

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第1期

Vol.34 No.1

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角背景地区秋冬季节大气气态总汞含量特征研究	窦红颖,王书肖,王龙,张磊,郝吉明	(1)
厦门城区大气颗粒物 PM ₁₀ 中有机酸源谱特征分析	杨冰玉,黄星星,郑桢,刘碧莲,吴水正	(8)
兴隆大气气溶胶中水溶性无机离子分析	李杏茹,宋爱利,王英锋,孙颖,刘子锐,王跃思	(15)
气相组分对氨吸收同步脱除模拟烟气 SO ₂ 和 NO _x 的影响	王鸿,朱天乐,王美艳	(21)
麦秸全量还田下太湖地区两种典型水稻土稻季氮挥发特性比较	汪军,王德建,张刚,王远	(27)
单光子/光电子在线质谱实时分析聚氯乙烯热分解/燃烧产物	陈文东,侯可勇,陈平,李芳龙,赵无垠,崔华鹏,花磊,谢园园,李海洋	(34)
碱性活性炭表面特征及其吸附甲烷的研究	张梦竹,李琳,刘俊新,孙永军,李国滨	(39)
夏季黄渤海表层海水中二甲亚砜 (DMSO) 的浓度分布	王敏,张洪海,杨桂朋	(45)
2010年秋季长江口口外海域 CDOM 的三维荧光光谱-平行因子分析	闫丽红,陈学君,苏荣国,韩秀荣,张传松,石晓勇	(51)
基于集合均方根滤波的太湖叶绿素 a 浓度估算与预测	李渊,李云梅,王桥,张卓,郭飞,吕恒,毕坤,黄昌春,郭宇龙	(61)
基于 HJ1A-CCD 数据的高光谱影像重构研究	郭宇龙,李云梅,朱利,徐德强,李渊,檀静,周莉,刘阁	(69)
重庆雪玉洞岩溶地下河地球化学敏感性研究	徐尚全,杨平恒,殷建军,毛海红,王鹏,周小萍	(77)
区域点源和非点源磷入河量计算的二元统计模型	陈丁江,孙嗣畅,贾颖娜,陈佳勃,吕军	(84)
秦淮河典型河段总氮总磷时空变异特征	李跃飞,夏永秋,李晓波,熊正琴,颜晓元	(91)
湘江沉积物镉和汞质量基准的建立及其应用	蒋博峰,桑磊鑫,孙卫玲,郝伟,李丽,邓宝山	(98)
丹江口水库迁建区土壤重金属分布及污染评价	张雷,秦延文,郑丙辉,时瑶,韩超男	(108)
汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布	李晋昌,张红,石伟	(116)
黄河下游引黄灌区地下水重金属分布及健康风险评估	张妍,李发东,欧阳竹,赵广帅,李静,柳强	(121)
胶州湾、套子湾及四十里湾表层沉积物中有机氯农药的含量和分布特征	刘艺凯,钟广财,唐建辉,潘晓辉,田崇国,陈颖军	(129)
基于干扰梯度的钦江流域底栖动物完整性指数候选参数筛选	卢东琪,张勇,蔡德所,刘朔孺,陈燕海,王备新	(137)
海洋细菌 <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 分离鉴定及对中肋骨条藻的化感作用	王洪斌,陈文慧,李信书,李士虎,阎斌伦	(145)
水稻秸秆浸泡液对铜绿微囊藻生理特性的影响	苏文,孔繁翔,于洋,贾育红,张民	(150)
化感物质肉桂酸乙酯对蛋白核小球藻生长及生理特性的影响	高李李,郭沛涌,苏光明,魏燕芳	(156)
无负压供水模式下管网水力模拟与安全评价分析	王欢欢,刘书明,姜帅,孟凡琳,白璐	(163)
天然有机物的相对分子质量分布及亲疏水性对微滤膜组合工艺中膜污染的影响	胡孟柳,林洁,许光红,董秉直	(169)
不同基质条件下透性处理对脱硫弧菌硫酸盐还原活性的影响	徐慧伟,张旭,李立明,郑光洁,李广贺	(177)
基于零价铁的双金属体系对六氯苯还原脱氯研究	曾宪委,刘建国,聂小琴	(182)
负载型 TiO ₂ 光电催化降解孔雀石绿的动力学研究	张小娜,周少奇,周晓	(188)
污水厂微孔曝气系统工况下充氧性能测试与分析	吴媛媛,周小红,施汉昌,邱勇	(194)
微气泡及其产生方式对活性污泥混合液性质的影响	刘春,马锦,张磊,张静,张明,吴根	(198)
不同氮浓度冲击对颗粒污泥脱氮过程中 N ₂ O 产生量的影响	韩雪,高大文	(204)
模拟电镀污泥重金属浸出液对氧化亚铁硫杆菌活性的影响	谢鑫源,孙培德,楼菊青,郭茂新,马王钢	(209)
嗜麦芽窄食单胞菌对铜镉的吸附特性与离子交换	白洁琼,尹华,叶锦韶,彭辉,唐立栉,何宝燕,李跃鹏	(217)
阴离子表面活性剂改性水滑石吸附硝基苯的特性研究	夏燕,朱润良,陶奇,刘汉阳	(226)
活性氧化铝对水中磷的去除与回收研究	孟文娜,谢杰,吴德意,张振家,孔海南	(231)
北京城区可吸入颗粒物分布与呼吸系统疾病相关分析	杨维,赵文吉,官兆宁,赵文慧,唐涛	(237)
北京市市售鸡蛋和鸭蛋中全氟化合物的污染水平研究	齐彦杰,周珍,史亚利,孟昭福	(244)
北京市场常见淡水食用鱼体内农药残留水平调查及健康风险评估	千志勇,金芬,孙景芳,原盛广,郑蓓,张文婧,安伟,杨敏	(251)
多效应残差法 (MERA) 表征二甲亚砜-农药二元混合物毒性相互作用	霍向晨,刘树深,张晶,张瑾	(257)
利用 DGGE-菌落原位杂交法分离土壤中精喹禾灵降解菌	吕欣,彭霞薇,呼庆,马安周,江泽平,魏远	(263)
不同白腐真菌复配方式对产酶的影响	孟瑶,梁红,高大文	(271)
不同施肥措施对土壤活性有机碳的影响	张瑞,张贵龙,姬艳艳,李刚,常泓,杨殿林	(277)
垦殖对湿地土壤有机碳垂直分布及可溶性有机碳截留的影响	霍莉莉,邹元春,郭佳伟,吕宪国	(283)
黄河三角洲碱蓬湿地土壤有机碳及其组分分布特征	董洪芳,于君宝,管博	(288)
丘陵林地土壤酸化改良剂的集中施用-自然扩散修复技术研究	方熊,刘菊秀,尹光彩,赵亮,刘世忠,褚国伟,李义勇	(293)
重度滴滴涕污染土壤低温等离子体修复条件优化研究	陈海红,骆永明,滕应,刘五星,潘澄,李振高,黄玉娟	(302)
无定形 Fe(OH) ₃ 和 Fe ₃ O ₄ 共沉淀态 As 的化学提取	陈义萍,王少锋,贾永锋	(308)
铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响	李华,黄建国,袁玲	(315)
污泥和餐厨垃圾联合干法中温厌氧消化性能研究	段妮娜,董滨,李江华,戴翎翎,戴晓虎	(321)
高比表面生物质炭的制备、表征及吸附性能	李坤权,李焯,郑正,桑大志	(328)
基于情景分析的浙江沿海地区环境污染防治战略研究	田金平,陈吕军,杜鹏飞,钱易	(336)
微生物全细胞传感器在重金属生物可利用度监测中的研究进展	侯启会,马安周,庄绪亮,庄国强	(347)
2012 城市生态学术研讨会会议论文		
北京市城乡环境梯度下街尘中重金属污染特征	何小艳,顾培,李叙勇,赵洪涛	(357)
北京市道路灰尘中污染物含量沿城乡梯度、道路密度梯度的变化特征	唐荣莉,马克明,张育新,毛齐正	(364)
北京城市典型下垫面降雨径流污染初始冲刷效应分析	任玉芬,王效科,欧阳志云,侯培强	(373)
洋河流域张家口段河流水质演化及驱动因子分析	虎博,王铁宇,吕永龙,杜立宇,罗维	(379)
低碳交通电动汽车减排潜力及其影响因素分析	施晓清,李笑诺,杨建新	(385)
北京市社区生活垃圾分类收集实效调查及其长效管理机制研究	邓俊,徐琬莹,周传斌	(395)
人工湿地在应用中存在的问题及解决措施	黄锦楼,陈琴,许连煌	(401)
《环境科学》征订启事(26)	《环境科学》征稿简则(68)	信息(76,144,301,400)
		专辑征稿通知(394)

