

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第10期

Vol.35 No.10

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于虚拟撞击原理的固定源 PM ₁₀ /PM _{2.5} 采样器的研制	蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 张强, 李振, 陈小彤, 李兴华, 郝吉明 (3639)
1992~2012 年福州市和厦门市酸雨变化特征及影响因素	郑秋萍, 王宏, 陈彬彬, 隋平, 林文 (3644)
青岛近海不同天气状况下大气气溶胶中金属元素浓度分布特征研究	陈晓静, 祁建华, 刘宁, 张翔宇, 申恒青, 刘明旭 (3651)
化学合成类制药行业工艺废气 VOCs 排放特征与危害评估分析	李嫣, 王浙明, 宋爽, 徐志荣, 许明珠, 徐威力 (3663)
烧结过程 NO _x 和 SO ₂ 形成规律及烧结料组成对 NO _x 排放的影响	任重培, 朱天乐, 朱廷钰, 吕栋 (3669)
废茶活性炭脱硫脱硝性能的应用研究	宋磊, 张彬, 邓文 (3674)
黑河中游边缘荒漠-绿洲非饱和带土壤质地对土壤氮积累与地下水氮污染的影响	苏永中, 杨晓, 杨荣 (3683)
海河流域河流生态系统健康评价	郝利霞, 孙然好, 陈利顶 (3692)
台州长潭水库铁锰质量浓度变化特征及其成因分析	刘树元, 郑晨, 袁琪, 王先兵, 王稀炎 (3702)
山地城市新建湖库氮磷营养盐时空特征研究	包静玥, 鲍建国, 李立青 (3709)
岩溶地下水水文地球化学对降雨的响应: 以重庆雪玉洞地下河系统为例	王凤康, 梁作兵, 于正良, 江泽丽 (3716)
岩溶地下河流域水中多环芳烃污染特征及生态风险评价	蓝家程, 孙玉川, 田萍, 卢丙清, 师阳, 徐昕, 梁作兵, 杨平恒 (3722)
废旧电器拆解区河流沉积物中多溴联苯醚 (PBDEs) 的污染特征与生态风险	陈宣宇, 薛南冬, 张石磊, 李发生, 龚道新, 刘博, 孟磊 (3731)
海河流域中南部河流沉积物的重金属生态风险评价	王瑞霖, 程先, 孙然好 (3740)
大辽河口 COD 与 DO 的分布特征及其影响因素	杨福霞, 简慧敏, 田琳, 姚庆祯 (3748)
辽河下游 CDOM 吸收与荧光特性的季节变化研究	邵田田, 赵莹, 宋开山, 杜嘉, 丁智 (3755)
伊乐藻和氮循环菌技术对太湖氮素吸收和反硝化的影响	刘丹丹, 李正魁, 叶忠香, 张万广 (3764)
地表水体放线菌分离鉴定与致嗅能力研究	陈娇, 白晓慧, 卢宁, 王先云, 章永辉, 吴潘成, 郭心驰 (3769)
地下水循环井技术修复硝基苯污染含水层效果模拟	白静, 赵勇胜, 孙超, 秦传玉, 于凌 (3775)
茶叶基水合氧化铁吸附水体中 Pb(II) 的性能	万顺利, 薛瑶, 马钊钊, 刘国斌, 余艳霞, 马明海 (3782)
紫外辐射对小分子有机酸化学凝聚性作用途径探讨	王文东, 王亚博, 范庆海, 丁真真, 王文, 宋珊, 张银婷 (3789)
水中普萘洛尔的紫外光降解机制及其产物毒性	彭娜, 王开峰, 刘国光, 曾令泽, 姚锐, 吕文英 (3794)
二氧化钛 (P25) 光催化降解二苯甲酸的研究	王阿楠, 滕应, 骆永明 (3800)
碳氮比对聚氨酯生物膜反应器短程硝化反硝化的影响	谭冲, 刘颖杰, 王薇, 邱珊, 马放 (3807)
城市污泥中温厌氧消化过程中厌氧耐药菌的分布与去除研究	佟娟, 王元月, 魏源送 (3814)
快速城市化区域表层土壤中杀虫剂的空间分布及风险评估	韦燕莉, 鲍志君, 巫承洲, 曾永平 (3821)
重庆铁山坪马尾松林土壤汞排放特征的现场测试	杜宝玉, 王琼, 罗遥, 段雷 (3830)
应用 X 射线吸收近边结构谱研究东北农耕地土壤中的氯种态及含量	李晶, 郎春燕, 马玲玲, 徐殿斗, 郑雷, 路雨楠, 崔丽瑞, 张晓萌 (3836)
植被重建下煤矿排土场土壤熟化过程中碳储量变化	李俊超, 党廷辉, 郭胜利, 薛江, 唐骏 (3842)
硫素对氧化还原条件下水稻土氧化铁和砷形态影响	唐冰培, 杨世杰, 王代长, 饶伟, 张亚楠, 王丹, 朱云集 (3851)
外生菌根真菌对 Al ³⁺ 胁迫和低钾土壤的响应	张薇, 黄建国, 袁玲, 李阳波, 何林卫 (3862)
长期施用猪粪水稻土抗生素抗性基因污染研究	黄福义, 李虎, 韦蓓, 欧阳伟堂, 苏建强 (3869)
外源添加磷和有机酸模拟铅污染土壤钝化效果及产物的稳定性研究	左继超, 高婷婷, 苏小娟, 万田英, 胡红青 (3874)
污染场地六价铬的还原和微生物稳定化研究	郑家传, 张建荣, 刘希雯, 许倩, 施维林 (3882)
热强化气相抽提对不同质地土壤中苯去除的影响	李鹏, 廖晓勇, 阎秀兰, 崔晓勇, 马栋 (3888)
O ₃ 浓度升高对南方城市绿化树种氮素的影响	杨田田, 张巍巍, 胡恩柱, 王效科, 田媛, 冯兆忠 (3896)
施氮强度对不同土壤有机碳水平桉树林温室气体通量的影响	李睿达, 张凯, 苏丹, 逯非, 万五星, 王效科, 郑华 (3903)
¹³ C ₂ O ₂ 示踪臭氧胁迫对水稻土壤微生物的影响	陈展, 王效科, 尚鹤 (3911)
表面活性剂 <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 体系对低氯代 PCBs 的好氧强化降解	陈少毅, 张静, 汪涵, 任源 (3918)
耐高氨氮异养硝化-好氧反硝化菌 TN-14 的鉴定及其脱氮性能	信欣, 姚力, 鲁磊, 冷璐, 周迎芹, 郭俊元 (3926)
微氧环境中电化学活性微生物的分离与鉴定	吴松, 肖勇, 郑志勇, 郑越, 杨朝晖, 赵峰 (3933)
电极活性菌分离过程中微生物群落结构动态特征解析	王敏, 赵阳国, 卢珊珊 (3940)
铜对草鱼及花鲢的毒性预测: 基于生物配体模型	王万宾, 陈莎, 吴敏, 赵婧 (3947)
天鹅洲故道底栖动物群落特征及水质生物学评价	马秀娟, 沈建忠, 王腾, 王海生, 黄丹, 孙广文, 龚成 (3952)
水生生物基准推导中物种选择方法研究	张铃松, 王业耀, 孟凡生, 周岳溪, 于海斌 (3959)
生产源区人血清中六溴环十二烷水平与甲状腺激素相关性研究	李鹏, 杨从巧, 金军, 王英, 刘伟志, 丁问微 (3970)
金属氧化物-Laponite 黏土复合材料负载氧化钴催化剂的制备及对苯的催化消除性能	牟真, 麻春艳, 程杰, 李进军 (3977)
CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃ 催化剂对苯催化氧化性能研究	查键, 周宏仓, 何都良, 单龙, 张露, 谢婕 (3984)
生物毒性检测在水质安全评价中的应用	徐建英, 赵春桃, 魏东斌 (3991)
某城市城镇污水处理厂 COD 排放现状评价分析	周羽化, 卢延娜, 张虞, 朱静, 雷晶, 申晨, 武雪芳 (3998)
北京市再生水利用生态环境效益评估	范育鹏, 陈卫平 (4003)
我国持久性有机污染物污染事故预警指标体系构建	王琳, 吕永龙, 贺桂珍, 王铁宇 (4009)
环境损害评估: 构建中国制度框架	张红振, 王金南, 牛坤玉, 董璟琦, 曹东, 张天柱, 骆永明 (4015)
《环境科学》征稿简则 (3887) 《环境科学》征订启事 (4008) 信息 (3730, 3739, 3774, 3895)	

