

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第8期

Vol.35 No.8

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

2012年春季京津冀地区一次沙尘暴天气过程中颗粒物的污染特征分析	刘庆阳, 刘艳菊, 赵强, 张婷婷, 张美根, 王存美 (2843)
杭州灰霾天气超细颗粒浓度分布特征	陈秋方, 孙在, 谢小芳 (2851)
气象因素对广州市大气中二噁英污染特征的影响	杜国勇, 苏原, 任明忠, 张素坤, 青宪 (2857)
龙凤山本底站大气 CO ₂ 数据筛分及浓度特征研究	栾天, 周凌晔, 方双喜, 姚波, 王红阳, 刘钊 (2864)
区域传输对华东森林及高山背景点位大气污染物浓度的影响	苏彬彬, 许榕洋, 张若宇, 纪贤鑫 (2871)
天津市夏季蜂窝状溶蚀器涂层溶液浓度确定的实验研究	张诗建, 姬亚芹, 张雷波, 赵雪艳, 朱振宇, 杨文 (2878)
铅锌冶炼厂不同工艺铅元素粒径分布特征	梁俊宁, 李文慧, 葛毅, 陈洁, 宋丽娜, 刘杰 (2883)
KI 改性黏土脱除烟气中单质汞的研究	沈伯雄, 陈建宏, 蔡记, 何川, 李卓 (2890)
污泥直接干化产生的恶臭及挥发性有机物特征研究	陈文和, 邓明佳, 罗辉, 张婧赢, 丁文杰, 刘俊新, 李琳 (2897)
基于风险管理的区域(流域)地下水污染预警方法研究	白利平, 王业耀, 郭永丽, 周友亚, 刘俐, 颜增光, 李发生 (2903)
1980~2010年浙江某典型河流硝态氮通量对净人类活动氮输入的动态响应	张柏发, 陈丁江 (2911)
南京仙林新市区土地利用结构与格局对湿地水环境氮、磷影响研究	蔡春晓, 刘红玉, 李玉凤, 王聪, 侯明行 (2920)
三江平原典型沼泽湿地养分累积与沉积特征	李瑞利, 柴民伟, 邱国玉, 石福臣, Sasa Kaichiro (2928)
岩溶地下河流域表层土壤多环芳烃污染特征及来源分析	蓝家程, 孙玉川, 师阳, 徐昕, 袁道先, 胡宁 (2937)
亚热带典型岩溶区地表溪流水文地球化学昼夜变化及其影响因素研究	张陶, 蒲俊兵, 袁道先, 章程, 何师意, 于爽, 刘文, 莫雪, 周建超, 杨会, 唐伟 (2944)
藏南干旱区湖泊及地热水体氢氧同位素研究	肖可, 沈立成, 王鹏 (2952)
广西五里峡水库夏季溶解无机碳行为的初步研究	刘文, 蒲俊兵, 于爽, 章程, 区绎如, 袁道先, 杨会, 唐伟 (2959)
铜陵相思河流域重金属分布特征研究	陈莉薇, 徐晓春, 王军, 陈芳 (2967)
不同压力作用下太湖蓝藻气囊体积分数及上浮特性研究	王巍, 丛海兵, 徐亚军, 陈雯婧, 徐思涛, 吴军, 蒋新跃 (2974)
酸性条件下Ti(IV)催化 O ₃ /H ₂ O ₂ 降解邻苯二甲酸二甲酯	高燕, 沈佟栋, 陈尧, 周慧华, 童少平 (2980)
无机离子与胡敏酸对零价铁去除水中Pb(II)、Hg(II)的影响	施秋伶, 周欣, 张进忠, 邱昕凯 (2985)
羟基磷灰石-四氧化三铁-沸石复合材料制备及去除水中刚果红研究	方巧, 林建伟, 詹艳艳, 杨孟娟, 郑雯婧 (2992)
不锈钢 201、304 和 316L 在模拟污水管道反应器中的腐蚀	鲍国栋, 左剑恶, 王雅娟, 千里里 (3002)
微滤过程中腐殖酸与膜表面黏附特性的试验研究	王磊, 王磊, 黄丹曦, 王旭东 (3007)
不同类型 LDHs 对垂直流人工湿地无烟煤基质的覆膜改性及其脱氮效果研究	张翔凌, 郭露, 陈俊杰, 刘小婷, 徐璐, 陈巧珍, 王晓晓 (3012)
SPG 膜曝气-基因工程菌生物膜反应器处理阿特拉津废水研究	刘春, 龚鹏飞, 肖太民, 张明, 年永嘉, 杨景亮, 张晶 (3018)
SPG 膜微气泡曝气生物膜反应器运行性能影响因素研究	张磊, 张明, 刘春, 张静, 刘俊良 (3024)
曝气膜生物反应器运行过程中污泥活性特征变化及其对膜污染的影响	陈烜, 汤兵, 张姿, 宾丽英, 黄绍松, 付丰连, 邱兵 (3031)
限量曝气进水时间对硝化颗粒污泥的影响特性研究	刘文如, 阴芳芳, 王建芳, 沈耀良 (3038)
UASBB 厌氧氨氧化反应器处理污泥脱水液的影响因素研究	李亚峰, 马晨曦, 张驰 (3044)
开封周边地区地表灰尘中汞背景值及其应用	陈彦芳, 马建华, 董运武, 刘德新, 陈星 (3052)
北京市幼儿园地面尘中有毒金属浓度及其健康风险	段恒轶, 吴亚涛, 王珏, 刘兆荣 (3060)
珠三角电子垃圾和城市地区家庭灰尘中多氯联苯的来源及暴露风险	朱智成, 陈社军, 丁南, 王璟, 罗孝俊, 麦碧娴 (3066)
温带典型草原土壤总有机碳及溶解性有机碳对模拟氮沉降的响应	齐玉春, 彭琴, 董云社, 肖胜生, 孙良杰, 刘欣超, 何亚婷, 贾军强, 曹丛丛 (3073)
不同肥料种类对稻田红壤碳氮淋失的影响	刘希玉, 邹敬东, 徐丽丽, 张心昱, 杨风亭, 戴晓琴, 王忠强, 孙晓敏 (3083)
低分子有机酸对土壤中 Cu 化学形态的影响	黄国勇, 付庆灵, 朱俊, 万田英, 胡红青 (3091)
EDTA 与柠檬酸复配洗涤修复多重金属污染土壤效果研究	尹雪, 陈家军, 蔡文敏 (3096)
不同生态系统土壤生化特征及其与土壤呼吸和 N ₂ O 排放的关系	陈玲, 范会, 蒋静艳 (3102)
黄河口不同恢复阶段湿地土壤 N ₂ O 产生的不同过程及贡献	孙文广, 孙志高, 甘卓亭, 孙万龙, 王伟 (3110)
猪粪化肥配施对双季稻田 CH ₄ 和 N ₂ O 排放及其全球增温潜势的影响	王聪, 沈健林, 郑亮, 刘杰云, 秦红灵, 李勇, 吴金水 (3120)
我国北方两地区环境臭氧浓度对矮菜豆生长的影响	袁相洋, 张巍巍, 孙敬松, 胡恩柱, 张玉龙, 张红星, 田媛, 冯兆忠 (3128)
丛枝菌根影响纳米 ZnO 对玉米的生物效应	王卫中, 王发园, 李帅, 刘雪琴 (3135)
丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响	李霞, 彭霞薇, 伍松林, 李志茹, 冯红梅, 江泽平 (3142)
含磷物质对水稻吸收土壤砷的影响	雷鸣, 曾敏, 廖柏寒, 胡立琼, 周航, 龙水波 (3149)
重金属铬(VI)的生态毒性及其土壤环境基准	王晓南, 刘征涛, 王婉华, 张聪, 陈丽红 (3155)
维生素 B ₁₂ 对脱氮功能蓝藻降解 2,4,4'-三氯联苯的促进作用研究	刘嘉裕, 肖文丰, 鲁莉萍, 张杭君 (3162)
己烯雌酚降解菌株沙雷氏菌的分离鉴定及其降解特性	徐冉芳, 孙敏霞, 刘娟, 汪泓, 李欣, 朱雪竹, 凌婉婷 (3169)
多溴联苯醚在市場鲫鱼体内分布和食鱼暴露量	王俊霞, 王春艳, 刘莉莉, 周啸宇, 刘洋成, 林匡飞 (3175)
稀有鮐鲫 HMGR 基因全长克隆及雄鱼经五氯酚暴露基因表达的分析	邓川, 毛思予, 熊力, 张晓峰, 李伟, 高香, 刘秋萍, 陈韵, 刘堰 (3183)
藻细胞和高岭土的存在对病毒 MS2 存活的影响	何强, 吴庆庆, 马红芳, 周真明, 苑宝玲 (3192)
多胺功能化介孔炭对 Pb(II) 的吸附动力学与机制	李坤权, 王艳锦, 杨美蓉, 朱志强, 郑正 (3198)
生物活性炭投加量对垃圾渗滤液处理效果的影响	崔延瑞, 郭焱, 吴青, 马罗丹, 孙剑辉, 崔凤灵 (3206)
经济结构调整的污染减排效应: 以 COD 减排为例	李名升, 周磊, 陈远航, 李茜, 张建辉 (3212)
中国铅流改变原因分析	马兰, 毛建素 (3219)
放牧阉牦牛提前出栏甲烷排放强度减排潜力探讨	汪诗平, Andreas Wilkes, 汪亚运, 白玲 (3225)
中国水体硝酸盐氮氧双稳定同位素溯源研究进展	徐志伟, 张心昱, 于贵瑞, 孙晓敏, 温学发 (3230)
《环境科学》征稿简则 (2936) 《环境科学》征订启事 (3051) 信息 (2882, 2927, 3059, 3218)	

