

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第3期

Vol.35 No.3

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

青岛近海生物气溶胶中可培养微生物浓度及群落多样性的季节变化 祁建华, 武丽婧, 高冬梅, 金川 (801)

基于重庆本地碳成分谱的 PM_{2.5} 碳组分来源分析 张灿, 周志恩, 翟崇治, 白志鹏, 陈刚才, 姬亚芹, 任丽红, 方维凯 (810)

重庆市北碚城区大气污染物浓度变化特征观测研究 徐鹏, 郝庆菊, 吉东生, 张军科, 刘子锐, 胡波, 王跃思, 江长胜 (820)

基于气溶胶光学特性垂直分布的一次浮尘过程分析 王苑, 邓军英, 史兰红, 陈勇航, 张强, 王胜, 徐婷婷 (830)

基于悬铃木叶片重金属累积特性的大气污染分析和评价 刘玲, 方炎明, 王顺昌, 谢影, 汪承润 (839)

典型染整企业定型机废气排放特征及潜在环境危害浅析 徐志荣, 王鹏, 王浙明, 许明珠, 吴剑波, 李嫣 (847)

火电厂大气污染物排放标准实施效果的数值模拟研究 王占山, 潘丽波 (853)

国IV天然气公交车实际道路颗粒物排放特性 楼狄明, 成伟, 冯谦 (864)

稻草和玉米秸秆烟尘中的正构脂肪醇 刘刚, 李久海, 吴丹, 徐慧 (870)

河口湿地近地面大气 CO₂ 浓度日变化和季节变化 张林海, 仝川, 曾从盛 (879)

三峡库区库中干流及支流水体夏季二氧化碳分压及扩散通量 李双, 王雨春, 操满, 钱慧君, 许涛, 周子然, 邓兵, 汪福顺 (885)

施用畜禽粪便堆肥的蔬菜地 CH₄、N₂O 和 NH₃ 排放特征 万合锋, 赵晨阳, 钟佳, 葛振, 魏源送, 郑嘉熹, 鄢玉龙, 韩圣慧, 郑博福, 李洪枚 (892)

干湿交替条件下不同晶型铁氧化物对水稻土甲烷排放的影响 张天娇, 汤佳, 庄莉, 熊格生, 刘志, 周顺桂 (901)

长江口邻近海域沉积物中生物硅溶解行为研究 吴彬, 吕伟香, 鲁超, 刘素美 (908)

汾河中下游浮游藻类群落特征及水质分析 王爱爱, 冯佳, 谢树莲 (915)

基于三维荧光光谱-平行因子技术联用的湖泊浮游藻化学分类学研究 陈小娜, 韩秀荣, 苏荣国, 石晓勇 (924)

三峡库区典型消落带土壤及沉积物中溶解性有机质 (DOM) 的紫外-可见光谱特征 李璐璐, 江韬, 闫金龙, 郭念, 魏世强, 王定勇, 高洁, 赵铮 (933)

黄河口湿地表层沉积物中磷赋存形态的分析 于子洋, 杜俊涛, 姚庆祯, 陈洪涛, 于志刚 (942)

太湖和呼伦湖沉积物对磷的吸附特征及影响因素 揣小明, 杨柳燕, 程书波, 陈小锋, 穆云松 (951)

黄浦江溶解有机质光学特性与消毒副产物 NDMA 生成潜能的关系 董倩倩, 张艾, 李咏梅, 陈玲, 黄清辉 (958)

纳米零价铁降解水中多溴联苯醚 (PBDEs) 及降解途径研究 杨雨寒, 徐伟伟, 彭思侃, 卢善富, 相艳, 梁大为 (964)

铸铁还原氯乙酸的影响因素与机制研究 唐顺, 杨宏伟, 王小任, 解跃峰 (972)

磷回收对厌氧/好氧交替式生物滤池蓄磷/除磷的影响 张顺, 田晴, 汤曼琳, 李方 (979)

预处理方法对玉米芯作为反硝化固体碳源的影响 赵文莉, 郝瑞霞, 李斌, 张文怡, 杜鹏 (987)

陶粒 CANON 反应器的接种启动与运行 付昆明, 左早荣, 仇付国 (995)

冬季低温下 MBR 与 CAS 工艺运行及微生物群落特征 黄菲, 梅晓洁, 王志伟, 吴志超 (1002)

烷基多苷促进污泥水解产酸的研究 陈灿, 孙秀云, 黄诚, 沈锦优, 王连军 (1009)

高温厌氧消化中底物浓度对病原指示微生物杀灭的影响 操宏庆, 章菲菲, 李健, 童子林, 胡真虎 (1016)

兰州市大气降尘重金属污染评价及健康风险评价 李萍, 薛粟尹, 王胜利, 南忠仁 (1021)

珠江河口水域有机磷农药水生生态系统风险评价 郭强, 田慧, 毛潇萱, 黄韬, 高宏, 马建民, 吴军年 (1029)

海州湾表层沉积物重金属的来源特征及风险评价 李飞, 徐敏 (1035)