外生菌根真菌对 Al^{3+} 胁迫和低钾土壤的响应

张薇, 黄建国, 袁玲*, 李阳波, 何林卫

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 酸铝危害和土壤贫瘠是热带和亚热带森林衰亡的主要原因之一, 外生菌根真菌抗铝毒和活化土壤养分有益于防止森林退化和提高森林生产力. 试验在 Al^{3+} 胁迫条件下, 以彩色豆马勃 (*Pisolithus tinctorius*, Pt 715)、褐环乳牛肝菌 (*Suillus luteus* (L.: Fr.) Gray, Sl 13) 和亚褐环乳牛肝菌 (*Suillus subluteus* (Peck) Snell ex Slipp & Snell, Ss 00) 等 3 株外生菌根真菌为材料, 土壤为钾源, 采用培养试验研究了它们的生长、有机酸和 H^+ 分泌, 以及对土壤钾的利用. 结果表明, 在 Al^{3+} 胁迫和缺钾下, 3 株外生菌根真菌的生长、氮、磷、钾吸收, 以及有机酸和 H^+ 分泌均受 Al^{3+} 浓度的调节. 在 Al^{3+} 浓度较低时, 它们随浓度的增加而提高, 到达峰值后又随 Al^{3+} 浓度升高而降低. 抗 Al^{3+} 性较强的菌株出现峰值时的 Al^{3+} 浓度高, 反之亦然. Pt 715 的生物量和氮吸收量达到峰值时的 Al^{3+} 浓度分别是 Ss 00 和 Sl 13 菌株的 4 倍和 2 倍, 磷钾吸收和有机酸及 H^+ 分泌量也显著高于 Ss 00 和 Sl 13. 此外, 3 株菌株均能利用土壤矿物结构钾, Pt 715、Ss 00 和 Sl 13 对矿物结构钾的分解率分别高达 2.10%、1.43% 和 1.17%, 其利用能力与有机酸分泌的种类、数量和 H^+ 分泌量有关.

关键词: Al^{3+} 胁迫; 外生菌根真菌; 酸性土壤; 矿物结构钾; 有机酸

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)10-3862-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.10.031

Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil

ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, LI Yang-bo, HE Lin-wei

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

Abstract: Soil acidification, aluminum (Al^{3+}) toxicity and nutrient deficiency could be some of the most important reasons for the decline and death of forests in tropical and subtropical areas. Ectomycorrhizal fungi for Al^{3+} resistance and nutrient mobilization are beneficial for preventing forests against Al^{3+} toxicity and increasing forest productivity. Therefore, *Suillus luteus* (Sl 13), *Pisolithus tinctorius* (Pt 715) and *Suillus subluteus* (Ss 00) were grown in liquid culture medium with soil as the sole K source under Al^{3+} stress to study the fungal growth, organic acid and proton efflux, and potassium (K) unitization. The result indicated that the fungal growth, organic acid and proton efflux, and nutrient uptake, including nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K), were regulated by Al^{3+} concentration in culture solutions. They increased with increasing Al^{3+} at low concentration and after reaching a peak, they started to decrease. Fungal strain with high resistance to Al^{3+} also showed higher Al^{3+} concentration at the peak than those with low ability. Al^{3+} concentration at the peak of fungal biomass and N uptake by Pt 715 was four folds or twice of Ss 00 and Sl 13, respectively. The uptake of P and K and efflux of organic acids and protons by Pt 715 were also higher than Ss 00 and Sl 13. All three fungal strains could utilize structural K in soil minerals and the utilization rate reached 2.10% for Pt 715, 1.43% for Ss 00 and 1.17% for Sl 13, respectively, which could be related to the types and amount of organic acids and protons.

Key words: Al^{3+} stress; ectomycorrhizal fungi; acid soil; mineral structure K; organic acids

铝是土壤中含有最多的金属元素, 在酸性条件下, Al^{3+} 被大量溶出, 对植物产生毒害^[1]. 我国酸性土壤遍及 14 个省区, 总面积达 203 万 km^2 , 约占全国耕地面积的 21%^[2]. 在酸性土壤上, 由于风化和淋溶强烈, 钾、钙和镁等盐基性养分含量低, 贫瘠和铝毒成为限制作物生长的两个主要障碍因素^[3]. 在我国南方, 森林主要分布在山高坡陡、土层瘠薄的酸性或强酸性土壤上, 脆弱的生态条件带来森林系统的不稳定性, 酸雨加重了土壤酸化和养分流失^[4,5], 造成南方多处林地成片凋亡^[6~9].

钾是树木需求最多的必需营养元素. 在酸性土壤上, 因有效钾含量低成为限制树木生长的重要因素^[10]. 土壤中非膨胀性 2:1 黏粒矿物的层间钾 (又

称缓效钾) 一般难于被植物吸收; 矿物结构钾也只有通过风化作用才能释放. 森林难于施肥, 故活化利用土壤矿物结构钾和层间钾是提高树木钾素营养的主要途径^[11,12].

外生菌根真菌 (ECMF) 是森林生态系统中的重要成员之一, 它们能与 6 000 多种树木形成菌根, 庞大的外延菌丝和菌根在改善树木营养和增强树木抗性等方面有着不可替代的作用^[13]. 研究发现, *P. involutus* 能导致金云母的结构发生不可逆的变

收稿日期: 2014-03-19; 修订日期: 2014-05-09

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41171215)

作者简介: 张薇 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与环境, E-mail: sczw90@126.com

* 通讯联系人, E-mail: lingyuanh@aliyun.com

化^[14]. 在培养基中以蛭石、黑云母和钾长石为钾源,发现 ECMF 能利用非膨胀性 2:1 型矿物的层间钾和晶格钾^[15,16]. ECMF 通过分泌有机酸络合 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Al^{3+} 等离子,加速矿物风化. 菌丝极其细小,可以进入土壤矿物或岩石的孔隙,并在矿物或岩石表面形成菌丝垫,局部提高 H^+ 和有机酸的浓度^[17], H^+ 可以进入 2:1 型非膨胀性黏粒矿物的晶层,取代钾离子^[18]. 在铝胁迫下,松乳菇、褐环乳牛肝菌、厚环乳牛肝菌和土生空团菌的生物量下降,相应的草酸分泌量和氮磷钾吸收量也受到影响^[14,19]. 但是,在高 Al^{3+} 和低 K^+ 的环境中,ECMF 对土壤无效钾的活化利用有何差异,以及高 Al^{3+} 低 K^+ 双重胁迫对 ECMF 自身的影响及相关机制未见报道.

我国南方强酸性土壤铝毒严重,酸雨加速土壤酸化,影响森林生产力. 因此,本研究以西南地区主要森林土壤-有效钾含量极低的酸性黄壤为供试土壤,在 Al^{3+} 胁迫下,探索 ECMF 活化利用土壤难溶性钾的机制,以期为防止森林衰亡和提高森林生产力提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料及预处理

选用 3 株 ECMF 为供试菌株,它们分别是褐环乳牛肝菌 [*Suillus luteus* (L.:Fr.) Gray, Sl 13, 采于重庆金佛山马尾松林下的酸性土壤]、彩色豆马勃 (*Pisolithus tinctorius*, Pt 715, 采于四川西昌桉树林下酸性红壤) 和亚褐环乳牛肝菌 [*Suillus subluteus* (Peck) Snell ex Slipp & Snell, Ss 00, 采于内蒙古大青山油松林下中性土壤,由内蒙古农业大学白淑兰教授提供]. 前两株是本课题组筛选出的优良南方菌株^[20],来自于北方的菌株 Ss 00 为对照.