丛枝菌根对翅荚木生长及吸收累积重金属的影响

李霞¹, 彭霞薇^{1,2*}, 伍松林², 李志茹¹, 冯红梅¹, 江泽平³

(1. 北京林业大学生物科学与技术学院, 北京 100083; 2. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 3. 中国林业科学院林业研究所, 北京 100091)

摘要: 针对湖南某铅锌矿区土壤重金属污染严重问题, 采用温室盆栽的方法, 以该矿区污染土壤为基质, 先锋植物翅荚木 (*Zenia insignis* Chun) 为宿主植物, 研究摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*, Gm) 和根内球囊霉 (*G. intraradices*, Gi) 两种丛枝菌根 (Arbuscular Mycorrhizal, AM) 真菌对翅荚木生长和吸收累积重金属的影响。结果表明, 重金属污染条件下, 两种 AM 真菌均能与翅荚木形成良好的共生关系, 且 AM 真菌能够显著促进植物吸收磷, 增加植物生物量, 同时改变植物重金属吸收及分配。总体来说, AM 降低了翅荚木体内 Fe、Cu、Zn 和 Pd 浓度, 同时增加了 Fe、Cu、Zn 和 Pd 累积量。而两种 AM 真菌对植物体内重金属分配影响并不相同, 而且受重金属种类影响, 接种 Gi 降低了植物 Fe、Zn 和 Pb 的 TF 值, 而接种 Gm 对植物 Zn 和 Pb 的 TF 值无影响, 两种 AM 真菌对植物 Cu 的 TF 值均无影响, 表明 Gi 具有能够强化翅荚木根系固持 Fe、Zn 和 Pb 的能力。本研究表明, AM 真菌在翅荚木适应重金属污染中起着重要的积极作用, 因而在重金属污染土壤的植物修复中具有极高的潜在应用价值, 但在具体应用中需考虑菌种和植物组合及重金属类型等因素。

关键词: 丛枝菌根真菌; 翅荚木; 重金属污染; 植物固定; 植物修复

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)08-3142-07 DOI: 10.13227/j.hjks.2014.08.043

Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of *Zenia insignis* Chun Seedlings

LI Xia¹, PENG Xia-wei^{1,2}, WU Song-lin², LI Zhi-ru¹, FENG Hong-mei¹, JIANG Ze-ping³

(1. College of Biological Sciences and Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 2. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: To solve the trace metal pollution of a Pd/Zn mine in Hunan province, a greenhouse pot experiment was conducted to investigate the effect of two arbuscular mycorrhizal fungi, *Glomus mosseae* (Gm) and *Glomus intraradices* (Gi), on the growth, heavy metal uptake and accumulation of *Zenia insignis* Chun, the pioneer plant there. The results showed that symbiotic associations were successfully established between the two isolates and *Z. insignis* in heavy metal contaminated soil. AM fungi improved P absorption, biomass and changed heavy metal uptake and distribution of *Z. insignis*. AM fungi-inoculated plants had significantly lower Fe, Cu, Zn, Pd concentrations and higher Fe, Cu, Zn, Pd accumulation than non-inoculated plants. However, Gm and Gi showed different mycorrhizal effects on the distribution of heavy metal in hosts, depending on the species of heavy metal. Gi-inoculated *Z. insignis* showed significantly lower TF values of Fe, Zn, Pd than Gm and non-inoculated plants, while both strains had no effect on TF value of Cu, which indicated that Gi enhanced trace metal accumulation in root system, playing a filtering/sequestering role in the presence of trace metals. The overall results demonstrated that AM fungi had positive effect on *Z. insignis* in enhancing the ability to adapt the heavy metal contaminated soil and played potential role in the revegetation of heavy metal contaminated soil. But in practical application, the combination of AM, hosts and heavy metal should be considered.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi; *Zenia insignis* Chun; trace metal pollution; phytostabilization; phytoremediation

随着人类活动的日益增加, 越来越多的重金属及其化合物被排放到环境中, 这使得重金属污染成为世界性问题^[1]。采矿和大量化学农药的使用加剧了土壤重金属的含量, 这些重金属在环境中具有化学活性, 从而增加了其在生物体内的迁移率和生物利用率, 因此, 重金属更易通过不同的途径进入食物链, 进而威胁人类健康。

