, TONG Zhi-qi, SONG Bo, <i>et al.</i> (3577)
Amelioration Effects of Wastewater Sludge Biochars on Red Soil Acidity and Their Environmental Risk	LU Zai-liang, LI Jiu-yu, JIANG Jun, <i>et al.</i> (3585)
Effect of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons on the Vertical Distribution of Denitrifying Genes in River Sediments	WU Yan-yang, WU Qun-he, HUANG Shan, <i>et al.</i> (3592)
Role of Layered Double Hydroxide (LDH) in the Protection of Herring Testis DNA from Heavy Metals	TANG Yi-ni, WU Ping-xiao, ZHU Neng-wu (3598)
Mineralogical Characteristics of Biogenic Schwertmannite Amended with Different Pretreatment Methods and the Effects on As(III) Absorption	LIANG Jian-ru, LI Zhe-ying, LIU Fen-wu, <i>et al.</i> (3606)
Mechanism of Heavy-Metal Tolerance in <i>Pseudomonas aeruginosa</i> ZGKD2	ZHANG Yu-xin, WANG Jiao, CHAI Tuan-yao, <i>et al.</i> (3613)
Isolation, Degradation Characteristics of a 1,2-Dichloroethane-Degrading Strain	WANG Xiao-chun, CHEN Dong-zhi, JIN Xiao-jun, <i>et al.</i> (3620)
Isolation and Degradation Characteristics of PCB-degrading Strain	SHI Shun-yan, FENG Liu, GONG Ji (3627)
Preliminary Study on the Changes of Bacterial Community Structure in Qingcaosha Reservoir During Water Storage Period	PENG Qing, XIE Bing, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3634)
N_2O Exchange Fluxes from Wheat-Maize Crop Rotation System in the North China Plain	PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, <i>et al.</i> (3641)
Analysis of the Impact of Two Typical Air Pollution Events on the Air Quality of Nanjing	WANG Fei, ZHU Bin, KANG Han-qing, <i>et al.</i> (3647)
Pollution Characteristics of VOCs in Ambient Air of Ji'nan City in Summer	LIU Ze-chang, ZHANG Fan, HOU Lu-jian, <i>et al.</i> (3656)
Effects and Mechanism of Catalytic Decomposition of Ozone by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhi-ye, ZHANG Zhong-ming, <i>et al.</i> (3662)
Effect of Elevated O_3 on the Arbuscular Mycorrhizal (AM) Structure and Glomalin Production in Two Genotypes of Snap Bean	WANG Peng-teng, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang (3667)
Effect of Exogenous Calcium on the Activities of Antioxidative Protective Enzymes in Ectomycorrhizal Fungi Under Aluminum Stress	WANG Ming-xia, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3675)
Mercury Pollution in Cricket in Different Biotopes Suffering from Pollution by Zinc Smelting	ZHENG Dong-mei, LI Xin-xin, LUO Qing (3680)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2012年10月15日 33卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 10 Oct. 15, 2012

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencecp. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 70.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行