采用无钾源的 Pachlewski 固体培养基, $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 培养供试菌株 14 d 后备用. 培养基组成为: $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 酒石酸铵、 $0.5 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ MgSO_4 、 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 葡萄糖、 $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 琼脂、 $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 维生素 B_1 、 $1.0 \text{ mL} \cdot \text{L}^{-1}$ 微量元素混合液[每升含 8.45 mg H_3BO_3 、 5 mg MnSO_4 、 6 mg FeSO_4 、 0.625 mg CuSO_4 、 2.77 mg ZnCl_2 和 0.27 mg $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$], pH 5.5.

供试土壤为三迭纪须家河组厚层砂岩母质风化而成的酸性黄壤(重庆市缙云山马尾松林下的底层土壤). 蒸汽灭菌后的土壤 pH 值 3.85、有机质 $27.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、活性铝 $1.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全钾 $8.94 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效钾 $15.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (水溶性钾 1.10

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 交换性钾 $14.07 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 缓效钾 $119.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 矿物结构钾 $8.81 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤经风干,磨细过 100 目筛,取 1.0000 g 土壤置于两端开口的塑料管(直径 $\times$ 长 = $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$) 中部,然后两端塞入玻璃纤维,再用孔径为 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜密封两端,水分子、无机离子、低分子有机酸等均可自由通过微孔滤膜,但可防止土壤进入溶液, 121°C 蒸汽灭菌装有土壤的塑料管 150 min 备用.

试验所用有机酸标样为色谱纯,其余试剂均为分析纯. 精确称取草酸、柠檬酸、苹果酸、丁二酸、甲酸、乙酸各 100 mg , 用流动相溶解并定溶于 100 mL 容量瓶中,配置成 $1.0 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 的有机酸的标准混合溶液,再用流动相将标准溶液分别稀释至 0.01 、 0.02 、 0.04 、 0.06 、 0.08 和 $0.10 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 备用.

1.2 试验设计

根据课题组对西南酸性森林土壤中活性铝的测定,设定试验 Al^{3+} 的浓度范围为 $0 \sim 2.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. 先分别配制 Al^{3+} 浓度为 0.0 、 0.4 、 0.8 、 1.2 、 1.6 、 2.0 、 $2.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 无钾的 Pachlewski 液体培养基, pH 3.85; 再取上述溶液各 25 mL 加入 150 mL 的三角瓶中,在每个三角瓶中放入 1 个土壤塑料管; 再将这些三角瓶蒸汽灭菌 ($121^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, 30 min), 冷却; 每瓶分别接入直径为 6 mm 的琼脂菌种 2 块,以不接种但加入 1 个土壤塑料管的液体培养基为对照,余同接种处理; $25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 静置暗培养 28 d (每间隔 24 h 微摇 5 min , $30 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$), 备测有关项目. 试验共 28 个处理,每个处理重复 5 次.

1.3 测定项目与方法

过滤收集菌丝,去离子水洗净,烘干分别测定每瓶生物量. 用硫酸-过氧化氢消化菌丝后,火焰光度计法测钾,凯氏法测氮,钼蓝比色法测磷^[21]. 收集滤液,用 PHS-3C 精密酸度计测定 pH 值,火焰光度计测定钾浓度,高效液相色谱仪(日本 HITACHI 公司生产)测定有机酸含量(样品先经过酸化处理).

高效液相色谱测定有机酸的色谱条件: Diode Array L-7455 紫外检测器, Ion-300 有机酸分析专用柱(Phenomenex, Torrance, CA, USA), 流动相为 $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 硫酸, 流速 $0.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$; 进样量 $20 \mu\text{L}$, 紫外检测波长 210 nm , 柱温 35°C , 压力 450 psi . 测定的有机酸包括草酸、柠檬酸、苹果酸、丁二酸、甲酸、乙酸,其保留时间(min)依次是 9.57、11.52、13.31、15.95、22.64、20.72.

取出塑料管中的土壤,风干,依次用蒸馏水、 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 醋酸铵和 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 沸硝酸提取水溶性钾、

交换性钾和缓效钾,残余土壤再用氢氧化钠 450℃ 熔融,获得矿物结构钾. 用火焰光度计测定各提取溶液及土壤熔融液中的钾^[22].

1.4 数据处理

用 Excel 2007 对试验数据进行基本计算,SPSS 19.0 进行统计分析,不同处理间的差异显著性采用 LSD 法($P \leq 0.05$).

2 结果与分析

2.1 Al^{3+} 对外生菌根真菌生长的影响

在不同浓度 Al^{3+} 的胁迫下,用有效钾含量极低的酸性黄壤和无钾的 Pachlewski 液体培养基做基质,3 株外生菌根真菌的生长各不相同(见图 1),*Pt* 715 的菌丝生物量随 Al^{3+} 浓度的增加呈不对称的“低—高—低”趋势,最高生长点的 Al^{3+} 浓度为 $1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,产生显著抑制作用的 Al^{3+} 浓度为 $2.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; *Ss* 00 的菌丝生物量峰值时的 Al^{3+} 浓度是 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$,在 0.8 、 1.6 和 $2.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Al^{3+} 处理中的菌丝生物量分别比无 Al^{3+} 的对照降低了 12%、38% 和 73%,说明 *Ss* 00 菌株对 Al^{3+} 敏感;*Sl* 13 菌株的生物量也随 Al^{3+} 浓度的增加呈不对称的“低—高—低”趋势, $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Al^{3+} 处理的 *Sl* 13 菌丝生物量最大,随后,随着 Al^{3+} 的浓度增高而显著降低,与无 Al^{3+} 的对照相比,当 Al^{3+} 浓度为 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,菌丝生物量下降 26%. 总之,在 Al^{3+} 浓度较低时,3 株菌株的生物量随浓度的增加而提高,到达峰值后又随 Al^{3+} 浓度升高而降低. 抗 Al^{3+} 性较强的菌株出现峰值时的 Al^{3+} 浓度高,反之亦然. *Pt* 715 的生物量达到峰值时的 Al^{3+} 浓度分别是 *Ss* 00 和 *Sl* 13 菌株的 4 倍和 2 倍.

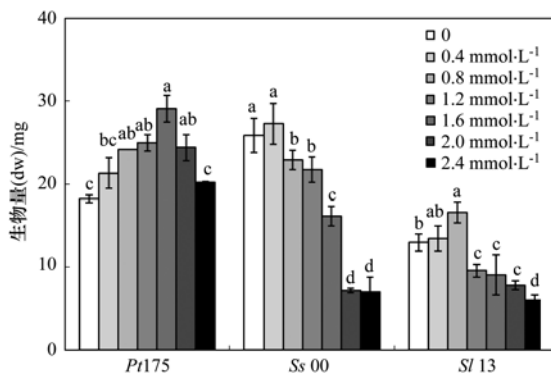


图 1 Al^{3+} 对外生菌根真菌生物量的影响

Fig. 1 Effect of Al^{3+} on the biomass of ECMF

2.2 Al^{3+} 对外生菌根真菌吸收氮磷钾的影响

氮磷钾营养元素是构建菌丝细胞的重要元素,

菌丝体内含量及吸收量是反映其生长状况的主要指标. 在无钾的 Pachlewski 液体培养基中,除钾源为有效钾极低的土壤之外,其它的营养元素供应正常.