生物修复是指在一定条件下利用植物、动物和微生物吸收、降解、转化土壤和水体中的污染物,

使环境中的污染物浓度降低到可接受的水平^[2]。生物修复以其高效低耗、保持水土和美化环境等诸多优点越来越受到环境学家的青睐, 植被恢复是目前国内外采取的主要措施^[3]。由于污染土壤的重金属

收稿日期: 2014-03-18; 修订日期: 2014-04-04

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAC09B03); 中央高校基本科研业务费专项(TD2012-03)

作者简介: 李霞(1989~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境生物技术, E-mail: lixiahe299@163.com

* 通讯联系人, E-mail: pengxw@bjfu.edu.cn

浓度一般很高,土壤理化环境特殊,导致用于植物修复的植物生长受到胁迫而生物量小,其修复效率偏低^[4,5]。在自然生态系统中,植物往往与土壤微生物有密切关系。在众多的土壤微生物中,丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌是一类普遍存在的土壤共生真菌,其中的球囊霉属 AM 真菌能够与大多数陆生植物形成互惠共生体^[6]。AM 共生体能够促进宿主植物对矿质营养的吸收,增强逆境中宿主植物的抗逆性,提高超累积植物的生物量^[7],因而在提高植物修复效率方面具有较高的价值。

翅荚木(*Zenia insignis* Chun)是我国特有的珍稀、速生、多功能树种,其适应性强,可作为我国西南各省石漠化治理及困难地造林的先锋树种。Zhao 等^[8]研究表明,翅荚木作为湖南铅锌矿的先锋植物,体内 Zn 浓度高达 $1\ 968\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,表现出较强的 Zn 提取能力,在尾矿的生物修复方面有着较大潜力。但是目前为止,关于 AM 真菌对其重金属修复能力的影响尚鲜见报道。而且,不同 AM 真菌对植物生长及吸收累积重金属的影响往往不同,因而从应用角度考虑,有必要比较研究不同菌种对翅荚木生长及重金属吸收的影响。本研究以湖南铅锌矿区重金属污染土壤为基质,采用室内盆栽实验的方法,选用摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, Gm)和根内球囊霉(*G. intraradices*, Gi)两种典型丛枝菌根(arbuscular mycorrhizal, AM)真菌,分析了重金属污染下,AM 真菌对翅荚木生物量及重金属吸收累积的影响,以期为重金属污染土壤的植物-AM 真菌联合修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

实验用土取自湖南资兴某铅锌尾矿区,风干后,过 2 mm 筛,备用。其理化性质如下:pH 值 5.75(基质与水质比为 1:2.5);有机质 $22.14\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$;有效磷 $6.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (NaHCO_3 提取)。采用王水-高氯酸消化土壤后,全谱直读等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定重金属含量如下,Pd: $4\ 109\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Zn: $856\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Cu: $63\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;Fe: $36\ 058\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试植物

翅荚木种子由中国林业科学院林业研究所提供。种子用 10% 过氧化氢表面消毒 15 min,蒸馏水反复冲洗后,80℃ 蒸馏水浸泡 3~5 min,搅拌使其自然冷却后,常温浸泡 24 h,浸泡过程中每隔 12 h 换一次水,放入铺有灭菌纱布的玻璃培养皿中,28℃ 催芽,种子露白即可播种。

1.3 AM 真菌

实验所用 AM 真菌为摩西球囊霉(*Glomus mosseae*, BGC XZ02A)和根内球囊霉(*Glomus intraradices*, BGC HEB07D),菌种购买自北京市农林科学院营养与资源所微生物室。

1.4 实验设计

圆形塑料花盆作为培养容器(上口径 15 cm × 下口径 10.5 cm × 高度 13 cm),每盆装 1.5 kg 供试土壤,采用层施法将 10 g 菌剂均匀撒在土壤表面,再在其上覆 1 cm 厚土。每盆播种发芽翅荚木种子 6 粒,待出苗 5 d 后间苗,每盆保留 3 株长势相近的植株。设接种灭活 AM 真菌为对照(CK)、接种 Gm(Gm)和接种 Gi(Gi)为实验组,每个处理设 5 个重复,共计 15 盆。

实验在北林科技温室内进行,采用自然光照,每天定时为植物补水,植物生长 10 周后收获。

1.5 样品测定与分析

收获时,利用直接测量法分别测定植株株高和根长,将翅荚木自茎基部剪下,分别收获地上部和地下部,用自来水冲洗干净,再用蒸馏水反复冲洗,后取出部分根系,将须根剪成 1 cm 长根段,用于测定菌根侵染率。将根段用 0.5% 乳酸酚曲利苯蓝染色^[9]后制片观察,用根段频数法测定侵染率。另一部分根系与地上部一同于 70℃ 烘干至恒重。

不锈钢粉碎机粉碎后,取一定重量植物样品于 160℃ 用优级纯 HNO_3 消解,全谱直读等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定重金属含量。

1.6 数据分析

TF 值 = 地上部重金属浓度/地下部重金属浓度;BCF 值 = 地上部重金属浓度/土壤重金属浓度,所有数据均使用 SPSS17.0 软件进行 Duncan 分析,差异显著水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 接种 AM 真菌对菌根侵染率及植物生物量的影响

从表 1 可以看出,对照组 AM 真菌菌根侵染率为 0,Gm 和 Gi 侵染率分别为 42% 和 20%,两菌之间差异达到显著水平($P < 0.05$)。与对照组相比,接种 Gi 和 Gm 均显著增加了翅荚木地上部和地下部生物量($P < 0.05$),而两菌间差异不显著。此外,接种 Gm 和 Gi 均增加了翅荚木根长,而 Gm 表现尤为显著($P < 0.05$)。接种 AM 真菌对翅荚木的株高没有影响。

表 1 接种 AM 真菌对翅荚木菌根侵染率和生物量的影响¹⁾

Table 1 Effect of AM inoculation on the mycorrhizal colonization and biomass of *Z. insignis*

接种处理	地上部生物量/g	地下部生物量/g	株高/cm	根长/cm	侵染率/%	根冠比
CK	0.116 8±0.007 0b	0.015 5±0.001 6b	14.2±1.3a	2.2±0.8b	0c	0.13±0.01a
Gm	0.255 9±0.051 5a	0.036 2±0.008 2a	14.6±2.6a	8.3±3.2a	42±11a	0.14±0.04a
Gi	0.265 5±0.030 0a	0.045 8±0.004 6a	14.1±0.8a	5.1±0.7ab	20±5b	0.17±0.01a

1) 表中数据为 5 次重复的平均值±标准误差,同一列中不同字母表示在 $P<0.05$ 显著水平差异显著

2.2 接种 AM 真菌对翅荚木 P 吸收的影响

由图 1(e) 可见,与对照组相比,接种 Gi 翅荚木地上部 P 浓度显著增加($P<0.05$),接种 Gm 对地上部 P 浓度无影响. 接种 Gm 和 Gi 均显著增加了翅荚木地下部 P 浓度($P<0.05$),而两菌之间差

异不显著. 由图 2(e) 可以看出,接种 Gi 和 Gm 可显著提高翅荚木地上部和地下部 P 累积量,且两菌间差异显著($P<0.05$). 两种 AM 真菌显著提高了翅荚木植株内 P 的总量(表 3),但两菌间差异不显著.