再生水无计划间接补充饮用水的雌激素健康风险 吴乾元, 邵一如, 王超, 孙艳, 胡洪营 (1041)

瓦埠湖流域庄集镇农田土壤氮磷分布及流失风险评估 李如忠, 邹阳, 徐晶晶, 丁贵珍 (1051)

三峡库区消落带土壤汞形态分布与风险评价 张成, 陈宏, 王定勇, 孙荣国, 张金洋 (1060)

基于棕地的居民小区土壤重金属健康风险评价 陈星, 马建华, 李新宁, 刘德新, 李一蒙 (1068)

干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 南忠仁 (1075)

缙云山 3 种典型森林降雨过程及其氮素输入 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 张会兰, 于雷, 刘婕 (1081)

三峡库区兰陵溪小流域土地利用及景观格局对氮磷输出的影响 韩黎阳, 黄志霖, 肖文发, 田耀武, 曾立雄, 吴东 (1091)

黄土丘陵区县域农田土壤近 30 年有机碳变化及影响因素研究: 以甘肃庄浪县为例 师晨迪, 许明祥, 邱宇洁, 张志霞, 张晓伟 (1098)

天然林土壤有机碳及矿化特征研究 杨添, 戴伟, 安晓娟, 庞欢, 邹建美, 张瑞 (1105)

不同土壤湿润速率下中性紫色土磷素淋溶的动态变化 张思兰, 石孝均, 郭涛 (1111)

硫酸对酸性红壤 pH 值与金属元素有效性的影响 杨波, 王文, 曾清如, 周细红 (1119)

6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 康振妍, 李淑媛 (1125)

基于 N:P 化学计量特征的高寒草甸植物养分状况研究 张仁懿, 徐当会, 陈凌云, 王刚 (1131)

人工生物结皮的发育演替及表土持水特性研究 吴丽, 陈晓国, 张高科, 兰书斌, 张德禄, 胡春香 (1138)

农田土壤自养微生物碳同化潜力及其功能基因数量、关键酶活性分析 陈晓娟, 吴小红, 简燕, 袁红朝, 周萍, 葛体达, 童成立, 邹冬生, 吴金水 (1144)

中亚热带马尾松林凋落物分解过程中的微生物与酶活性动态 宋影, 辜夕容, 严海元, 毛文韬, 吴雪莲, 万宇轩 (1151)

苏南地区香樟树皮中有机氯农药 (OCPs) 的污染水平及来源解析 周丽, 张秀蓝, 杨文龙, 李玲玲, 史双昕, 张利飞, 董亮, 黄业茹 (1159)

UV-B 辐射增强与 1,2,4-三氯苯污染复合胁迫对青菜生长的影响 刘翠英, 樊建凌, 徐向华 (1164)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响 张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺 (1169)

对硝基苯胺耐盐降解菌 S8 的筛选及特性研究 宋彩霞, 邓新平, 厉阆, 肖伟 (1176)

克雷伯氏菌生产絮凝剂 M-C11 的培养优化及其在污泥脱水中的应用 刘杰伟, 马俊伟, 刘彦忠, 杨娅, 岳东北, 王洪涛 (1183)

铅元素人为循环环境释放物形态分析 梁静, 毛建素 (1191)

污染排放与环境质量关系模型构建与应用 李名升, 孙媛, 陈远航, 张建辉 (1198)

微囊藻毒素微生物降解途径与分子机制研究进展 闫海, 王华生, 刘晓璐, 尹春华, 许倩倩, 吕乐, 马万彪 (1205)

《环境科学》征订启事 (809) 《环境科学》征稿简则 (819) 信息 (971, 978, 1050, 1175)

Cu 和 Cd 胁迫下接种外生菌根真菌对油松根际耐热蛋白固持重金属能力的影响

张英伟, 柴立伟, 王东伟, 汪杰, 黄艺*

(北京大学环境科学与工程学院, 北京 100871)

摘要: 铜和镉是我国土壤重金属常见种类, 生物固定过量重金属以降低其生理毒害是修复土壤重金属污染的有效方法之一。外生菌根能够通过分泌大量有机物质来降低土壤中重金属的生物有效性。在 Cu 或 Cd 胁迫下, 外生菌根真菌接种油松幼苗根际分泌的耐热蛋白具有固持重金属的潜力。结果表明, 纯培养条件下接种并没有增加耐热蛋白的分泌, 但是在 Cu 或 Cd 的胁迫培养下, 接种幼苗耐热蛋白的分泌量增加。不同 Cu 浓度处理下, 接种油松幼苗总提取耐热蛋白 (total thermostable protein, TTP) 和易提取耐热蛋白 (easily extracted thermostable protein, EETP) 的分泌量为未接种油松的 2.64 ~ 11.79 倍; Cd 处理下接种油松 TTP 和 EETP 的分泌量, 分别是未接种油松的 1.49 ~ 7.56 倍。虽然 Cu 处理下无论是接种还是未接种, 根际耐热蛋白和根系细胞中固持的总 Cu 量显著大于空白对照, 但接种显著增加了根际的重金属固持量, 其 Cu 总相对含量是未接种的 1.81 ~ 2.75 倍, 且绝大部分重金属固持在耐热蛋白中, 使得根际耐热蛋白中的 Cu 相对含量是根系细胞含量的 4.19 ~ 43.00 倍。Cd 处理下也得到了相似的结论。说明接种菌根真菌促进了植物分泌耐热蛋白量, 加强了根系对重金属的固持能力, 从而达到减少过量重金属的生物有效性, 缓解土壤重金属污染的目的。