2.2.1 Al^{3+} 对 3 株菌株吸收氮的影响

表 1 可见,在 N 正常供应的培养条件下,随着 Al^{3+} 浓度的增加,3 株菌株的氮含量和吸收量呈“低—高—低”趋势,达到最高 N 含量和吸收量的 Al^{3+} 浓度分别是 $1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Pt* 715)、 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Ss* 00) 和 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Sl* 13),即低于氮吸收峰值的 Al^{3+} 浓度起促进作用,高于起抑制作用. N 含量和吸收量达到峰值时,*Pt* 715 的 Al^{3+} 浓度分别比 *Ss* 00、*Sl* 13 高 3 倍和 1 倍;3 株菌株氮含量达到最高时分别比各自的对照增加了 361.13% (*Pt* 715)、123.24% (*Ss* 00) 和 52.11% (*Sl* 13),表明在 Al^{3+} 胁迫下菌株之间氮吸收存在极显著的差异.

2.2.2 Al^{3+} 对 3 株菌株吸收磷的影响

在 P 正常供应的培养条件下,3 种菌株的 P 含量和吸收量均随着 Al^{3+} 浓度的增加呈“低—高—低”趋势,达到最高 P 含量的 Al^{3+} 浓度分别是 $1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Pt* 715)、 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Ss* 00) 和 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Sl* 13),3 株菌株的磷含量达到最高时,分别比各自的对照增加了 133.33% (*Pt* 715)、31.46% (*Ss* 00) 和 83.05% (*Sl* 13),见表 1. 表明在 Al^{3+} 胁迫下菌株之间对磷的吸收存在极显著的差异,其中,*Ss* 00 对 Al^{3+} 的影响也最敏感.

2.2.3 Al^{3+} 对 3 株菌株吸收钾的影响

表 1 可见,当 Al^{3+} 浓度分别在 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Pt* 715)、 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Ss* 00)、 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (*Sl* 13) 时,3 株菌株的吸钾量达到最高,每瓶菌丝吸钾量分别是 0.14 mg (*Pt* 715)、 0.12 mg (*Ss* 00) 和 0.07 mg (*Sl* 13),说明在 Al^{3+} 胁迫下,营养液中 NP 充足而无 K,3 株菌株均能从有效钾极低的土壤中获取钾营养;且菌株间差异明显,*Pt* 715 平均吸 K 量显著高于另外的 2 株菌株.

2.3 Al^{3+} 对外生菌根真菌分泌有机酸和 H^{+} 的影响

表 2 为培养试验结束时,各处理的 ECMF 分泌进入培养液中的有机酸和 H^{+} . 结果表明,在检测的 6 种有机酸中,*Pt* 715 主要分泌 3 种有机酸,以丁二酸数量最多,其次是草酸,而柠檬酸最少;在 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Al^{3+} 处理中草酸、丁二酸含量最高, H^{+} 分泌最多的处理是 $1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Al^{3+} . *Ss* 00 分泌的主要是草酸和少量的柠檬酸,在 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Al^{3+} 处理下草酸分泌量最高,而 H^{+} 分泌最多的处理

表 1 Al³⁺ 对外生菌根真菌氮磷钾含量和吸收量的影响¹⁾

Table 1 Effect of Al ³⁺ on the NPK concentration and uptake amount in the hyphae							
菌株	Al ³⁺ 浓度 /mmol·L ⁻¹	菌丝 NPK 的含量(dw)/mg·g ⁻¹			菌丝 NPK 的吸收量/mg·flask ⁻¹		
		N	P	K	N	P	K
Pt 715	0	2.47f	2.16e	1.22g	0.04f	0.04f	0.02f
	0.4	3.72e	2.12f	3.01cd	0.08e	0.05e	0.06d
	0.8	8.29d	4.42c	4.45b	0.20d	0.11c	0.10b
	1.2	8.33d	4.89b	5.51a	0.21c	0.12b	0.14a
	1.6	11.39a	5.04a	3.15c	0.33a	0.14a	0.09c
	2.0	11.01b	4.92b	2.54e	0.27b	0.12d	0.06d
	2.4	10.29c	3.68d	1.90f	0.21c	0.07b	0.04e
Ss 00	0	10.37e	5.15c	1.17g	0.27d	0.13b	0.03e
	0.4	23.15a	6.77a	2.98e	0.63a	0.18a	0.08c
	0.8	16.07c	5.70b	5.21a	0.37b	0.13b	0.12a
	1.2	16.39b	3.67d	4.81b	0.36c	0.08c	0.10b
	1.6	11.54d	2.21e	3.79c	0.18e	0.03d	0.06d
	2.0	6.28f	1.66f	3.37d	0.05f	0.01e	0.02f
	2.4	3.82g	1.45g	2.46f	0.03g	0.01e	0.02f
Sl 13	0	14.95e	8.91f	2.02g	0.19b	0.11d	0.03c
	0.4	14.03 f	10.69d	2.51e	0.19b	0.14c	0.03c
	0.8	22.74 a	12.58b	4.16a	0.38a	0.21a	0.07a
	1.2	19.57 b	16.31a	3.85b	0.19b	0.15b	0.04b
	1.6	19.41 c	11.83c	3.52c	0.18c	0.11d	0.03c
	2.0	16.77 d	9.61e	2.84d	0.13d	0.07e	0.02d
	2.4	14.95 e	7.69g	2.15f	0.09e	0.05f	0.01e
Al ³⁺ 差异显著性比较		* *	* *	* *	* *	* *	* *
菌株间差异显著性比较		* *	* *	* *	* *	* *	* *

1) 表中同列相同菌株含有不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), * * 为 $P < 0.01$, ns 表示差异不显著,下同

表 2 Al³⁺ 对外生菌根真菌分泌有机酸和 H⁺ 的影响¹⁾

Table 2 Effect of Al ³⁺ on organic acids and H ⁺ efflux by ectomycorrhizal fungi						
菌株	Al ³⁺ 浓度 /mmol·L ⁻¹	有机酸/mg·L ⁻¹				H ⁺ /mmol·L ⁻¹
		草酸	柠檬酸	苹果酸	丁二酸	
Pt 715	0	150.95c	17.35g	ND	525.67a	2.66g
	0.4	152.54b	22.01f	ND	520.51a	2.72f
	0.8	167.13a	22.55c	ND	513.99a	2.86e
	1.2	142.39d	23.10b	ND	492.33ab	3.73b
	1.6	137.81e	24.33a	ND	430.38bc	4.63a
	2.0	112.95f	22.07d	ND	365.23c	2.93d
	2.4	95.45g	22.37e	ND	366.01c	3.08c
Ss 00	0	131.38c	20.81c	ND	ND	1.93g
	0.4	142.05a	24.09b	ND	ND	4.52d
	0.8	134.12b	27.10a	ND	ND	4.74c
	1.2	129.83d	15.10g	ND	ND	5.46b
	1.6	125.50e	17.49d	ND	ND	6.92a
	2.0	123.46f	15.19f	ND	ND	4.41e
	2.4	93.84g	16.86e	ND	ND	4.27f
Sl 13	0	116.25c	63.05d	106.25d	ND	1.98f
	0.4	134.91a	61.00e	124.76a	ND	2.93e
	0.8	119.46b	70.80b	118.45b	ND	7.09a
	1.2	110.57d	69.18c	109.33c	ND	4.01d
	1.6	103.92e	71.00a	99.34e	ND	4.74c
	2.0	90.59f	40.78f	88.28f	ND	4.97b
	2.4	88.38g	24.40g	86.55g	ND	4.97b
Al ³⁺ 差异显著性比较		* *	* *	* *	* *	* *
菌株间差异显著性比较		* *	* *	* *	* *	* *

1) “ND”表示没有相关数据

是 $1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$. *Sl* 13 分泌的是草酸、苹果酸和少量的柠檬酸,在 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 处理下草酸和苹果酸分泌量最高,而 H^+ 分泌最多的处理是 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$. 说明在 Al^{3+} 胁迫和有效钾极低的条件下,3 株外生菌根真菌分泌进入溶液中的有机酸种类、数量和 H^+ 各不相同,共有的有机酸是草酸和柠檬酸,但以草酸分泌量最多; Al^{3+} 浓度对有机酸分泌量的影响呈“低→高→低”趋势,菌株之间存在显著差异,*Pt* 715 分泌的有机酸最多,也更耐 Al^{3+} 毒.