铝和锰对外生菌根真菌生长、养分吸收及分泌作用的影响

李华, 黄建国*, 袁玲

(西南大学资源环境学院, 重庆 400716)

摘要: 在强酸性土壤和铝锰矿墟上, 铝和锰是影响森林生长和植被恢复的主要限制因子, 研究它们对外生菌根真菌的影响, 筛选优良的抗性菌株, 可为开展污染土壤生物修复提供技术支撑及理论依据. 试验采用纯培养技术研究了 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 单独或共存对褐环乳牛肝菌 13 (*Suillus luteus* 13, *Sl* 13)、土生空团菌 04 (*Cenococcum geophilum* 04, *Cg* 04)、彩色豆马勃 715 (*Pisolithus tinctorius* 715, *Pt* 715) 这 3 株外生菌根真菌生长、养分吸收、有机酸分泌的影响. 结果表明, Mn^{2+} 使 *Sl* 13、*Cg* 04、*Pt* 715 的生物量分别降低了 70.35%、52.44% 和 18.55%; Al^{3+} 使 *Sl* 13 的生物量下降 50.74%, 但增加 *Cg* 04 的生物量; Al^{3+} 和 Mn^{2+} 共存对 3 种菌株生长均有协同抑制作用, 但对 *Pt* 715 的抑制最小, 表明 *Cg* 04 抗铝, *Pt* 715 对铝、锰的单独污染和复合污染均有较强的抗性. Al^{3+} 和 Mn^{2+} 抑制外生菌根真菌吸收养分, 对 *Sl* 13 的抑制作用显著大于 *Pt* 715 和 *Cg* 04; 但提高 3 个菌株的草酸和 H^+ 分泌速率, 增加其分泌量, 两者共存对 *Cg* 04 草酸分泌速率具有协同促进效应, *Pt* 715 不仅能分泌草酸而且还分泌丁二酸. 因此, 抗性强的外生菌根真菌可通过分泌较多的有机酸络合 Al^{3+} 和 Mn^{2+} 而缓解其毒害.

关键词: 铝; 锰; 外生菌根真菌; 有机酸; 养分; 生物修复; 污染土壤

中图分类号: X131.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)01-0315-06

Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi

LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling

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

Abstract: Al^{3+} and Mn^{2+} limit forest growth and vegetation restoration in strongly acidic soils and mining areas of aluminum and manganese. The knowledge on the influence of these two elements on ectomycorrhizal fungi can provide theoretical and technical supports for the selection of powerful ectomycorrhizal fungal strains and the bioremediation of contaminated soil. Three ectomycorrhizal fungal strains, namely *Suillus luteus* 13 (*Sl* 13), *Cenococcum geophilum* 04 (*Cg* 04) and *Pisolithus tinctorius* 715 (*Pt* 715), were grown in liquid culture mediums with Al^{3+} and Mn^{2+} added alone and together to investigate fungal growth, nutrient uptake and organic acid efflux. The results showed that the biomass of *Sl* 13, *Cg* 04 and *Pt* 715 was decreased by 70.35%, 52.44% and 18.55%, respectively, under Mn^{2+} stress. Al^{3+} also decreased the biomass of *Sl* 13 by 50.74% but increased that of *Cg* 04. The growth of ectomycorrhizal fungi was further inhibited when grown in culture solutions with addition of both Mn^{2+} and Al^{3+} and the least growth inhibition was found with *Pt* 715. *Cg* 04 might thus have a strong resistance to Al^{3+} stress and *Pt* 715 to both Al^{3+} and Mn^{2+} compared to the others. Al^{3+} and Mn^{2+} decreased the nutrient uptake by the fungi, particularly by *Sl* 13 which showed more obvious reduction than *Pt* 715 and *Cg* 04. However, Al^{3+} and Mn^{2+} increased the efflux of oxalic acid and protons by ectomycorrhizal fungi. An additional oxalic acid exudation by *Cg* 04 was observed in the coexistence of Al^{3+} and Mn^{2+} and *Pt* 715 exuded not only oxalic acid but also succinic acid. Therefore, ectomycorrhizal fungi resistant to Mn^{2+} and Al^{3+} could effuse more organic acids than the sensitive ones in order to alleviate the harmfulness through complexation under the stress.

Key words: aluminum; manganese; ectomycorrhizal fungi; organic acid; nutrient; bioremediation; contaminated soil

我国西南地区是铝、锰金属开采和加工的主要基地, 有大面积的铝、锰矿墟和污染土壤需要治理, 急需通过植树造林进行绿化美化. 此外, 在我国南方有大面积的酸性森林土壤, pH 值在 4.0 ~ 4.5 之间, 并且呈现逐年降低的趋势^[1]. 当土壤 pH < 5.5 时, 土壤中的可溶态铝随 pH 降低而急剧增加, 造成毒害, 使森林生长速率和生产力明显下降, 甚至死亡. 若土壤 pH < 5.0, 活性铝、锰共存, 危害更大^[2]. 因此, 防治铝、锰危害, 对于污染土壤的植树

造林和天然林的保护具有重要意义.

外生菌根真菌是森林生态系统中的重要成分, 其菌套和外延菌丝具有扩大乔灌木植物根系吸收养分, 促进生长^[3], 改善寄主植物的根际环境, 增强树木抗病、抗盐和抗重金属等能力^[4-6]. 在重金属污

收稿日期: 2012-03-27; 修订日期: 2012-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41171215)

作者简介: 李华(1988~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业资源微生物, E-mail: 1056307239@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: huang99@swu.edu.cn

染的土壤中,常发现抗(耐)重金属的外生菌根真菌,它们侵染寄主植物后,可促进树木幼苗的成活与生长^[7,8]. 据报道在铜、锌等污染的土壤中,外生菌根真菌(*Suillus bovinus*)显著促进欧洲赤松(*Pinus sylvestris*)苗木的生长^[9]. Marx^[10]利用彩色豆马勃(*Pisolithus tinctorius*)接种松树(*Pinus*)苗,在露天的煤矿废墟上进行植树造林,显著地提高了幼苗成活率及生长速率. 在纯培养条件下,分别添加不同浓度的 Hg、Cd、Cu、Pb、Al、Zn、Cu 等重金属,发现很多外生菌根真菌对重金属都有不同程度的抗(耐)性^[11~14]. 在外生菌根真菌提高寄主植物抗(耐)重金属过程中,菌丝的阻隔作用和分泌有机酸尤其是草酸对重金属产生的络合作用极其重要,大幅度减少了重金属进入植物体内^[15]. 但是,目前有关外生菌根真菌抗(耐)铝、锰的研究一般限于单一重金属. 在酸性土壤、矿墟和工业排放中,铝、锰一般同时存在,对植物的毒害存在交互效应^[2],但对外生菌根真菌的影响却鲜见报道.