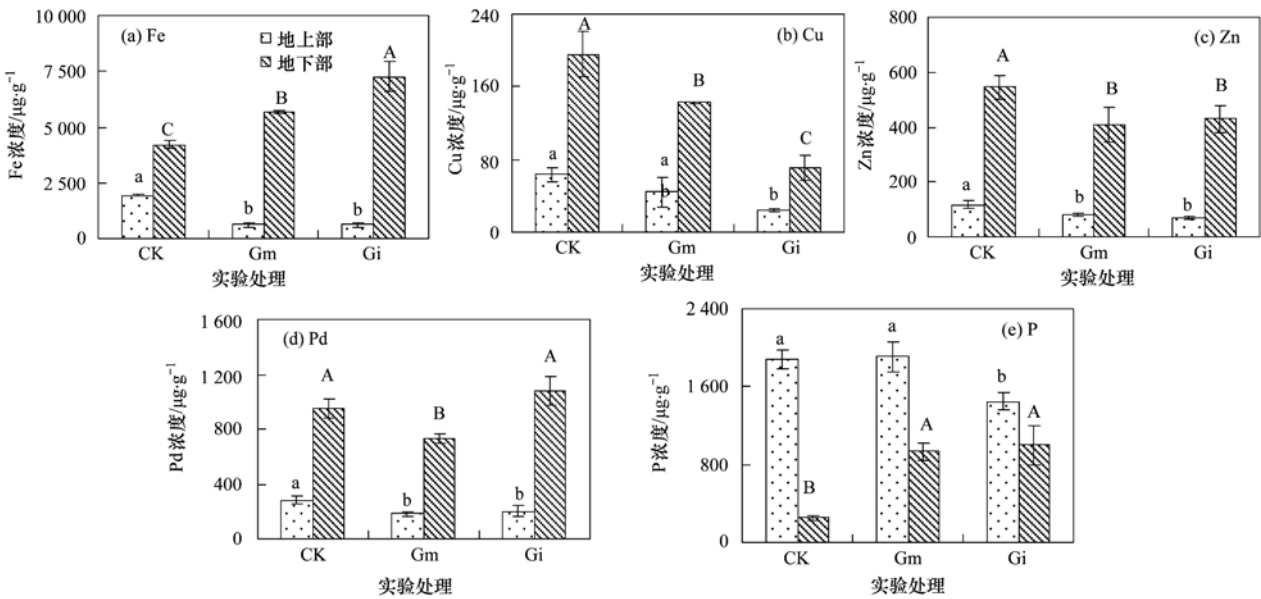


图 1 AM 真菌对翅荚木地上部和地下部各重金属和 P 浓度的影响

Fig. 1 Effect of AM fungi inoculation on concentrations of Fe, Cu, Zn, Pd and P in shoots and roots of *Z. insignis*

2.3 接种 AM 真菌对翅荚木植株内重金属浓度的影响

与对照相比,接种两种 AM 真菌对翅荚木地上部和地下部各种重金属浓度均有一定的影响,但影响效果不同,具体见图 1. 与对照相比,接种 Gi 和 Gm 使翅荚木地上部 Fe 的浓度分别下降 69% 和 68%,两菌间无显著差异,却使地下部 Fe 浓度分别升高 72% 和 35%,Gi 的接种效果更好. 相对于对照组,接种 Gm 使翅荚木地上部和地下部 Cu 浓度分别下降了 30% 和 27%,接种 Gi 使翅荚木地上部和地下部 Cu 浓度分别下降 62% 和 64%,两菌间存在显著性差异($P<0.05$). 两种 AM 真菌对于 Zn 浓度也有类似影响,但两菌间无显著差异. 接种 Gm 可显著降低翅荚木地上部及地下部 Pd 浓度($P<0.05$),而接种 Gi 仅降低植株地上部 Pd 浓度,对地下部 Pd

浓度无影响.

2.4 AM 真菌对翅荚木植株内重金属分配的影响

TF 值即转移系数,表示重金属在植株体内的转运率;BCF 值即生物富集因子,是描述重金属在植物体内累积趋势的重要指标. 与对照组相比,接种 Gm 对 Cu、Zn、Pd 的 TF 值无显著影响(表 2),但其显著降低了 Fe 的 TF 值($P<0.05$). 接种 Gi 显著降低了 Zn、Pd、Fe 的 TF 值,且效果优于 Gm ($P<0.05$). 接种 AM 真菌后,4 种重金属的 BCF 值显著减小 ($P<0.05$)(表 2),但两菌间差异不显著.

2.5 接种 AM 真菌对翅荚木植株内重金属累积量的影响

由图 2 可以看出,接种 Gi 和 Gm 可显著提高翅荚木地下部 Fe 的累积量($P<0.05$),且两菌间差异显著. 接种 Gm 后,翅荚木地上部及地下部 Cu 累积

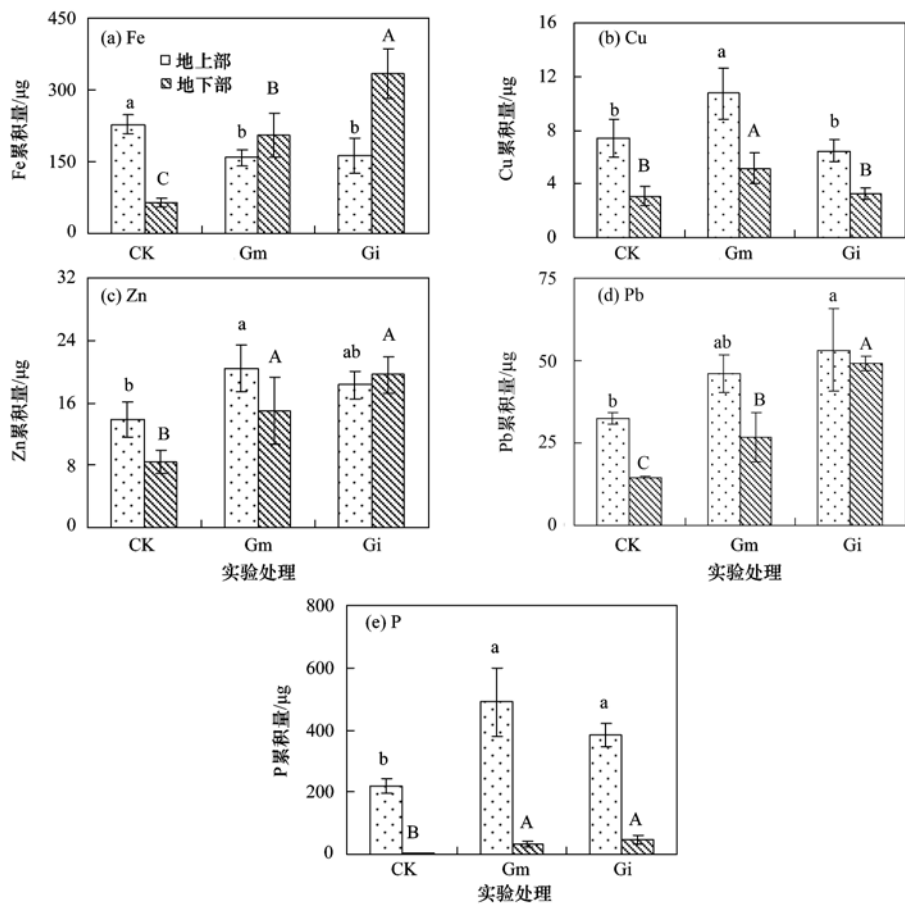


图2 接种AM真菌对翅荚木地上部和地下部各重金属及P累积量的影响

Fig. 2 Effect of AM fungus inoculation on accumulation of Fe, Cu, Zn, Pd and P in shoots and roots of *Z. insignis*