2.4 Al^{3+} 胁迫下 ECMF 对土壤钾的影响

由表 3 可知,在 Al^{3+} 胁迫和无钾的培养液中,3 株 ECMF 只能利用塑料管中的土壤钾,与无菌株的对照相比,土壤钾中的交换性钾、缓效钾和矿物结构钾均发生了显著变化,尤其是矿物结构钾降低明显,但不同菌株和不同 Al^{3+} 处理差异显著. 在不同浓度 Al^{3+} 胁迫下,*Pt* 715 各处理的土壤缓效钾均增高、矿物结构钾均下降. 其中,在 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 处理中,交换性钾和缓效钾含量最高,与无菌株对照相比分别增加 97.09% 和 23.07%,而矿物结构钾含量最

低,分解率高达 2.10%. 说明在 $1.2 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 处理中,*Pt* 715 对矿物结构钾分解最强. 与无菌株的对照相比,*Ss* 00 菌株的各处理是交换性钾显著增高,矿物结构钾和缓效钾下降. 其中,在 $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 处理的交换性钾含量最高,与对照相比增加 92.82%; 在 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 处理中,缓效钾含量最高,矿物结构钾含量最低,即在该 Al^{3+} 浓度下 *Ss* 00 对土壤矿物结构钾的分解作用最强,分解率达 1.43%. 在 $0 \sim 1.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 浓度中,*Sl* 13 处理的土壤交换性和缓效性钾均比无菌株对照显著增加,矿物钾明显降低. 在 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 处理中,矿物结构钾含量最低,分解率高达 1.17%; $0.8 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ Al}^{3+}$ 处理的缓效钾含量最高.

3 株菌株在活化利用土壤钾上存在显著差异.*Pt* 715 对矿物结构钾的分解大于其它 2 株菌株,所分解的部分矿物结构钾也用于补充缓效钾和交换钾库; *Ss* 00 对矿物结构钾的分解小于 *Pt* 715,但对缓效钾的利用高于另外 2 株菌株;在一定 Al^{3+} 浓度范围内,*Sl* 13 菌株分解的矿物结构钾也补充了缓效钾和交换钾库.

表 3 Al^{3+} 胁迫下 ECMF 对土壤钾的影响/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

Table 3 Effect of ECMF on K pools in soils under Al^{3+} stress condition/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

菌株	Al^{3+} 浓度 / $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$	水溶性钾	交换性钾	缓效钾	矿物结构钾
Without ECMF	CK	1.10	14.07	119.52	8 805.31
<i>Pt</i> 715	0	$1.09 \pm 0.08\text{a}$	$14.61 \pm 1.27\text{c}$	$123.31 \pm 3.60\text{g}$	$8 780.99 \pm 20.69\text{c}$
	0.4	$0.93 \pm 0.08\text{b}$	$16.73 \pm 1.40\text{b}$	$123.76 \pm 1.82\text{f}$	$8 738.58 \pm 13.40\text{d}$
	0.8	$0.93 \pm 0.13\text{b}$	$16.77 \pm 4.37\text{b}$	$129.02 \pm 4.20\text{c}$	$8 693.28 \pm 12.41\text{f}$
	1.2	$1.08 \pm 0.13\text{a}$	$27.73 \pm 2.50\text{a}$	$147.09 \pm 3.09\text{a}$	$8 624.11 \pm 15.07\text{g}$
	1.6	$0.67 \pm 0.06\text{c}$	$8.83 \pm 0.56\text{d}$	$132.96 \pm 12.35\text{b}$	$8 707.54 \pm 11.38\text{e}$
	2.0	$0.67 \pm 0.13\text{c}$	$8.46 \pm 1.67\text{d}$	$127.46 \pm 4.81\text{d}$	$8 743.41 \pm 14.29\text{b}$
	2.4	$0.51 \pm 0.02\text{c}$	$8.51 \pm 3.47\text{d}$	$126.41 \pm 2.10\text{e}$	$8 764.62 \pm 17.74\text{a}$
<i>Ss</i> 00	0	$1.21 \pm 0.26\text{b}$	$23.76 \pm 2.52\text{d}$	$116.96 \pm 8.20\text{b}$	$8 768.07 \pm 13.89\text{f}$
	0.4	$1.52 \pm 0.08\text{a}$	$23.76 \pm 0.01\text{c}$	$118.09 \pm 3.21\text{a}$	$8 716.03 \pm 16.77\text{g}$
	0.8	$1.09 \pm 0.16\text{b}$	$27.13 \pm 3.67\text{a}$	$110.37 \pm 2.36\text{d}$	$8 681.41 \pm 17.65\text{d}$
	1.2	$0.84 \pm 0.10\text{c}$	$24.08 \pm 1.58\text{b}$	$110.16 \pm 7.16\text{f}$	$8 704.92 \pm 13.32\text{c}$
	1.6	$1.13 \pm 0.10\text{b}$	$22.50 \pm 1.23\text{e}$	$115.91 \pm 4.20\text{c}$	$8 740.46 \pm 18.41\text{e}$
	2.0	$0.93 \pm 0.12\text{c}$	$19.13 \pm 2.34\text{f}$	$110.35 \pm 1.35\text{e}$	$8 789.59 \pm 15.07\text{b}$
	2.4	$0.89 \pm 0.13\text{c}$	$18.71 \pm 5.05\text{g}$	$110.16 \pm 0.16\text{f}$	$8 790.24 \pm 17.76\text{a}$
<i>Sl</i> 13	0	$0.94 \pm 0.06\text{b}$	$15.68 \pm 2.02\text{e}$	$132.27 \pm 5.52\text{d}$	$8 761.10 \pm 18.07\text{d}$
	0.4	$0.96 \pm 0.17\text{b}$	$21.24 \pm 0.80\text{a}$	$144.25 \pm 4.94\text{b}$	$8 743.55 \pm 19.39\text{g}$
	0.8	$0.92 \pm 0.17\text{b}$	$19.93 \pm 3.74\text{b}$	$145.19 \pm 14.66\text{a}$	$8 703.96 \pm 17.67\text{f}$
	1.2	$1.02 \pm 0.25\text{a}$	$17.79 \pm 0.29\text{c}$	$134.79 \pm 4.73\text{c}$	$8 746.39 \pm 12.27\text{e}$
	1.6	$0.87 \pm 0.06\text{b}$	$16.98 \pm 1.01\text{d}$	$126.92 \pm 4.46\text{e}$	$8 765.23 \pm 12.16\text{c}$
	2.0	$0.90 \pm 0.09\text{b}$	$13.03 \pm 3.16\text{g}$	$118.51 \pm 5.56\text{f}$	$8 787.55 \pm 17.39\text{a}$
	2.4	$0.91 \pm 0.14\text{b}$	$13.61 \pm 0.05\text{f}$	$118.52 \pm 3.18\text{f}$	$8 796.97 \pm 15.68\text{b}$
Al^{3+} 差异显著性比较		**	**	**	**
菌株间差异显著性比较		**	**	**	**