本研究以褐环乳牛肝菌 *Sl* 13 (*Suillus luteus* 13)、土生空团菌 *Cg* 04 (*Cenococcum geophilum* 04)、彩色豆马勃 *Pt* 715 (*Pisolithus tinctorius* 715)为材料,分析在铝、锰单独和共同胁迫下对外生菌根真菌生长、氮磷钾养分吸收,以及有机酸及氢离子分泌的影响. 目的是了解不同生态型的外生菌根真菌对铝、锰的抗(耐)性,以期为筛选抗性(耐)性较强的菌株,修复被铝锰污染的土壤和酸化土壤上天然林的保护提供参考.

1 材料与方法

1.1 供试菌株

供试菌株分别是褐环乳牛肝菌 [*Suillus luteus* 13, *Sl* 13, 采自北亚热带重庆金佛山马尾松 (*Pinus massoniana*) 林下的酸性土壤, pH = 4.12]、土生空团菌 [*Cenococcum geophilum* 04, *Cg* 04, 采自温带内蒙古大青山油松 (*Pinus tabulaeformis*) 林下的中性土壤, pH = 7.1] 和彩色豆马勃 [*Pisolithus tinctorius* 715, *Pt* 715, 采自亚热带干热河谷四川西昌桉树 (*Eucalyptus*) 林下的微酸性红壤, pH = 5.9].

供试菌株在 25℃ ± 1℃ 的条件下,采用 Pachlewsk 固体培养基暗培养 14 d 备用.

1.2 试验设计

在预备试验的基础上,设计如下处理:①对照 (CK, 不加 Al³⁺ 或 Mn²⁺); ②Al₁: 0.8 mmol·L⁻¹; ③Al₂: 1.6 mmol·L⁻¹; ④Mn₁: 3.6 mmol·L⁻¹; ⑤

Mn₂: 14.5 mmol·L⁻¹; ⑥Al₁ + Mn₁: 0.8 mmol·L⁻¹ + 3.6 mmol·L⁻¹. Al³⁺ 和 Mn²⁺ 分别由 Al₂SO₄·7H₂O (分析纯) 和 MnCl₂·4H₂O (分析纯) 提供.

分别制备上述 6 种处理的 Pachlewsk 液体培养基. 每个处理各取 20 mL 分别装入 150 mL 三角瓶中,然后,121℃ 高压灭菌 30 min. 冷却后每瓶分别接种一块直径为 6 mm 的固体菌块,25℃ ± 1℃ 暗培养 14 d 后备测有关项目. 每个处理设 4 个重复.

1.3 测定项目与方法

在培养结束后,收集过滤后的菌丝,于 80℃ 烘干测定菌丝生物量,并测定菌丝体内氮磷钾含量,用硫酸-过氧化氢消化菌丝后,依次用靛酚蓝比色法、钼蓝比色法、火焰光度计法测定消化液中的氮、磷、钾含量^[16].

先用精密酸度计 (pHS-3C, 上海鹏顺公司生产) 测定滤液的 pH,再用 0.5 mol·L⁻¹ 的硫酸酸化滤液,用 D-7000 高效液相色谱仪 (HLPC, 日本 HITACHI 公司生产) 测定溶液中的草酸和丁二酸含量 (以 DW 计算). 色谱条件为:20 μL 样液, Ion-300 有机酸分析专用柱 (Phenomenex, Torrance, CA, USA), 2.5 mmol·L⁻¹ 硫酸为流动相,流动速率 0.5 mL·min⁻¹.

1.4 数据处理

用 Excel 对试验数据进行基本计算, SPSS 18.0 软件进行方差分析,多重比较采用 Duncan 法,显著水准设为 0.05.

2 结果与分析

2.1 铝和锰对外生菌根真菌生长的影响

表 1 可见, Mn²⁺ 显著降低 3 株外生菌根真菌的生物量,但降低程度各不相同. 在 3.6 mmol·L⁻¹、14.5 mmol·L⁻¹ Mn²⁺ 胁迫下, *Sl* 13 的生物量分别降低了 56.86% 和 83.84%, 平均为 70.35%, *Sl* 13 菌株受 Mn²⁺ 影响最显著,高浓度 Mn²⁺ 的影响显著大于低浓度; 其次是 *Cg* 04, 生物量降低幅度为 45.51% ~ 59.36% (平均 52.43%); Mn²⁺ 对 *Pt* 715 影响最小,生物量分别降低了 22.17% 和 14.93% (平均 18.55%). Mn²⁺ 对 3 株外生菌根真菌的毒害强弱依次为: *Sl* 13 > *Cg* 04 > *Pt* 715.

Al³⁺ 对 3 株菌株的影响各异. 0.8 mmol·L⁻¹、1.6 mmol·L⁻¹ 的 Al³⁺ 均显著抑制 *Sl* 13 的生物量,生物量降低幅度为 50.22% ~ 51.26% (平均 50.74%), 但浓度之间差异不显著; 在 1.6 mmol·L⁻¹ Al³⁺ 的胁迫下, *Pt* 715 生物量降低了 6.92%, 而 0.8 mmol·L⁻¹ Al³⁺ 胁迫下生物量与对照

无差异; Al^{3+} 显著促进 *Cg* 04 的生长, 在 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 Al^{3+} 处理下, 生物量分别提高了 5.13% 和 21.54%。 Al^{3+} 对 3 株外生菌根真菌生长毒害最显著的是 *Sl* 13 菌株, 对 *Pt* 715 在 $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Al}^{3+}$ 时有抑制作用, 而对 *Cg* 04 表现

出促进生长的作用。

在 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{Al}^{3+}$ 、 $3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{Mn}^{2+}$ 共同胁迫下, *Cg* 04 的生物量无显著变化, 但 *Sl* 13 和 *Pt* 715 的生物量显著降低, 分别下降了 61.34% 和 8.89%。

表 1 铝和锰对外生菌根真菌生长的影响¹⁾/mg·bottle⁻¹

Table 1 Growth of ectomycorrhizal fungi in response to Al^{3+} and Mn^{2+} stress/mg·bottle⁻¹

菌株	试验处理					
	CK	Mn ₁	Mn ₂	Al ₁	Al ₂	Mn ₁ + Al ₁
<i>Sl</i> 13	35.70 ± 3.51 a	15.40 ± 1.04 b	5.77 ± 0.71 c	17.77 ± 0.37 b	17.40 ± 0.88 b	13.80 ± 0.58 b
<i>Pt</i> 715	43.08 ± 1.20 a	36.65 ± 0.78 cd	33.53 ± 1.58 d	44.57 ± 1.75 a	40.10 ± 0.80 bc	39.25 ± 0.96 bc
<i>Cg</i> 04	7.80 ± 0.73 bc	4.25 ± 0.61 d	3.17 ± 0.20 d	8.20 ± 0.40 a	9.48 ± 0.08 a	6.68 ± 0.16 c