表2 两种AM真菌对各重金属TF值及BCF值的影响¹⁾

Table 2 Effect of AM fungi on the TF value and BCF value of trace metals					
项目	实验处理	Cu	Zn	Pd	Fe
TF 值	CK	0.32a	0.22b	0.29b	0.46c
	Gm	0.31a	0.20b	0.25b	0.11b
	Gi	0.35a	0.16a	0.19a	0.08a
BCF 值	CK	0.10a	0.14a	0.07a	0.005a
	Gm	0.70ab	0.09b	0.04b	0.002b
	Gi	0.38b	0.08b	0.05b	0.002b

1) TF 值 = 地上部重金属浓度/地下部重金属浓度; BCF 值 = 地上部重金属浓度/土壤重金属浓度; 表中数据为 5 次重复的平均值,同一列中不同字母表示在 $P < 0.05$ 显著水平差异显著

量增加,而接种 Gi 对翅荚木地上部及地下部 Cu 的累积量均无影响. 接种 Gi 和 Gm,翅荚木地上部及地下部 Zn 累积量显著提高($P < 0.05$),两菌间无显著差异. 两种 AM 真菌对 Pd 累积量有类似的影响,

但两菌间存在显著差异($P < 0.05$). 相对于对照组,接种 Gi 使翅荚木植株内 Fe 的总量显著增加($P < 0.05$)(表 3),而接种 Gm 对其无影响. 与对照及接种 Gi 相比,接种 Gm 明显促进了

表3 两种AM真菌对翅荚木植株内各重金属总量的影响¹⁾/μg

Table 3 Effect of AM fungi on the total content of trace metals in <i>Z. insignis</i> /μg					
实验处理	Fe 总量	Cu 总量	Zn 总量	Pd 总量	P 总量
CK	293.24 ± 28.85b	10.49 ± 2.13b	22.31 ± 3.79b	47.16 ± 1.31c	224.11 ± 25.69b
Gm	363.73 ± 38.96b	15.90 ± 1.12a	41.09 ± 8.88a	72.70 ± 10.40b	523.46 ± 105.96a
Gi	494.95 ± 88.40a	9.66 ± 1.15b	37.88 ± 3.87a	102.26 ± 14.42a	429.72 ± 44.69a

1) 表中数据为 5 次重复的平均值 ± 标准误差,同一列中不同字母表示在 $P < 0.05$ 显著水平差异显著

翅莢木对 Cu 的吸收. 接种 Gi 和 Gm 后,翅莢木植株内 Zn 的总量显著高于对照组 ($P < 0.05$),两菌间差异不显著. 两种 AM 真菌对 Pd 总量也有相似的影响,其中,接种 Gi 使得 Pd 总量增加了 168%,与接种 Gm 间存在显著差异 ($P < 0.05$).

3 讨论

3.1 AM 真菌对翅莢木生长及磷吸收的影响

有研究表明土壤重金属对宿主植物生长有明显的抑制作用,尤其是对根系生长的不利较为明显^[10],本研究中,接种 AM 真菌后,翅莢木的生物量显著提高(尤其是地下部生物量),表明 AM 真菌提高了翅莢木对重金属胁迫的耐受性. AM 促进植物生长的一个重要原因是其能够促进植物吸收磷. 重金属污染土壤中, Cu^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pd^{2+} 等离子都可与磷酸根发生反应,使土壤溶液中磷酸根的有效性降低,造成植物吸 P 困难^[2]. 而 P 作为必需的大量矿质营养,在植物的生长过程中有着重要的作用. 菌根化通常能促进宿主植物对 P 的吸收,其途径主要有两条,第一,通过根表皮及假根中的高效 P 转运系统^[11],第二,通过大量真菌菌丝介导 P 向宿主的运输^[12]. 此外,AM 也能够活化根际土壤中难溶态磷,增加磷的可利用性. Chu^[13]的研究也发现丛枝的形成能够激活 P 转运系统而提高寄主对 P 的吸收,有利于重金属污染土壤中植被的生长. 本研究及 De Andrade 等^[14]结果也表明接种 AM 真菌后宿主植物对 P 的吸收增加,生物量提高,对重金属的耐性增强.

在重金属条件下,Gi 和 Gm 都成功侵染了翅莢木根系,这表明两种 AM 真菌对重金属有一定的抗性. 研究结果显示,尽管 Gm 对翅莢木的侵染率高于 Gi,但是两者对翅莢木生物量的提高及 P 吸收的影响却没有显著差异,可见,AM 功能并不一定与侵染率成正相关性. 相关研究也表明即使不同的 AM 真菌对同一宿主植物的侵染率相似,其功能也会大不相同. 例如,侵染率极低但是有大量根外菌丝的 AM 真菌可以与侵染率高的 AM 真菌产生同样的促生效果^[15,16].

3.2 接种 AM 真菌对翅莢木重金属吸收及分配的影响

研究结果表明,接种 Gi 和 Gm,翅莢木地上部 Fe 含量降低,地下部的 Fe 显著增加,这与王小雪^[17]及孟芳^[18]关于 AM 真菌对杨梅和树莓植物 Fe 吸收影响效果的报道一致. 接种 AM 真菌的翅莢

木,地上部及地下部 Cu、Zn、Pd 含量明显降低,缓解了重金属对翅莢木的毒害. 诸多研究表明 AM 真菌降低宿主植物内重金属的浓度^[19,20],如钟伟良^[21]的实验结果也证实在土壤铅的浓度较高时($1\,000\,\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、 $1\,500\,\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),AM 真菌显著减少了根中 Pd 的浓度.

虽然植株体内重金属浓度降低,但是地上部和地下部中 Fe、Cu、Zn、Pd 累积量明显升高,这主要是因为 AM 显著增加了植物生物量,“稀释”了植物体内的重金属,称为“稀释效应”^[15].