3 讨论

酸铝毒害和土壤贫瘠是导致森林生态系统退化

和生产力降低的主要原因之一,人为的干扰如酸雨加剧土壤酸化,使过多的 Al^{3+} 和重金属溶解出来,危害树木和土壤微生物. 钾是树木营养必需的三要

素之一,但强酸土壤钾素缺乏^[23]。外生菌根真菌是森林土壤中重要的微生物,能与70%~75%的森林树种形成外生菌根。它可以促进植物对养分的吸收和利用,提高酸性土壤上植物的抗铝性^[24]。前人将ECMF活化难溶性钾或抗铝能力分开进行了研究,发现优良的ECMF能利用蛭石、黑云母和钾长石中的钾源^[16,17];选自酸性土壤上的菌种具有较强的抗铝性,可能是酸性土壤上自然选择的结果^[14,19]。事实上,酸性土壤的贫瘠与铝毒往往相伴而生。本研究以有效钾极低的酸性土壤为钾源,结果发现,在低钾和 Al^{3+} 胁迫下,3株供试菌株均能生长,但表现各异。*Pt* 715、*Sl* 13和*Ss* 00生物量和氮磷钾吸收量随着 Al^{3+} 浓度增加呈“低→高→低”趋势,说明低量的铝对菌株生长是有益的,同时因促进生长而增加对氮磷钾养分的利用,但超过一定的量则是有害的。铝是土壤中含量最多的金属元素,也许菌株在自然进化选择过程中需要适量的铝环境。*Pt* 715、*Sl* 13和*Ss* 00最大生物量的 Al^{3+} 浓度分别是1.6、0.8和0.4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,在低浓度 Al^{3+} 胁迫下,3株菌株通过分泌有机酸的机制减轻铝的毒害,反而刺激其生长,而高浓度 Al^{3+} 胁迫的菌株已超过了其承受阈值,从而抑制其生长;前两株是来自南方的菌种,显然比来自于北方的*Ss* 00菌种抗铝性强,但在缺钾的条件下,南方菌株之间抗铝能力差异明显,*Pt* 715抗铝性明显强于*Sl* 13,即抗铝的菌株不一定耐低钾,而耐低钾的菌株不一定抗铝毒。显然,选择兼具抗铝和耐低钾的优良菌株非常必要。

外生菌根真菌种类繁多,不同种(株)间的生物学性质差异极大,在促进钾离子吸收利用方面也存在较大的差异^[13]。外生菌根真菌与木本植物形成外生菌根之后,外延菌丝的重要功能之一是将它们吸收的矿质元素供给寄主植物^[25],从而促进桉树、云杉、松树等菌根依赖性植物的生长和钾的吸收^[26,27]。本试验表明,当 Al^{3+} 浓度分别在1.2 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (*Pt* 715)、0.8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (*Ss* 00)、0.8 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ (*Sl* 13)时,3株菌株的吸钾量达到最高,在 Al^{3+} 胁迫下,3株菌株均能从有效钾极低的土壤中获得钾营养,且菌株间差异明显,*Pt* 715平均吸K量显著高于另外的2株菌株,说明来自于南方的*Pt* 715菌株兼具抗铝和耐低钾的能力,但同样来自于南方的*Sl* 13可能不耐低钾。推测与菌株栖息地的土壤性质及生态条件有关。

土壤钾主要以无机态存在,包括速效钾(水溶性钾和交换性钾)、缓效钾和无效钾(矿物结构

钾),它们之间互相转化。有研究发现,菜豆根瘤菌能活化利用土壤中的钾^[28]。已有的研究也报道了优良的ECMF能利用蛭石、黑云母和钾长石中的钾^[16,17]。本研究发现,供试菌株吸收的钾主要来自于土壤矿物结构钾的分解,在铝胁迫下不同菌株之间存在显著差异。*Pt* 715对矿物结构钾的分解能力大于其它2株菌株,来自于南方的*Sl* 13与*Pt* 715类似,除分解利用矿物结构钾外,还增加了土壤缓效钾和交换钾的库容量;而来自北方的*Ss* 00菌株除了利用矿物结构钾外,还吸收了部分缓效钾。推测3株菌株在矿化分解难溶性钾的机制可能不同。

菌丝极其细小,可以进入土壤矿物或岩石的孔隙,在矿物表面形成菌丝垫,局部提高 H^{+} 和有机酸的浓度^[18], H^{+} 可以进入2:1型非膨胀性黏粒矿物的晶层,取代钾离子^[20]。有机酸能络合 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Fe^{3+} 和 Al^{3+} ,加速矿物风化。若外生菌根真菌菌丝体产生的乙酸和草酸达到2.0 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度,菌丝能以0.15~3.5 $\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$ 的速率矿化2:1型含钾矿物如云母和斜长石,所释放的养分足以满足森林植被对钾、钙、镁等营养元素的需要^[20]。本研究证明3株供试菌株在缺钾的液体培养基中,通过增加 H^{+} 和有机酸的分泌,从矿物结构钾中获取 K^{+} ,但菌株之间差异明显。 Al^{3+} 浓度分别为1.6、0.8、0.4 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,*Pt* 715、*Sl* 13和*Ss* 00分泌的 H^{+} 量达到最大,3株菌株分泌的有机酸种类和数量均存在显著差异,说明在缺钾和铝胁迫的双重影响下,刺激了有机酸和 H^{+} 分泌,但当 Al^{3+} 浓度超过一定范围,又通过抑制菌丝的生长而减少了其分泌。3株菌株有机酸分泌数量、种类和 H^{+} 分泌量的差异,可能是造成它们之间在分解难溶性钾出现显著差异的主要原因。在不同浓度 Al^{3+} 胁迫下,供试外生菌根真菌的生物量、菌丝氮磷钾吸收量和有机酸分泌量与菌株对土壤矿物结构钾的利用的趋势一致,但是菌株间有明显差异。此外,在不同浓度 Al^{3+} 胁迫下,供试外生菌根真菌能不同程度地活化土壤无效钾,其活化能力可能与长期所处的土壤环境密切相关。考虑到纯培养和形成菌根后的差异,进一步研究铝钾胁迫下外生菌根对土壤无效钾的活化很有必要。

总之,在我国热带亚热带的森林土壤中,酸化贫瘠是普遍现象,环境污染加剧土壤酸化,使部分敏感的外生菌根真菌因 Al^{3+} 浓度过高,生长受到抑制而导致树木缺乏矿质营养。所以,酸化铝毒可能是森林退化的主要驱动力。本研究表明,在自然界也存在兼具抗铝和耐贫瘠的优良菌株(如*Pt* 715),筛选

更多的优良菌株,研究其抗性机制对退化森林的重建有重要意义。

4 结论

(1)来自于南方的 *Pt* 715 和 *Sl* 13 菌株比来自于北方的 *Ss* 00 菌株抗铝性强。但在缺钾条件下,来自南方的不同菌株其抗铝能力也有显著差异,*Pt* 715 的抗铝性明显强于 *Sl* 13 菌株。

(2)来自于南方的 *Pt* 715 菌株兼具抗铝和耐低钾的能力,但同样来自于南方的 *Sl* 13 不耐低钾,抗铝和耐低钾的能力与菌株栖息地的土壤性质及生态条件可能有关。在酸化贫瘠缺钾的环境中,选择抗铝和耐低钾的菌株非常必要。

(3)3 株供试菌株有机酸分泌数量、种类和 H^+ 分泌量有明显差异,可能是造成它们之间在分解难溶性钾出现显著差异的主要原因。在不同浓度 Al^{3+} 胁迫下,供试外生菌根真菌能不同程度地活化土壤无效钾,其活化能力可能与长期所处的土壤环境密切相关。

参考文献:

- [1] Liu L, Song C Y, Yan Z G, *et al.* Characterizing the release of different composition of dissolved organic matter in soil under acid rain leaching using three-dimensional excitation-emission matrix spectroscopy[J]. *Chemosphere*, 2009, **77**(1): 15-21.
- [2] 熊毅,李庆逵. 中国土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [3] 袁金华, 徐仁扣. 生物质炭对酸性土壤改良作用的研究进展[J]. *土壤*, 2012, **44**(4): 541-547.
- [4] Wan Y S, Wang W M. Analysis on current situation, formation causes and control countermeasures of acid rain pollution in China[J]. *Meteorological and Environmental Research*, 2010, **1**(10): 92-95.
- [5] 钟汉珍, 袁泉. 长江流域酸雨危害及对策分析[J]. *华中农业大学学报(社会科学版)*, 2002, (3): 18-21.
- [6] 杜晓明, 田仁生. 重庆南山马尾松衰亡与铝中毒[J]. *环境科学研究*, 1996, **9**(6): 21-25.
- [7] 杨胜天, 李巍, 吕涛, 等. 酸雨对森林植被的影响及在贵州龙里的初步研究——代“酸雨胁迫影响森林植被及其生态效益的评估”专栏序言[J]. *环境科学学报*, 2010, **30**(1): 1-6.
- [8] 黄益江, 陈杜满, 刘玉明, 等. 二氧化硫污染对马尾松生长影响的相关研究[J]. *浙江林学院学报*, 1998, **15**(2): 127-130.
- [9] Wang Y H, Solberg S, Yu P T, *et al.* Assessments of tree crown condition of two masson pine forests in the acid rain region in south China[J]. *Forest Ecology and Management*, 2007, **242**(2-3): 530-540.
- [10] 李倩, 黄建国. 外生菌根真菌改善树木钾素营养的研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2011, **39**(6): 107-110.
- [11] 袁玲, 方德华, 汪智慧, 等. 钾对外生菌根真菌的分泌作用及氮、磷、钾含量的影响[J]. *生态学报*, 2001, **21**(2): 254-258.
- [12] Mengel K, Uhlenbecker K. Determination of available interlayer potassium and its uptake by ryegrass[J]. *Soil Science*, 1993, **57**: 761-766.
- [13] Futai K, Taniguchi T, Kataoka R. Ectomycorrhizae and their importance in forest ecosystems [A]. In: *Mycorrhizae: sustainable agriculture and forestry*[M]. Netherlands: Springer, 2008. 241-285.
- [14] 李华, 黄建国, 袁玲. 铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响[J]. *环境科学*, 2013, **34**(1): 315-320.
- [15] Yuan L, Huang J G, Li X L, *et al.* Biological mobilization of potassium from clay minerals by ectomycorrhizal fungi and eucalypt seedling roots[J]. *Plant and Soil*, 2004, **262**(1-2): 351-361.
- [16] Glowa K R, Arocena J M, Massicotte H B. Extraction of potassium and/or magnesium from selected soil minerals by *Piloderma*[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2003, **20**(2): 99-111.
- [17] Bonneville S, Smits M M, Brown A, *et al.* Plant-driven fungal weathering: Early stages of mineral alteration at the nanometer scale[J]. *Geology*, 2009, **37**(7): 615-618.
- [18] Harley J L, Smith S E. *Mycorrhizal symbiosis*[M]. London: Academic Press, 1983. 210-230.
- [19] 王明霞, 袁玲, 周志峰, 等. 铝对外生菌根真菌草酸分泌及氮磷钾吸收的影响[J]. *林业科学*, 2012, **48**(2): 82-88.
- [20] Wallander H. Use of strontium isotopes and foliar K content to estimate weathering of biotite induced by pine seedlings colonised by ectomycorrhizal fungi from two different soils[J]. *Plant and Soil*, 2000, **222**(1-2): 215-229.
- [21] 李华, 黄建国, 王明霞. 锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及有机酸分泌的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2012, **34**(3): 76-80.
- [22] 杨剑虹, 王成秋, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [23] 杨磊, 林清火, 华元刚, 等. 阳江农场胶园土壤 pH 值与养分含量相关性分析[J]. *热带农业科学*, 2013, **33**(5): 30-32, 37.
- [24] 辜夕容, 梁国仕, 黄建国. 外生菌根提高植物抗铝性机理研究进展[J]. *中国农学通报*, 2005, **21**(9): 218-221.
- [25] Landeweert R, Hoffland E, Finlay R D, *et al.* Linking plants to rocks: ectomycorrhizal fungi mobilize nutrients from minerals[J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2001, **16**(5): 248-254.
- [26] Sousa N R, Franco A R, Ramos M A, *et al.* Reforestation of burned stands: The effect of ectomycorrhizal fungi on *Pinus pinaster* establishment[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, **43**(10): 2115-2120.
- [27] Reis F S, Ferreira I C F R, Martins A. Effect of the mycorrhizal symbiosis time in the antioxidant activity of fungi and *Pinus pinaster* roots, stems and leaves [J]. *Industrial Crops and Products*, 2012, **35**(1): 211-216.
- [28] 张亮, 黄建国, 韩玉竹, 等. 菜豆根瘤菌对土壤钾的活化作用[J]. *生态学报*, 2012, **32**(19): 6016-6022.