1) 表中同行含有不同小写字母者表示差异显著性 ($P < 0.05$)

2.2 铝和锰对外生菌根真菌氮、磷、钾含量和吸收量的影响

氮、磷、钾是构建菌株体最重要的营养元素。在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 胁迫下, 3 株外生菌根真菌菌丝中的氮、磷、钾的含量和吸收量存在显著差异 (见表 2)。

2.2.1 菌株含氮量和氮吸收量

菌株含氮量: 在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 单独或共同存在

下, 3 株菌株的含氮量各不相同。在两种重金属的影响下, *Sl* 13 的含氮量均显著增加; 在 Mn^{2+} 单独胁迫或两种毒物共同胁迫下, *Pt* 715 的含氮量显著提高, 在 Al^{3+} 单独胁迫下无显著变化; 在 $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Mn}^{2+}$ 、 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Al}^{3+}$ 、 $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Al}^{3+}$ 和两种重金属共同胁迫下, *Cg* 04 含氮量均显著降低。

表 2 不同浓度铝、锰对外生菌根真菌氮、磷、钾含量和吸收量的影响¹⁾

Table 2 Effect of Al^{3+} and Mn^{2+} on the contents and absorption of N, P and K in ectomycorrhizal fungi

菌株	试验处理	养分含量/mg·g ⁻¹			养分吸收量/mg·colony ⁻¹		
		N	P	K	N	P	K
<i>Sl</i> 13	CK	32.5 b	5.30 c	4.82 a	1.14 a	0.063 b	0.18 a
	Mn ₁	37.72 a	12.41 ab	2.70 bc	0.49 b	0.133 bc	0.033 bc
	Mn ₂	37.91 a	15.86 a	1.71 c	0.26 c	0.08 b	0.01 c
	Al ₁	37.56 a	8.90 b	3.44 b	0.67 b	0.21 a	0.065 b
	Al ₂	37.32 a	10.18 b	3.32 b	0.62 b	0.178 bc	0.06 b
	Mn ₁ + Al ₁	39.66 a	10.34 b	2.64 bc	0.48 b	0.24 a	0.045 b
<i>Pt</i> 715	CK	23.64 b	21.62 a	12.29 a	1.13 a	0.94 a	0.53 a
	Mn ₁	28.25 a	16.87 b	10.41 ab	1.03 a	0.62 b	0.39 b
	Mn ₂	29.47 a	15.37 bc	9.61 b	0.97 a	0.52 b	0.34 b
	Al ₁	24.75 b	13.42 c	8.24 bc	1.06 a	0.60 b	0.37 b
	Al ₂	25.34 ab	12.92 c	6.60 c	1.01 a	0.52 b	0.27 c
	Mn ₁ + Al ₁	29.10 a	16.53 b	10.03 b	1.14 a	0.65 b	0.39 b
<i>Cg</i> 04	CK	27.39 a	11.23 c	5.53 ab	0.22 a	0.085 b	0.043 ab
	Mn ₁	25.71 ab	13.76 bc	4.82 b	0.11 b	0.057 c	0.015 c
	Mn ₂	18.08 bc	20.62 a	5.50 ab	0.053 b	0.06 c	0.017 c
	Al ₁	11.95 c	12.59 bc	6.86 a	0.097 b	0.10 a	0.053 a
	Al ₂	25.28 ab	15.33 b	6.55 ab	0.24 a	0.15 a	0.06 a
	Mn ₁ + Al ₁	11.27 c	13.15 bc	5.18 ab	0.075 b	0.088 b	0.033 bc

1) 表中同列同一菌株中含有不同小写字母者表示差异显著 ($P < 0.05$), 下同

菌株氮吸收量: 菌株氮吸收量受菌株生物量和含氮量的影响。在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 单独或共同存在下, 3 株菌株氮吸收量各不相同。在两种重金属的影响下, *Sl* 13 菌株的氮吸收量均显著下降, 降低幅度为 41.23% ~ 77.19%, Mn^{2+} 的影响显著大于 Al^{3+} 的作用; *Pt* 715 的氮吸收量无显著变化; Mn^{2+} 显著降低

Cg 04 的氮吸收量, 并随浓度的增加毒性加大; $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Al}^{3+}$ 抑制但 $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Al}^{3+}$ 促进 *Cg* 04 氮吸收量, $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Al}^{3+}$ 与 $3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Mn}^{2+}$ 共存时有明显的抑制作用。

2.2.2 菌株含磷量和磷吸收量

菌株含磷量: 在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 单独或共存时, 3 株

菌株含磷量有所差异. 在两种重金属胁迫下, *Sl* 13 含磷量均显著增加, Mn^{2+} 的影响大于 Al^{3+} ; *Pt* 715 含磷量均显著降低, 降低幅度为 21.97% ~ 40.24%, Al^{3+} 的影响显著大于 Mn^{2+} ; 在 $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 、 $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 胁迫下, *Cg* 04 的含磷量显著增加.

菌株磷吸收量: 在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 单独或共同存在时, *Pt* 715 的磷吸收量显著降低; 在 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 或 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 、 $3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 共存时, *Sl* 13 的磷吸收量显著增加, 在 $3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 、 $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 胁迫时无显著变化; Mn^{2+} 显著降低而 Al^{3+} 显著促进 *Cg* 04 的磷吸收量, Al^{3+} 与 Mn^{2+} 共同存在时无显著变化.

2.2.3 菌株含钾量和钾吸收量

菌株含钾量: 在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 单独或共同胁迫下, *Sl* 13 的含钾量均显著降低; *Cg* 04 的含钾量无显著变化. 在 Al^{3+} 胁迫、 $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 及两种重金属共同胁迫下, *Pt* 715 的含钾量显著降低.

菌株钾吸收量: 在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 单独或共同胁迫下, 3 株菌株的钾吸收量有显著差异. 在两种重金属胁迫下, *Sl* 13、*Pt* 715 的钾吸收量均显著降低, 其中, 在 $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 胁迫下, *Sl* 13 钾的吸收量降低 94.44%, $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 使 *Pt* 715 降低 49.06%; Mn^{2+} 显著降低 *Cg* 04 钾的吸收量, 但 Al^{3+} 单独胁迫、或 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 与 $3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 共存时, 不影响 *Cg* 04 钾的吸收量.

2.3 铝、锰对外生菌根真菌分泌草酸、丁二酸和 H^+ 的影响

有机酸具有络合重金属的作用. 在不利环境的胁迫下, 外生菌根真菌主动分泌有机酸是一种自我保护机制的体现. 在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 胁迫下, 测得供试菌株可以分泌一定数量的草酸和丁二酸, 其它种类有机酸分泌规律不稳定, 未做统计.

2.3.1 草酸

在正常或有 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 胁迫时, 3 种外生菌根真菌分泌草酸的速率因菌株而异, 其中, *Cg* 04 分泌速率最大 [平均 $32.44 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$], *Pt* 715 最小 [平均 $5.98 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$], *Sl* 13 居中 [平均 $9.36 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$]. Al^{3+} 或 Mn^{2+} 单独胁迫下, *Sl* 13、*Cg* 04 分泌草酸的速率显著增加; 在两种重金属共存时, *Sl* 13 分泌草酸的速率恢复到正常水平, *Cg* 04 达到最大值; 在几种处理中, *Pt* 715 分泌草酸的速率均无显著变化(表 3).