接种 Gm 和 Gi,Fe、Cu、Zn、Pd 这 4 种金属元素的 TF 值明显增加,BCF 值均显著降低,揭示了 AM 真菌抑制了上述几种重金属元素向植物地上部转移,使重金属固持在翅莢木地下部. AM 真菌以其强大的菌丝网络固持大量重金属^[22~24],AM 同时能够增加植物根部一些金属螯合物的含量^[25,26],进而与重金属在根部结合,抑制重金属的转运. 此外,在 AM 根系中,重金属可能都固持在真菌结构中,如根内菌丝、丛枝、泡囊等,从而减少重金属向植物细胞转移,该机制称为“区隔化”作用. 然而,两种 AM 真菌均使得 Zn 和 Pd 在植株地上部累积量高于地下部累积量,这可能是由于植株根冠比小,地上部生物量明显高于地下部生物量,因此导致重金属在地上部累积量高^[10].

翅莢木在高浓度重金属土壤中能够生存,表明其具有较强重金属耐性,具有应用于重金属污染土壤植物修复的潜在价值. 菌根化翅莢木较不接种 AM 真菌翅莢木有更大的生物量和矿质营养吸收能力,而且降低了翅莢木重金属浓度,同时增加了翅莢木重金属累积量,这与其他学者关于 AM 真菌对他种植物与重金属影响的研究结果是一致的^[14,27],说明,AM 真菌联合翅莢木在矿区重金属污染土壤植物提取修复中有着较高的潜力.

本研究同时也验证了 AM 真菌对植物吸收分配重金属的影响因重金属及 AM 菌种不同而异^[28,29]. 两种 AM 真菌通过固持作用增强了翅莢木对 Fe、Pd、Zn 污染物的吸收与累积,其中 Gi 作用优于 Gm,而 Gi 对翅莢木吸收累积 Cu 并没有影响. 可见菌根共生体重金属耐性及吸收累积特性是由不同 AM 菌种的特性、菌种与植物的结合特性及金属元素的特征决定的^[30]. 罗巧玉等^[2]也曾指出 AM 真菌对植物的保护作用因 AM 真菌种类、重金属种类、重金属离子形式和浓度、生长基质(pH、氧化还原状况、质地、有机质含量、根系分泌物、根际

微生物和根际矿物质等)及外界环境条件等因素而异. 因而,在具体应用中应充分考虑到污染地重金属种类、土壤理化性质、AM 真菌菌种、植物种类等因素,以最大程度发挥菌根作用.

本研究证明了在矿区原位重金属污染土壤的条件下,AM 能够促进翅荚木生长,同时改变翅荚木对重金属的吸收和分配,揭示了翅荚木联合 AM 真菌修复重金属污染土壤的潜在价值. 但本研究所采用的翅荚木为乔木,其生长期一般较长,研究着重探究了翅荚木生长初期菌根的作用,而这种积极作用是否会随着植株生长期的变化而变化还需要进一步研究. 此外,AM 真菌增强翅荚木重金属耐性的机制还有待深入研究.

4 结论

(1)重金属污染下,两种 AM 真菌均与翅荚木建立了良好的共生关系,促进了翅荚木的生长,尤其是根的生长.

(2)重金属污染下,两种 AM 真菌均能够促进翅荚木对磷的吸收,从而增强植物生长.

(3)总体来说,AM 降低了翅荚木体内 Fe、Cu、Zn 和 Pd 浓度,同时增加了 Fe、Cu、Zn 和 Pd 累积量. 但 AM 真菌对翅荚木重金属的吸收累积因金属元素及菌种的不同而异.

致谢:本研究在土样采集过程中得到了中国林业科学院崔明博士的帮助,在此表示感谢.

参考文献:

- [1] Hassan S E, Hijri M, St-Arnaud M. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on trace metal uptake by sunflower plants grown on cadmium contaminated soil [J]. *New Biotechnology*, 2013, **30**(6): 780-783.
- [2] 罗巧玉, 王晓娟, 林双双, 等. AM 真菌对重金属污染土壤生物修复的应用与机理 [J]. *生态学报*, 2013, **33**(13): 3898-3906.
- [3] 赵仁鑫, 郭伟, 付瑞英, 等. 丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用 [J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4447-4454.
- [4] Cunningham S D, Ow D W. Promises and prospects of phytoremediation [J]. *Plant Physiology*, 1996, **110**(3): 715-719.
- [5] Krämer U. Phytoremediation: novel approaches to cleaning up polluted soils [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2005, **16**(2): 133-141.
- [6] Long L K, Yao Q, Guo J, *et al.* Molecular community analysis of arbuscular mycorrhizal fungi associated with five selected plant species from heavy metal polluted soils [J]. *European Journal of Soil Biology*, 2010, **46**(5): 288-294.
- [7] Leung H M, Wu F Y, Cheung K C, *et al.* Synergistic effects of arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate rock on heavy metal uptake and accumulation by an arsenic hyperaccumulator [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **181** (1-3): 497-507.
- [8] Zhao X L, Liu J F, Xia X L, *et al.* The evaluation of heavy metal accumulation and application of a comprehensive bio-concentration index for woody species on contaminated sites in Hunan, China [EB/OL]. <http://link.springer.com/article/10.1007/s11356-013-2393-3>. 2013-12-28.
- [9] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Transactions British Mycological Society*, 1970, **55**(1): 158-161.
- [10] 刘灵芝, 李培军, 巩宗强, 等. 矿区分离丛枝菌根真菌对万寿菊吸 Cd 潜力影响 [J]. *微生物学通报*, 2011, **38**(4): 575-582.
- [11] de Melo Rangel W, Schneider J, de Souza Costa E T, *et al.* Phytoprotective effect of arbuscular mycorrhizal fungi species against arsenic toxicity in tropical Leguminous species [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2014, **16**(7-8): 840-858.
- [12] Sawers R J, Gutjahr C, Paszkowski U. Cereal mycorrhiza: an ancient symbiosis in modern agriculture [J]. *Trends in Plant Science*, 2008, **13**(2): 93-97.
- [13] Chu E Y. The effect of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation on *Enterpe oleracea* Mart. seedlings [J]. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira*, 1999, **34**(6): 1019-1024.
- [14] de Andrade S A L, da Silveira A P, Jorge R A, *et al.* Cadmium accumulation in sunflower plants influenced by arbuscular mycorrhiza [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2008, **10**(1): 1-13.
- [15] Feddermann N, Finlay R, Boller T, *et al.* Functional diversity in arbuscular mycorrhiza - the role of gene expression, phosphorous nutrition and symbiotic efficiency [J]. *Fungal Ecology*, 2010, **3**(1): 1-8.
- [16] Smith S E, Smith F A, Jakobsen I. Functional diversity in arbuscular mycorrhizal (AM) symbioses: the contribution of the mycorrhizal P uptake pathway is not correlated with mycorrhizal responses in growth or total P uptake [J]. *New Phytologist*, 2004, **162**(2): 511-524.
- [17] 王小雪. 接种丛枝菌根真菌对杨梅幼苗生长及铁素吸收效应的影响 [D]. 重庆: 西南大学, 2013. 29-39.
- [18] 孟芳. 接种 AM 菌根菌对树莓铁素吸收效应的影响研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007. 26-27.
- [19] Orłowska E, Godzik B, Turnau K. Effect of different arbuscular mycorrhizal fungal isolates on growth and arsenic accumulation in *Plantago lanceolata* L. [J]. *Environmental Pollution*, 2012, **168**: 121-130.
- [20] Brito I, Carvalho M, Alho L, *et al.* Managing arbuscular mycorrhizal fungi for bioprotection: Mn toxicity [J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2014, **68**: 78-84.