CONTENTS

Development of a Two Stage Virtual Impactor for Stationary Source PM ₁₀ and PM _{2.5} Sampling	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, DUAN Lei, <i>et al.</i> (3639)
Characteristics and the Impact Factors of Acid Rain in Fuzhou and Xiamen 1992-2012	ZHENG Qiu-ping, WANG Hong, CHEN Bin-bin, <i>et al.</i> (3644)
Concentration Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosol Under Different Weather Conditions in Qingdao Coastal Region	CHEN Xiao-jing, QI Jian-hua, LIU Ning, <i>et al.</i> (3651)
Emission Characteristics and Hazard Assessment Analysis of Volatile Organic Compounds from Chemical Synthesis Pharmaceutical Industry	LI Yan, WANG Zhe-ming, SONG Shuang, <i>et al.</i> (3663)
NO _x and SO ₂ Formation in the Sintering Process and Influence of Sintering Material Composition on NO _x Emissions	REN Zhong-pei, ZHU Tian-le, ZHU Ting-yu, <i>et al.</i> (3669)
Application of Activated Carbon from Waste Tea in Desulfurization and Denitrification	SONG Lei, ZHANG Bin, DENG Wen (3674)
Effect of Soil Texture in Unsaturated Zone on Soil Nitrate Accumulation and Groundwater Nitrate Contamination in a Marginal Oasis in the Middle of Heihe River Basin	SU Yong-zhong, YANG Xiao, YANG Rong (3683)
Health Assessment of River Ecosystem in Haihe River Basin, China	HAO Li-xia, SUN Ran-hao, CHEN Li-ding (3692)
Analysis on the Variation Characteristics of Iron and Manganese Concentration and Its Genesis in Changtan Reservoir in Taizhou, Zhejiang Province	LIU Shu-yuan, ZHENG Chen, YUAN Qi, <i>et al.</i> (3702)
Spatiotemporal Characteristics of Nitrogen and Phosphorus in a Mountainous Urban Lake	BAO Jing-yue, BAO Jian-guo, LI Li-qing (3709)
Formation of Geochemistry in Underground River Under Rainfall Conditions: An Example for Underground River at Xueyu Cave, Chongqing	WANG Feng-kang, LIANG Zuo-bing, YU Zheng-liang, <i>et al.</i> (3716)
Contamination and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Water and in Karst Underground River Catchment	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, TIAN Ping, <i>et al.</i> (3722)
Pollution Characteristics and Ecological Risk of Polybrominated Diphenyl Ethers (PBDEs) in River Sediments from an Electrical Equipment Dismantling Area	CHEN Xuan-yu, XUE Nan-dong, ZHANG Shi-lei, <i>et al.</i> (3731)
Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments in the Southern and Central Haihe River Basin	WANG Rui-lin, CHENG Xian, SUN Ran-hao (3740)
Distribution Characteristics of COD and DO and Its Influencing Factors in the Daliaohe Estuary	YANG Fu-xia, JIAN Hui-min, TIAN Lin, <i>et al.</i> (3748)
Seasonal Variation in the Absorption and Fluorescence Characteristics of CDOM in Downstream of Liaohe River	SHAO Tian-tian, ZHAO Ying, SONG Kai-shan, <i>et al.</i> (3755)
Nitrogen Uptake and Denitrification Study on the Joint Treatment of Aquatic Vegetation and Immobilized Nitrogen Cycling Bacteria in Taihu Lake	LIU Dan-dan, LI Zheng-kui, YE Zhong-xiang, <i>et al.</i> (3764)
Actinobacteria and Their Odor-producing Capacities in a Surface Water in Shanghai	CHEN Jiao, BAI Xiao-hui, LU Ning, <i>et al.</i> (3769)
Laboratory Evaluation of Remediation of Nitrobenzene Contaminated Aquifer by Using Groundwater Circulation Well	BAI Jing, ZHAO Yong-sheng, SUN Chao, <i>et al.</i> (3775)
Sorption Characteristics of Tea Waste Modified by Hydrated Ferric Oxide Toward Pb(II) in Water	WAN Shun-li, XUE Yao, MA Zhao-zhao, <i>et al.</i> (3782)
Effects of UV Radiation on the Aggregation Performance of Small Molecular Organic Acids	WANG Wen-dong, WANG Ya-bo, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (3789)
UV Photolysis of Propanolol in Aqueous Solution: Mechanism and Toxicity of Photoproducts	PENG Na, WANG Kai-feng, LIU Guo-guang, <i>et al.</i> (3794)
Photo-catalytical Degradation of Diphenylarsinic Acid by TiO ₂ (P25)	WANG A-nan, TENG Ying, LUO Yong-ming (3800)
Effect of Carbon/Nitrogen Ratio on Short-Cut Nitrification and Denitrification of Polyurethane Biofilm Reactor	TAN Chong, LIU Ying-jie, WANG Wei, <i>et al.</i> (3807)
Distribution and Removal of Anaerobic Antibiotic Resistant Bacteria During Mesophilic Anaerobic Digestion of Sewage Sludge	TONG Juan, WANG Yuan-yue, WEI Yuan-song (3814)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Insecticides in Surface Soil from a Rapidly Urbanizing Region	WEI Yan-li, BAO Lian-jun, WU Cheng-zhou, <i>et al.</i> (3821)
Field Measurement of Soil Mercury Emission in a Masson Pine Forest in Tieshanping, Chongqing in Southwestern China	DU Bao-yu, WANG Qiong, LUO Yao, <i>et al.</i> (3830)
Chlorine Speciation and Concentration in Cultivated Soil in the Northeastern China Studied by X-Ray Absorption Near Edge Structure	LI Jing, LANG Chun-yan, MA Ling-ling, <i>et al.</i> (3836)
Soil Organic Carbon Storage Changes with Land Reclamation Under Vegetation Reconstruction on Opencast Coal Mine Dump	LI Jun-chao, DANG Ting-hui, GUO Sheng-li, <i>et al.</i> (3842)
Effect of Sulfur on the Species of Fe and As Under Redox Condition in Paddy Soil	TANG Bing-pei, YANG Shi-jie, WANG Dai-zhang, <i>et al.</i> (3851)
Response of Ectomycorrhizal Fungi to Aluminum Stress and Low Potassium Soil	ZHANG Wei, HUANG Jian-guo, YUAN Ling, <i>et al.</i> (3862)
Long-Term Manure Application Induced Shift of Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Paddy Soil	HUANG Fu-yi, LI Hu, WEI Bei, <i>et al.</i> (3869)
Effect of Phosphate and Organic Acid Addition on Passivation of Simulated Pb Contaminated Soil and the Stability of the Product	ZUO Ji-chao, GAO Ting-ting, SU Xiao-juan, <i>et al.</i> (3874)
Bioremediation of Chromium(VI) Contaminated Site by Reduction and Microbial Stabilization of Chromium	ZHENG Jia-chuan, ZHANG Jian-rong, LIU Xi-wen, <i>et al.</i> (3882)
Effect of Thermal Enhanced Soil Vapor Extraction on Benzene Removal in Different Soil Textures	LI Peng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (3888)
Effects of Elevated O ₃ Concentration on Nitrogen in Greening Tree Species in Southern China	YANG Tian-tian, ZHANG Wei-wei, HU En-zhu, <i>et al.</i> (3896)
Effects of Nitrogen Application on Soil Greenhouse Gas Fluxes in <i>Eucalyptus</i> Plantations with Different Soil Organic Carbon Content	LI Rui-da, ZHANG Kai, SU Dan, <i>et al.</i> (3903)
Ozone Effects on Soil Microbial Community of Rice Investigated by ¹³ C Isotope Labeling	CHEN Zhan, WANG Xiao-ke, SHANG He (3911)
Enhanced Aerobic Degradation of Low Chlorinated Biphenyls by Constructing Surfactants <i>Burkholderia xenovorans</i> LB400 Based System	CHEN Shao-yi, ZHANG Jing, WANG Han, <i>et al.</i> (3918)
Identification of a High Ammonia Nitrogen Tolerant and Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Bacterial Strain TN-14 and Its Nitrogen Removal Capabilities	XIN Xin, YAO Li, LU Lei, <i>et al.</i> (3926)
Isolation and Identification of Electrochemically Active Microorganism from Micro-Aerobic Environment	WU Song, XIAO Yong, ZHENG Zhi-yong, <i>et al.</i> (3933)
Characteristics of Microbial Community Structure During Isolation of Electrical Active Bacteria	WANG Min, ZHAO Yang-guo, LU Shan-shan (3940)
Predicting Copper Toxicity to <i>Hypophthalmichthys molitrix</i> and <i>Ctenopharyngodon idellus</i> Based on Biotic Ligand Model	WANG Wan-bin, CHEN Sha, WU Min, <i>et al.</i> (3947)
Macrobenthos Community Structure and Water Quality Evaluation of Tian'e Zhou Oxbows	MA Xiu-juan, SHEN Jian-zhong, WANG Teng, <i>et al.</i> (3952)
Species Selection Methods in Deriving Water Quality Criteria for Aquatic Life	ZHANG Ling-song, WANG Ye-yao, MENG Fan-sheng, <i>et al.</i> (3959)
Correlations Between HBCD and Thyroid Hormone Concentrations in Human Serum from Production Source Area	LI Peng, YANG Cong-qiao, JIN Jun, <i>et al.</i> (3970)
Preparation of Cobalt Oxide Mesoporous Metallic Oxide-Clay Composites and Their Catalytic Performance in the Oxidation of Benzene	MU Zhen, MA Chun-yan, CHENG Jie, <i>et al.</i> (3977)
Catalytic Degradation of Naphthalene by CuO(-CeO ₂)/Al ₂ O ₃	ZHA Jian, ZHOU Hong-cang, HE Du-liang, <i>et al.</i> (3984)
Toxicity Tests and Their Application in Safety Assessment of Water Quality	XU Jian-ying, ZHAO Chun-tao, WEI Dong-bin (3991)
Assessment on the COD Discharge Status of Municipal Wastewater Treatment Plant in a City of China	ZHOU Yu-hua, LU Yan-na, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (3998)
Assessment of Ecological Environment Benefits of Reclaimed Water Reuse in Beijing	FAN Yu-peng, CHEN Wei-ping (4003)
Construction of Index System for Early Warning of Persistent Organic Pollutants (POPs) Pollution Incidents in China	WANG Lin, LÜ Yong-long, HE Gui-zhen, <i>et al.</i> (4009)
Environmental Damages Assessment: Establishment of System Framework in China	ZHANG Hong-zhen, WANG Jin-nan, NIU Kun-yu, <i>et al.</i> (4015)

《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)

2014年10月15日 第35卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 10 Oct. 15, 2014

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. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. 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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行