表 3 铝、锰胁迫条件下, 外生菌根真菌分泌草酸、丁二酸和 H^+ 的速率¹⁾/ $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$

菌株	试验处理	草酸	丁二酸	H^+
<i>Sl</i> 13	CK	5.20 c	nd	114.92 c
	Mn_1	11.26 a	nd	72.87 d
	Mn_2	12.79 a	nd	36.66 e
	Al_1	10.51 ab	nd	147.64 b
	Al_2	9.54 b	nd	263.88 a
	$Mn_1 + Al_1$	6.85 c	nd	173.14 b
<i>Pt</i> 715	CK	6.10 a	nd	32.50 c
	Mn_1	4.50 a	4.30 d	40.38 bc
	Mn_2	7.30 a	33.01 a	57.89 b
	Al_1	4.35 a	17.46 c	54.61 b
	Al_2	6.37 a	25.86 b	97.19 a
	$Mn_1 + Al_1$	7.24 a	25.61 b	99.57 a
<i>Cg</i> 04	CK	12.37 d	nd	20.15 de
	Mn_1	24.86 c	nd	18.19 e
	Mn_2	46.75 b	nd	28.25 d
	Al_1	13.80 d	nd	63.18 c
	Al_2	20.89 c	nd	164.58 a
	$Mn_1 + Al_1$	75.97 a	nd	77.78 b

1) “nd”表示没有相关数据

2.3.2 丁二酸

由表 3 可见, 在对照处理中, 3 种菌株均不分泌丁二酸; 在 Al^{3+} 、 Mn^{2+} 胁迫下, 只有 *Pt* 715 具有分泌丁二酸的能力, *Sl* 13 和 *Cg* 04 均不分泌丁二酸. *Pt* 715 丁二酸分泌速率为 $21.25 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{d})^{-1}$, $1.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 或 $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 胁迫下, *Pt* 715 分泌丁二酸的速率与 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 或 $3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 胁迫下相比分别增加 0.48 倍和 6.67 倍, 低高浓度间差异显著. 在 $0.8 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Al^{3+}$ 、 $3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 共同胁迫下, *Pt* 715 分泌丁二酸的速率显著增加, 是单独胁迫时的 5.96 倍和 1.47 倍, 说明两者共存具有协同作用.

2.3.3 分泌 H^+ 的速率

在 Mn^{2+} 胁迫下, 3 株外生菌根真菌分泌 H^+ 的速率表现为降低、增加或不变(表 3).

$3.6 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 均显著降低 *Sl* 13 分泌 H^+ 的速率, 降低幅度为 36.59% ~ 68.09%, 二者之间差异显著. $14.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} Mn^{2+}$ 显著增加 *Pt* 715 分泌 H^+ 的速率, 比对照增加 0.78 倍; Mn^{2+} 对 *Cg* 04 分泌 H^+ 的速率无显著影响.

Al^{3+} 显著促进 3 株外生菌根真菌分泌 H^+ 的速率, Al^{3+} 浓度越高, 分泌 H^+ 的速率越大, 但促进效应因菌种(株)而异. Al^{3+} 对 *Cg* 04 的影响最大, 与对照相比, 分泌 H^+ 的速率分别增加 2.13 倍(0.8

mmol·L⁻¹ Al³⁺) 和 7.17 倍 (1.6 mmol·L⁻¹ Al³⁺); Al³⁺ 对 *Pt* 715 影响次之, 增加到对照的 0.68 ~ 1.99 倍; *Sl* 13 受 Al³⁺ 影响最小, 但分泌 H⁺ 的速率也增加为对照处理的 0.28 ~ 1.30 倍。

与对照相比, 在 0.8 mmol·L⁻¹ Al³⁺、3.6 mmol·L⁻¹ Mn²⁺ 共存时, 供试菌株分泌 H⁺ 的速率均显著增加, 分别增加为对照处理的 2.86 倍 (*Cg* 04)、2.06 倍 (*Pt* 715)、0.51 倍 (*Sl* 13)。

3 讨论

不同外生菌根真菌对 Hg、Cd、Cu、Pb、Zn、Cu 等重金属的抗(耐)性各异^[10~13]。本研究表明, Mn²⁺ 显著抑制 3 株供试菌株的生长, 对 *Sl* 13 菌株生长的抑制作用最显著, 对 *Pt* 715 的抑制最小, 表明 *Pt* 715 耐(抗) Mn²⁺ 的能力高于其它 2 个菌株; 而 Al³⁺ 对 *Cg* 04 生长促进, 但对另外 2 个菌株产生明显的抑制; 铝不是真菌生长必须的微量元素, *Cg* 04 生长在 pH 值偏中性, 活性铝含量较低的土壤中, 却表现出强耐铝性, 这可能与 *Cg* 04 自身的解毒机制有关^[17]。在 Al³⁺、Mn²⁺ 共存时, 对 *Sl* 13、*Pt* 715 和 *Cg* 04 生长的抑制作用大于它们单独的抑制作用, 二者具有协同抑制效应, 其中, *Pt* 715 受 Al³⁺ 和 Mn²⁺ 的协同抑制最小, 表明菌株抗(耐)性的强弱除与生境来源有关外, 也受多种生境因素共同影响^[18]。在自然环境中, 多种重金属污染往往伴生出现^[19], 研究它们的交互作用对于治理重金属污染有重要意义。在治理受铝、锰污染的矿区及强酸性森林植被的恢复时, 可依据菌株的生境来源, 抗(耐)铝、锰能力的差异, 选择适宜的外生菌根真菌。

Blaudez 等^[20] 发现, 低质量浓度重金属对真菌养分吸收有促进作用, 随着浓度的升高, 养分吸收量逐渐降低。在 Al³⁺、Mn²⁺ 胁迫下, *Sl* 13、*Pt* 715 的养分吸收量均下降, 这可能是导致菌株生长受到抑制的原因之一; *Cg* 04 在 Mn²⁺ 胁迫下养分吸收量显著降低, 但在 Al³⁺ 胁迫下显著增加或变化不大, 这与 Mn²⁺ 抑制而 Al³⁺ 促进 *Cg* 04 的生长相关。Al³⁺、Mn²⁺ 共存, 对 3 株菌株养分吸收量产生的协同或拮抗作用不一。其中, 二者共存对 *Pt* 715 的氮、钾吸收量表现出协同促进效应, 但协同抑制磷的吸收; 对 *Sl* 13、*Cg* 04 的磷吸收量表现为协同促进效应, 但协同抑制氮、钾的吸收。Al³⁺ 和 Mn²⁺ 对 3 株菌株产生的交互效应的差异可能与菌株本身对铝、锰的反应有关。