- [21] 钟伟良. 丛枝菌根真菌对宝山莴苣吸收铅和镉的影响 [D]. 广州: 中山大学, 2012. 32-35.
- [22] Hildebrandt U, Regvar M, Bothe H. Arbuscular mycorrhiza and heavy metal tolerance [J]. *Phytochemistry*, 2007, **68**(1): 139-146.
- [23] Garg N, Chandel S. Role of arbuscular mycorrhizal (AM) fungi on growth, cadmium uptake, osmolyte, and phytochelatin synthesis in *Cajanus cajan* (L.) Millsp. under NaCl and Cd stresses [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2012, **31**(3): 292-308.
- [24] Wang F Y, Wang L, Shi Z Y, *et al.* Effects of AM inoculation and organic amendment, alone or in combination, on growth, P nutrition, and heavy-metal uptake of tobacco in Pb-Cd-contaminated soil [J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2012, **31**(4): 54-559.
- [25] Leyval C, Turnau K, Haselwandter K. Effect of heavy metal pollution on mycorrhizal colonization and function: physiological, ecological and applied aspects [J]. *Mycorrhiza*, 1997, **7**(3): 139-153.
- [26] Steffens J C. The heavy metal-binding peptides of plants [J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1990, **41**: 553-575.
- [27] Toler H D, Morton J B, Cumming J R. Growth and metal accumulation of mycorrhizal sorghum exposed to elevated copper and zinc [J]. *Water Air and Soil Pollution*, 2005, **164**(1-4): 155-172.
- [28] Audet P, Charest C. Dynamics of arbuscular mycorrhizal symbiosis in heavy metal phytoremediation: Meta-analytical and conceptual perspectives [J]. *Environmental Pollution*, 2007, **147**(3): 609-614.
- [29] Bai J F, Lin X G, Yin R, *et al.* The influence of arbuscular mycorrhizal fungi on As and P uptake by maize (*Zea mays* L.) from As contaminated soils [J]. *Applied Soil Ecology*, 2008, **38**(2): 137-145.
- [30] Liang C C, Li T, Xiao Y P, *et al.* Effect of inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi on maize grown in multi-metal contaminated soils [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, **11**(8): 692-703.

CONTENTS

Chemical Characteristics in Airborne Particulate Matter (PM ₁₀) During a High Pollution Spring Dust Storm Episode in Beijing, Tianjin and Zhangjiakou, China	LIU Qing-yang, LIU Yan-ju, ZHAO Qiang, <i>et al.</i> (2843)
Distribution of Atmospheric Ultrafine Particles During Haze Weather in Hangzhou	CHEN Qiu-fang, SUN Zai, XIE Xiao-fang (2851)
Effect of Meteorological Factors on Characteristics of PCDD/F Pollution in Guangzhou	DU Guo-yong, SU Yuan, REN Ming-zhong, <i>et al.</i> (2857)
Atmospheric CO ₂ Data Filtering Method and Characteristics of the Molar Fractions at the Longfengshan WMO/GAW Regional Station in China	LUAN Tian, ZHOU Ling-xi, FANG Shuang-xi, <i>et al.</i> (2864)
Influence of Atmospheric Transport on Air Pollutant Levels at a Mountain Background Site of East China	SU Bin-bin, XU Ju-yang, ZHANG Ruo-yu, <i>et al.</i> (2871)
Determining the Concentration of Coating Solution Attaching to Honeycomb Denuder in Summer in Tianjin	ZHANG Shi-jian, JI Ya-qin, ZHANG Lei-bo, <i>et al.</i> (2878)
Characterization of Lead Size Distributions with Different Process in Lead-Zinc Smelter	LIANG Jun-ning, LI Wen-hui, GE Yi, <i>et al.</i> (2883)
Effect of KI Modified Clay on Elemental Mercury Removal Efficiency	SHEN Bo-xiong, CHEN Jian-hong, CAI Ji, <i>et al.</i> (2890)
Characteristics of Odors and VOCs from Sludge Direct Drying Process	CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, LUO Hui, <i>et al.</i> (2897)
Research of Early-warning Method for Regional Groundwater Pollution Based on Risk Management	BAI Li-ping, WANG Ye-yao, GUO Yong-li, <i>et al.</i> (2903)
Dynamic Response of Riverine Nitrate Flux to Net Anthropogenic Nitrogen Inputs in A Typical River in Zhejiang Province over the 1980-2010 Period	ZHANG Bai-fa, CHEN Ding-jiang (2911)
Research on the Influence of Urban Land Use Structure and Pattern on Nitrogen, Phosphorus of Wetland Water Environment in Xianlin New Town of Nanjing	CAI Chun-xiao, LIU Hong-yu, LI Yu-feng, <i>et al.</i> (2920)
Profile Nutrient Distribution and Sedimentary Characteristics in Typical Marshes of Sanjiang Plain	LI Rui-li, CHAI Min-wei, QIU Guo-yu, <i>et al.</i> (2928)
Source and Contamination of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Surface Soil in Karst Underground River Basin	LAN Jia-cheng, SUN Yu-chuan, SHI Yang, <i>et al.</i> (2937)
Diel Variations of Hydrochemistry and Influencing Factors in a Surface Stream in Subtropical Karst Area, SW China	ZHANG Tao, PU Jun-bing, YUAN Dao-xian, <i>et al.</i> (2944)
Hydrogen and Oxygen Isotopes of Lake Water and Geothermal Spring Water in Arid Area of South Tibet	XIAO Ke, SHEN Li-cheng, WANG Peng (2952)
Preliminary Research on the Feature of Dissolved Inorganic Carbon in Wulixia Reservoir in Summer, Guangxi, China	LIU Wen, PU Jun-bing, YU Shi, <i>et al.</i> (2959)
Distribution of Heavy Metals in Xiangsi River Valley of Tongling, China	CHEN Li-wei, XU Xiao-chun, WANG Jun, <i>et al.</i> (2967)
Volume Fraction of Gas Vesicle and Floating Characteristics of Cyanobacteria in Taihu Lake Under Different Pressures	WANG Wei, CONG Hai-bing, XU Ya-jun, <i>et al.</i> (2974)
Degradation of Dimethyl Phthalate by Ti(IV)-catalyzed O ₃ /H ₂ O ₂ Under Acidic Conditions	GAO Yan, SHEN Tong-dong, CHEN Yao, <i>et al.</i> (2980)
Influence of Inorganic Ions and Humic Acid on the Removal of Pb(II) and Hg(II) in Water by Zero-Valent Iron	SHI Qiu-ling, ZHOU Xin, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (2985)
Synthesis of Hydroxyapatite/Magnetite/Zeolite Composite for Congo Red Removal from Aqueous Solution	FANG Qiao, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (2992)
Corrosion of Stainless Steel 201, 304 and 316L in the Simulated Sewage Pipes Reactor	BAO Guo-dong, ZUO Jian-e, WANG Ya-jiao, <i>et al.</i> (3002)
Experimental Study of Adhesion Properties Between Membrane Surface and Humic Acid During Microfiltration	WANG Lei, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (3007)
Coating Modification of Anthracite Substrates in Vertical-flow Constructed Wetlands by LDHs Synthesized from Different Metal Compounds and the Nitrogen Removal Efficiencies	ZHANG Xiang-ling, GUO Lu, CHEN Jun-jie, <i>et al.</i> (3012)
Atrazine Wastewater Treatment in a SPC Membrane-Aerated Genetically Engineered Microorganism Biofilm Reactor	LIU Chun, GONG Peng-fei, XIAO Tai-min, <i>et al.</i> (3018)
Influencing Factors for Operational Performance of a Biofilm Reactor with Microbubble Aeration Using SPG Membrane	ZHANG Lei, ZHANG Ming, LIU Chun, <i>et al.</i> (3024)
Variations in the Active Characteristics of Sludge During the Operation of an Aerobic Membrane Bioreactor and Their Effects on Membrane Fouling	CHEN Xuan, TANG Bing, ZHANG Zi, <i>et al.</i> (3031)
Effects of Anaerobic Feeding Period on Nitrifying Granular	LIU Wen-ru, YIN Fang-fang, WANG Jian-fang, <i>et al.</i> (3038)
Influencing Factors of Sludge Liquor Treatment in UASBB	LI Ya-feng, MA Chen-xi, ZHANG Chi (3044)
Background Values of As and Hg in Surface Dusts in the Vicinity of Kaifeng City and Their Application	CHEN Yan-fang, MA Jian-hua, DONG Yun-wu, <i>et al.</i> (3052)
Concentrations and Health Risks of Toxic Metals in Surface Dust in Kindergartens of Beijing	DUAN Heng-yi, WU Ya-tao, WANG Jue, <i>et al.</i> (3060)
Polychlorinated Biphenyls in House Dust at an E-waste Site and Urban Site in the Pearl River Delta, Southern China; Sources and Human Exposure and Health Risks	ZHU Zhi-cheng, CHEN She-jun, DING Nan, <i>et al.</i> (3066)
Responses of Soil Total Organic Carbon and Dissolved Organic Carbon to Simulated Nitrogen Deposition in Temperate Typical Steppe in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (3073)
Effects of Different Fertilizer Species on Carbon and Nitrogen Leaching in a Reddish Paddy Soil	LIU Xi-yu, ZOU Jing-dong, XU Li-li, <i>et al.</i> (3083)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Speciation of Exogenous Cu in an Acid Soil	HUANG Guo-yong, FU Qing-ling, ZHU Jun, <i>et al.</i> (3091)
Evaluation of Compounding EDTA and Citric Acid on Remediation of Heavy Metals Contaminated Soil	YIN Xue, CHEN Jia-jun, CAI Wen-min (3096)
Soil Biochemical Characteristics in Different Ecological Systems and Their Relationships with Soil Respiration and N ₂ O Emission	CHEN Ling, FAN Hui, JIANG Jing-yang (3102)
Contribution of Different Processes in Wetland Soil N ₂ O Production in Different Restoration Phases of the Yellow River Estuary, China	SUN Wen-guang, SUN Zhi-gao, GAN Zhuo-ting, <i>et al.</i> (3110)
Effects of Combined Applications of Pig Manure and Chemical Fertilizers on CH ₄ and N ₂ O Emissions and Their Global Warming Potentials in Paddy Fields with Double-Rice Cropping	WANG Cong, SHEN Jian-lin, ZHENG Liang, <i>et al.</i> (3120)
Influence of Ozone on Snap Bean Under Ambient Air in Two Sites of Northern China	YUAN Xiang-yang, ZHANG Wei-wei, SUN Jing-song, <i>et al.</i> (3128)
Arbuscular Mycorrhizal Symbiosis Influences the Biological Effects of Nano-ZnO on Maize	WANG Wei-zhong, WANG Fa-yuan, LI Shuai, <i>et al.</i> (3135)
Effect of Arbuscular Mycorrhizae on Growth, Heavy Metal Uptake and Accumulation of <i>Zenia insignis</i> Chun Seedlings	LI Xia, PENG Xia-wei, WU Song-lin, <i>et al.</i> (3142)
Effects of Phosphorus-containing Substances on Arsenic Uptake by Rice	LEI Ming, ZENG min, LIAO Bo-han, <i>et al.</i> (3149)
Ecotoxicological Effect and Soil Environmental Criteria of the Heavy Metal Chromium(VI)	WANG Xiao-nan, LIU Zheng-tao, WANG Wan-hua, <i>et al.</i> (3155)
Promotion Effects of Vitamin B ₁₂ on the Degradation of 2,4,4'-Trichlorobiphenyl by <i>Nostoc</i> PD-2	LIU Jia-yu, XIAO Wen-feng, LU Li-ping, <i>et al.</i> (3162)
Isolation, Identification and Characterization of a Diethylstilbestrol-degrading Bacterial Strain <i>Serratia</i> sp.	XU Ran-fang, SUN Min-xia, LIU Juan, <i>et al.</i> (3169)
Distribution of Polybrominated Diphenyl Ethers in Wild Crucian Carp and Exposure Estimation of Dietary Intake	WANG Jun-xia, WANG Chun-yan, LIU Li-li, <i>et al.</i> (3175)
Cloning of Full-length cDNA of HMGR from <i>Gobiocypris rarus</i> and Analysis of Its Expression Profiles in Male Exposed to Pentachlorophenol	DENG Chuan, MAO Si-yu, XIONG Li, <i>et al.</i> (3183)
Effects of Algae and Kaolinite Particles on the Survival of Bacteriophage MS2	HE Qiang, WU Qing-qing, MA Hong-fang, <i>et al.</i> (3192)
Adsorption Kinetics and Mechanism of Lead(II) on Polyamine-Functionalized Mesoporous Activated Carbon	LI Kun-quan, WANG Yan-jin, YANG Mei-rong, <i>et al.</i> (3198)
Influence of Biological Activated Carbon Dosage on Landfill Leachate Treatment	CUI Yan-rui, GUO Yan, WU Qing, <i>et al.</i> (3206)
Effect of Economic Structure Adjustment on Pollution Emission: A Case Study of COD	LI Ming-sheng, ZHOU Lei, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (3212)
Reasons for the Changes in Anthropogenic Lead Flows of China	MA Lan, MAO Jian-su (3219)
Discussion on Reduction Potential of CH ₄ Emission Intensity for Early Off-take Practice of Grazing Yak	WANG Shi-ping, Andreas Wilkes, WANG Ya-yun, <i>et al.</i> (3225)
Review of Dual Stable Isotope Technique for Nitrate Source Identification in Surface- and Groundwater in China	XU Zhi-wei, ZHANG Xin-yu, YU Gui-rui, <i>et al.</i> (3230)

《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8月15日 第35卷 第8期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 8 Aug. 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