外生菌根真菌在铝、铜、锌等胁迫下能分泌大

量的草酸, 草酸能与重金属形成有机复合物从而降低毒害^[21~23]。一般来说, 草酸分泌速率与抗铝、锰密切相关, 耐铝、锰的菌株草酸释放量较高^[24, 25]。试验结果表明, *Cg* 04 耐 Al³⁺ 强, 但对 Mn²⁺ 敏感, 草酸分泌速率增加显著; *Sl* 13 对 Al³⁺ 或 Mn²⁺ 均较敏感, 草酸分泌速率低于前者; 对 Al³⁺ 和 Mn²⁺ 均有一定抗性的 *Pt* 715, 其草酸分泌速率变化不大, 但分泌了大量的丁二酸, 说明分泌草酸的生理过程可能不是所有外生菌根真菌抗(耐)铝锰性强弱的唯一指标^[26], 其它有机酸也具有络合重金属的作用。在 Al³⁺ 和 Mn²⁺ 共存下, *Pt* 715、*Cg* 04 的草酸分泌速率高于单独存在的分泌量, 表现出协同促进效应, 其中对 *Cg* 04 的草酸分泌速率的协同促进效应最明显。有机酸除了络合铝、锰降低毒害外, 还具有加速矿物矿化, 增强宿主的抗病能力, 提供电子供体等作用, 这些都是有机酸重要的生物学和生态学意义^[27]。因此, 对有机酸的研究能更好的了解外生菌根真菌抗性机制。

试验表明, Al³⁺ 胁迫下 3 株菌株分泌 H⁺ 的速率显著高于 Mn²⁺ 胁迫, 说明同一外生菌根真菌对不同重金属的抗性机制可能不同^[28]。Mn²⁺ 对 *Sl* 13、*Pt* 715、*Cg* 04 分泌 H⁺ 的速率的影响分别表现为显著降低、增加或不变, 而 Al³⁺ 显著促进 3 株菌株的分泌 H⁺ 的速率。H⁺ 分泌量减小, 可以提高培养液的 pH 值, 降低活性锰的含量, 从而减轻锰毒害^[29]; 而铝胁迫下大量产生的 H⁺ 有益于将 Al-P 中的磷素释放^[30]。Al³⁺ 和 Mn²⁺ 共存时, 3 株菌株的分泌 H⁺ 的速率均比单独胁迫时显著增加, 说明两种重金属共存对菌株分泌 H⁺ 的速率表现为协同促进效应。

总之, 不同外生菌根真菌对铝或锰的抗(耐)性不同, 这与菌株生境来源和自身的解毒机制有关。尽管 *Sl* 13 生长在重庆酸性森林土壤中, 但由于土壤环境中的铝锰浓度低于试验设置浓度, 因此, *Sl* 13 对铝锰较敏感, 不适宜应用于受铝锰污染的土壤环境的恢复; *Cg* 04 采自北方, 生长在中性土壤中, 但它的抗(耐)铝性最强, *Cg* 04 易与桦树 (*Betula*)、油松、虎榛子 (*Ostryopsis davidiana*) 等北方树种共生, 所以适宜应用于北方废弃铝矿区的修复; *Pt* 715 抗铝、锰性均较强, 可与桉树等多种林木形成菌根, 它分离于西南酸性森林土, 因此, 适宜应用于西南地区铝、锰废墟的修复和酸性森林土壤植被的恢复。

4 结论

Sl 13 抗 Al³⁺、Mn²⁺ 的能力最弱, *Pt* 715 抗

Mn^{2+} 、*Cg* 04 抗 Al^{3+} 性较强, Al^{3+} 和 Mn^{2+} 对 *Pt* 715 的协同抑制效应最小。外生菌根真菌的养分吸收量与抗(耐)性密切相关, Al^{3+} 、 Mn^{2+} 对 *Pt* 715 和 *Cg* 04 吸收养分的抑制作用小于 *Sl* 13, 它们能分泌大量的丁二酸(*Pt* 715) 和草酸(*Cg* 04) 来缓解毒害。 Al^{3+} 胁迫下, 3 株菌株分泌 H^+ 的速率显著增加, Al^{3+} 、 Mn^{2+} 对 *Pt* 715 和 *Cg* 04 分泌草酸和 H^+ 均表现为协同促进效应。

参考文献:

- [1] Liu K H, Fang Y T, Yu F M, *et al.* Soil acidification in response to acid deposition in three subtropical forests of subtropical China[J]. *Pedosphere*, 2010, **20**(3): 399-408.
- [2] Yang Z B, You J F, Xu M Y, *et al.* Interaction between aluminum toxicity and manganese toxicity in soybean (*Glycine max*)[J]. *Plant and Soil*, 2009, **319**(1-2): 277-289.
- [3] 弓明钦, 陈应龙, 仲崇录. 菌根研究及应用[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997. 84-88.
- [4] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis[M]. Cambridge: Academic Press, 2008. 126-160.
- [5] Colpaert J V, Wevers J H L, Krznanic E, *et al.* How metal-tolerant ecotypes of ectomycorrhizal fungi protect plants from heavy metal pollution[J]. *Annals of Forest Science*, 2011, **68**(1): 17-24.
- [6] Lou Z B, Li K, Gai Y, *et al.* The ectomycorrhizal fungus (*Paxillus involutus*) modulates leaf physiology of poplar towards improved salt tolerance [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2011, **72**(2): 304-311.
- [7] Krpata D, Fitz W, Langer I, *et al.* Bioconcentration of zinc and cadmium in ectomycorrhizal fungi and associated aspen trees as affected by level of pollution [J]. *Environmental Pollution*, 2009, **157**(1): 280-286.
- [8] Sousa N R, Ramos M A, Marques P G C, *et al.* The effect of ectomycorrhizal fungi forming symbiosis with *Pinus pinaster* seedlings exposed to cadmium [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **414**(1): 63-67.
- [9] 黄艺, 陶澍, 张学青, 等. 外生菌根对欧洲赤松苗 (*Pinus sylvestris*) Cu, Zn 积累和分配的影响[J]. *环境科学*, 2000, **21**(2): 1-6.
- [10] Marx D H. Mycorrhizae and establishment of trees on strip-mined land[J]. *The Ohio Journal of Science*, 1975, **75**(6): 288-297.
- [11] Crane S, Dighton J, Barkay T. Growth responses to and accumulation of mercury by ectomycorrhizal fungi[J]. *Fungal Biology*, 2010, **114**(10): 873-880.
- [12] 李芳, 张俊伶, 冯固, 等. 两种外生菌根真菌对重金属 Zn、Cd 和 Pb 耐性的研究[J]. *环境科学学报*, 2003, **23**(6): 807-811.
- [13] Ray P, Tiwari R, Reddy U G, *et al.* Detecting the heavy metal tolerance level in ectomycorrhizal fungi *in vitro* [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2005, **21**(3): 309-315.
- [14] 辜夕容, 黄建国. 铝对外生菌根真菌草酸分泌及磷、钾、铝吸收的影响[J]. *生态学报*, 2010, **20**(2): 357-363.
- [15] Ray P, Adholey A. Correlation between organic acid exudation and metal uptake by ectomycorrhizal fungi grown on pond ash *in vitro*[J]. *Biometals*, 2009, **22**(2): 257-281.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000. 55-109.
- [17] Tam P C F. Heavy metal tolerance by ectomycorrhizal fungi and metal amelioration by *Pisolithus tinctorius* [J]. *Mycorrhiza*, 1995, **5**(3): 181-187.
- [18] Blaudez D, Jacob C, Turnau K, *et al.* Differential responses of ectomycorrhizal fungi heavy metals *in vitro* [J]. *Mycological Research*, 2000, **104**(11): 1366-1371.
- [19] Krznanic E, Cloquet C, Colpaert J V, *et al.* Zn pollution counteracts Cd toxicity in metal-tolerant ectomycorrhizal fungi and their host plant, *Pinus sylvestris* [J]. *Environmental Microbiology*, 2010, **12**(8): 2133-2142.
- [20] Blaudez D, Botton B, Chalot M. Cadmium uptake and subcellular compartmentation in ectomycorrhizal fungus *Paxillus involutus*[J]. *Microbiology*, 2000, **146**(5): 1109-1117.
- [21] Hoffland E, Kuyper T W, Plassard C, *et al.* The role of fungi weathering [J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2004, **2**(5): 258-264.
- [22] Ahonen-Jonnarh U, Van Hees P A W, Lundström U S, *et al.* Organic acids produced by mycorrhizal *Pinus sylvestris* exposed to elevated aluminum and heavy metal concentrations [J]. *New Phytologist*, 2000, **146**(3): 557-567.
- [23] Arocena J M, Glowa K R, Massicotte H B, *et al.* Chemical and mineral composition of ectomycorrhizosphere soils of subalpine fir (*Abies lasiocarpa* (Hook.) Nutt.) in the Ae horizon of a Luvisol[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1999, **79**(1): 25-35.
- [24] Delhaize E, Craig S, Beaton C D, *et al.* Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.) (I. uptake and distribution of aluminum in root apices)[J]. *Plant Physiology*, 1993, **103**(3): 685-693.
- [25] Miyasaka S C, Buat J G, Howell R K, *et al.* Mechanism of aluminum tolerance in snapbeans. Root exudation of citric acid [J]. *Plant Physiology*, 1991, **96**(3): 737-743.
- [26] Cumming J R, Swiger T D, Kurnik B S, *et al.* Organic acid exudation by *Laccaria bicolor* and *Pisolithus tinctorius* exposed to aluminum *in vitro* [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2001, **31**(4): 703-710.
- [27] Gadd G M. Fungal production of citric and oxalic acid: importance in metal speciation, physiology and biogeochemical processes[J]. *Advances in Microbial Physiology*, 1999, **41**: 47-92.
- [28] 黄志基, 黄艺, 彭博. 铜胁迫对 2 种菌根真菌生长和细胞壁离子交换量的影响[J]. *环境科学*, 2006, **27**(8): 1654-1658.
- [29] Wang P, Bi S P, Ma L P, *et al.* Aluminum tolerance of two wheat cultivars (*Brevor* and *Atlas66*) in relation to their rhizosphere pH and organic acids exuded from roots[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, **54**(26): 10033-10039.
- [30] Yuan L, Fang D H, Huang J G, *et al.* Bio-mobilization of potassium from clay minerals: I. by ectomycorrhizal [J]. *Pedosphere*, 2000, **10**(4): 339-346.

CONTENTS

Characteristics of Total Gaseous Mercury Concentrations at a Rural Site of Yangtze Delta, China	DOU Hong-ying, WANG Shu-xiao, WANG Long, <i>et al.</i> (1)
Compositions of Organic Acids in PM ₁₀ Emission Sources in Xiamen Urban Atmosphere	YANG Bing-yu, HUANG Xing-xing, ZHENG An, <i>et al.</i> (8)
Analysis on Water-soluble Inorganic Ions in the Atmospheric Aerosol of Xinglong	LI Xing-ru, SONG Ai-li, WANG Ying-feng, <i>et al.</i> (15)
Effects of Gaseous Compositions the on Simultaneous Removal of NO _x and SO ₂ from Simulated Flue Gas by Ammonia Absorption	WANG Hong, ZHU Tian-le, WANG Mei-yan (21)
Comparing the Ammonia Volatilization Characteristic of Two Typical Paddy Soil with Total Wheat Straw Returning in Taihu Lake Region	WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, <i>et al.</i> (27)
Real-Time Analysis of Polyvinyl Chloride Thermal Decomposition/Combustion Products with Single Photon Ionization/Photoelectron Ionization Online Mass Spectrometer	CHEN Wen-dong, HOU Ke-yong, CHEN Ping, <i>et al.</i> (34)
Surface Characteristics of Alkali Modified Activated Carbon and the Adsorption Capacity of Methane	ZHANG Meng-zhu, LI Lin, LIU Jun-xin, <i>et al.</i> (39)
Distribution of Dimethylsulfoxide(DMSO) in the Surface Water of the Yellow Sea and the Bohai Sea	WANG Min, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (45)
Resolving Characteristic of CDOM by Excitation-Emission Matrix Spectroscopy Combined with Parallel Factor Analysis in the Seawater of Outer Yangtze Estuary in Autumn in 2010	YAN Li-hong, CHEN Xue-jun, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (51)
Estimation and Forecast of Chlorophyll a Concentration in Taihu Lake Based on Ensemble Square Root Filters	LI Yuan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (61)
Research of Hyperspectral Reconstruction Based on HJ1A-CCD Data	GUO Yu-long, LI Yun-mei, ZHU Li, <i>et al.</i> (69)
Research on the Sensitivity of Geochemical of Underground River in Chongqing Xueyu Cave	XU Shang-quan, YANG Ping-heng, YIN Jian-jun, <i>et al.</i> (77)
Bivariate Statistical Model for Calculating Phosphorus Input Loads to the River from Point and Nonpoint Sources	CHEN Ding-jiang, SUN Si-yang, JIA Ying-na, <i>et al.</i> (84)
Temporal and Spatial Variations of Total Nitrogen and Total Phosphorus in the Typical Reaches of Qinhuai River	LI Yue-fei, XIA Yong-qiu, LI Xiao-bo, <i>et al.</i> (91)
Derivation and Application of Sediment Quality Criteria of Cd and Hg for the Xiangjiang River	JIANG Bo-feng, SANG Lei-xin, SUN Wei-ling, <i>et al.</i> (98)
Distribution and Pollution Assessment of Heavy Metals in Soil of Relocation Areas from the Danjiangkou Reservoir	ZHANG Lei, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (108)
Concentrations of Soil Heavy Metals and Their Spatial Distribution in the Surrounding Area of Fenhe Reservoir	LI Jin-chang, ZHANG Hong, SHI Wei (116)
Distribution and Health Risk Assessment of Heavy Metals of Groundwaters in the Irrigation District of the Lower Reaches of Yellow River	ZHANG Yan, LI Fa-dong, OUYANG Zhu, <i>et al.</i> (121)
Concentrations and Distribution of Organochlorine Pesticides in the Surface Sediments of Jiaozhou Bay, Taozi Bay and Sishili Bay	LIU Yi-kai, ZHONG Guang-cai, TANG Jian-hui, <i>et al.</i> (129)
Choice of Macroinvertebrate Metrics for Constructing a Benthic-Index of Biotic Integrity Based on the Disturbance Gradients in the Qinjiang River Basin	LU Dong-qi, ZHANG Yong, CAI De-suo, <i>et al.</i> (137)
Isolation and Identification of <i>Marinobacter adhaerens</i> HY-3 and Its Allelopathy on <i>Skeletonema costatum</i>	WANG Hong-bin, CHEN Wen-hui, LI Xin-shu, <i>et al.</i> (145)
Effects of the Rice Straw on <i>Microcystis aeruginosa</i> Analyzed by Different Physiological Parameters	SU Wen, KONG Fan-xiang, YU Yang, <i>et al.</i> (150)
Effects of Allochemicals Ethyl Cinnamate on the Growth and Physiological Characteristics of <i>Chlorella pyrenoidosa</i>	GAO Li-li, GUO Pei-yong, SU Guang-ming, <i>et al.</i> (156)
Hydraulic Simulation and Safety Assessment of Secondary Water Supply System with Anti-Negative Pressure Facility	WANG Huan-huan, LIU Shu-ming, JIANG Shuai, <i>et al.</i> (163)
Effect of Relative Molecular Mass Distribution and Hydrophilicity/Hydrophobicity of NOM on Membrane Fouling in MF-combined Process	HU Meng-liu, LIN Jie, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (169)
Effect of Permeabilization on Sulfate Reduction Activity of <i>Desulfovibrio vulgaris</i> Hildenborough Cells in the Presence of Different Electron Donors	XU Hui-wei, ZHANG Xu, LI Li-ming, <i>et al.</i> (177)
Dechlorination of HCB by Bimetals Based on Zero Valent Iron	ZENG Xian-wei, LIU Jian-guo, NIE Xiao-qin (182)
Study on Kinetics of Photoelectrocatalytic Degradation of Supported TiO ₂ on Malachite Green	ZHANG Xiao-na, ZHOU Shao-qi, ZHOU Xiao (188)
Measurement and Analysis of Micropore Aeration System's Oxygenating Ability Under Operation Condition in Waste Water Treatment Plant	WU Yuan-yuan, ZHOU Xiao-hong, SHI Han-chang, <i>et al.</i> (194)
Influence of Microbubble and Its Generation Process on Mixed Liquor Properties of Activated Sludge	LIU Chun, MA Jin, ZHANG Lei, <i>et al.</i> (198)
Impact of Different Nitrogen Concentrations on the N ₂ O Production in the Denitrification Process of Granular Sludge	HAN Xue, GAO Da-wen (204)
Effect of Simulated Heavy Metal Leaching Solution of Electroplating Sludge on the Bioactivity of <i>Acidithiobacillus ferrooxidans</i>	XIE Xin-yuan, SUN Pei-de, LOU Ju-qing, <i>et al.</i> (209)
Characteristic and Ion Exchanges During Cu ²⁺ and Cd ²⁺ Biosorption by <i>Stenotrophomonas maltophilia</i>	BAI Jie-qiong, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (217)
Sorption of Nitrobenzene to Anionic Surfactant Modified Layered Double Hydroxides	XIA Yan, ZHU Run-liang, TAO Qi, <i>et al.</i> (226)
Study on Phosphate Removal and Recovery by Activated Alumina	MENG Wen-na, XIE Jie, WU De-yi, <i>et al.</i> (231)
Spatial Distribution of Inhalable Particulate and Association with Respiratory Disease in Beijing City	YANG Wei, ZHAO Wen-ji, GONG Zhao-ning, <i>et al.</i> (237)
Pollution Levels of Perfluorochemicals in Chicken Eggs and Duck Eggs from the Markets in Beijing	QI Yan-jie, ZHOU Zhen, SHI Ya-li, <i>et al.</i> (244)
Residual Levels of Pesticides in Freshwater Fish from Beijing Aquatic Product Markets and Health Risk Assessment	YU Zhi-yong, JIN Fen, SUN Jing-fang, <i>et al.</i> (251)
Characterizing the Toxicity Interaction of the Binary Mixture Between DMSO and Pesticide by the Multi-Effect Residual Analysis (MERA)	HUO Xiang-chen, LIU Shu-shen, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (257)
Isolation of Quinolofop-p-ethyl-degrading Bacteria from Soil by DGGE-Colony <i>in situ</i> Hybridization	LÜ Xin, PENG Xia-wei, HU Qing, <i>et al.</i> (263)
White-Rot Fungi Combinations Impact on Enzyme Productions	MENG Yao, LIANG Hong, GAO Da-wen (271)
Effects of Different Fertilizer Application on Soil Active Organic Carbon	ZHANG Rui, ZHANG Gui-long, JI Yan-yan, <i>et al.</i> (277)
Effect of Reclamation on the Vertical Distribution of SOC and Retention of DOC	HUO Li-li, ZOU Yuan-chun, GUO Jia-wei, <i>et al.</i> (283)
Distribution Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Composition in <i>Suaeda salsa</i> Wetland in the Yellow River Delta	DONG Hong-fang, YU Jun-bao, GUAN Bo (288)
Study the Restoration Technology of Concentrated Application-Natural Diffusion about Amendments of Acidified Soil of Hilly Woodland	FANG Xiong, LIU Ju-xiu, YIN Guang-cai, <i>et al.</i> (293)
Optimizing Remediation Conditions of Non-thermal Plasma for DDTs Heavily Contaminated Soil	CHEN Hai-hong, LUO Yong-ming, TENG Ying, <i>et al.</i> (302)
Chemical Extraction of Arsenic Co-precipitated with Amorphous Fe(OH) ₃ and Fe ₃ O ₄	CHEN Yi-ping, WANG Shao-feng, JIA Yong-feng (308)
Influence of Aluminum and Manganese on the Growth, Nutrient Uptake and the Efflux by Ectomycorrhizal Fungi	LI Hua, HUANG Jian-guo, YUAN Ling (315)
High-solids Anaerobic Co-digestion of Sludge and Kitchen Garbage Under Mesophilic Conditions	DUAN Ni-na, DONG Bin, LI Jiang-hua, <i>et al.</i> (321)
Preparation, Characterization and Adsorption Performance of High Surface Area Biomass-based Activated Carbons	LI Kun-quan, LI Ye, ZHENG Zheng, <i>et al.</i> (328)
Study on Strategies of Pollution Prevention in Coastal City of Zhejiang Province Based on Scenario Analysis	TIAN Jin-ping, CHEN Lü-jun, DU Peng-fei, <i>et al.</i> (336)
Advance in the Bioavailability Monitoring of Heavy Metal Based on Microbial Whole-cell Sensor	HOU Qi-hui, MA An-zhou, ZHUANG Xiu-liang, <i>et al.</i> (347)
Characteristics of Heavy Metal Contamination in Street Dusts Along the Urban-Rural Gradient Around Beijing	HE Xiao-yan, GU Pei, LI Xu-yong, <i>et al.</i> (357)
Content Trends of Pollutants in Street Dust of Beijing Along the Urban-Rural Gradient and Road Density Gradient	TANG Rong-li, MA Ke-ming, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (364)
Analysis of First Flush Effect of Typical Underlying Surface Runoff in Beijing Urban City	REN Yu-fen, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (373)
Temporal Variation of Water Quality and Driving Factors in Yanghe Watershed of Zhangjiakou	PANG Bo, WANG Tie-yu, LÜ Yong-long, <i>et al.</i> (379)
Research on Carbon Reduction Potential of Electric Vehicles for Low-Carbon Transportation and Its Influencing Factors	SHI Xiao-qing, LI Xiao-nuo, YANG Jian-xin (385)
Investigation of Waste Classification and Collection Actual Effect and the Study of Long Acting Management in the Community of Beijing	DENG Jun, XU Wan-ying, ZHOU Chuan-bin (395)
Problems and Countermeasures in the Application of Constructed Wetlands	HUANG Jin-lou, CHEN Qin, XU Lian-huang (401)

《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)

2013年1月15日 34卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 1 Jan. 15, 2013

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

国内外公开发售