关键词: Cu; Cd; 菌根; 耐热蛋白; 固持重金属

中图分类号: X131.3; X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)03-1169-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.03.050

Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of *Pinus tabulaeformis* Under Cu and Cd Stress

ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, WANG Jie, HUANG Yi

(College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Copper and cadmium in soil is a severe soil pollution problem in China. It is effective to remediate the soil by sequestering Cu and Cd with tolerant plant and microorganism. Ectomycorrhizae could exude a large number of organic matter to reduce the biological effectiveness of heavy metals. Therefore, under Cu or Cd stress, thermostable protein in rhizosphere exuded by roots of pine seedling (*Pinus tabulaeformis*) associated with ectomycorrhizal fungi (*Xerocomus chrysenteron*) can have the potential of sequestration for heavy metals. The results illustrated that the association didn't impact on exudation of thermostable protein but treated with different concentrations of Cu, the total thermostable protein (TTP) and easily extracted thermostable protein (EETP) in mycorrhizal rhizosphere increased by 2.64 to 11.79 times compared with non-mycorrhizal one. While treated with Cd, it was 1.49 to 7.56 times. Further analysis of metal content in rhizosphere showed that association significantly increased the Cu sequestration in mycorrhizal rhizosphere where relative content of Cu was 1.81 to 2.75 times higher than those in non-mycorrhizal rhizosphere while most of Cu was sequestered by thermostable protein, 4.19 to 43.00 times higher in protein than in root cell. Meanwhile results of Cd treatments showed a similar trend with Cu treatments. That indicated that under excessive heavy metals stress, ectomycorrhizal association facilitated the exudation of thermostable protein so as to extend the capacity of sequestration for excessive heavy metals and mitigate the phytotoxicity from heavy metals polluted soil.

Key words: Cu; Cd; mycorrhiza; thermostable protein; heavy metals sequestration

土壤是人类赖以生存的资源, 而中国约 2 000 万 hm^2 的农业土地受到重金属的污染, 并可能通过食物链对人体健康造成严重的危害^[1]。因此, 缓解土壤重金属污染, 成为保护国家生态安全的重要任务之一。

大量研究表明, 菌根真菌能够分泌有机酸、糖类、蛋白质等有机物, 改变植物的根际环境和重金属的存在状态, 增加其寄主植物在重金属胁迫下的适

应能力^[2~4]。Heggo 等^[5]认为, 菌根是通过改变土壤 pH 值和分泌物成分, 减弱重金属的生物有效性。黄艺等^[6]在研究离体培养的外生菌根真菌牛乳牛肝

收稿日期: 2013-07-23; 修订日期: 2013-09-25

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41271325)

作者简介: 张英伟 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境控制与环境生物技术, E-mail: zhangyingwei2011@126.com

* 通讯联系人, E-mail: yhuang@pku.edu.cn

菌 (*Suillus bovinus*) 菌丝对过量重金属响应的实验中发现,菌丝分泌物中含有大量重金属,推测菌丝分泌物可能是菌根真菌固持重金属的重要部位. 另外,陈家武等^[7]在比较接种和不接种菌根真菌的玉米根际土壤的研究中发现,根外菌丝体可以分泌菌丝黏液,影响根际土壤微量金属的形态,使金属从游离态转化为结合态,从而缓解重金属对玉米生长的胁迫. 随着对菌根分泌物的研究,耐热蛋白球囊霉素相关土壤蛋白 (glomalin-related soil protein, GRSP) 作为丛枝菌根真菌 (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) 分泌的一种具有改善土壤结构以及固持重金属作用的糖蛋白,逐步进入了研究者的视野^[8-11]. 大量研究表明,球囊霉素相关土壤蛋白能够固持污染土壤中多种重金属,能够固持土壤中 1.44% ~ 27.5% 的总铜量和 0.8% ~ 15.5% 的总铅量^[10,12,13]. 然而,对于外生菌根真菌分泌的耐热蛋白的研究,却鲜有报道.

因此,本研究提出假设:作为主要菌根真菌种类之一的外生菌根真菌,接种于植物根系后,在重金属胁迫下可能分泌与球囊霉素相关土壤蛋白相似的耐热蛋白,以缓解过量重金属的植物毒害. 本研究拟通过热提取的方法获得油松根际分泌物中的耐热蛋白,分析不同铜镉处理下接种对根际分泌耐热蛋白量和固持重金属能力的影响,探讨菌根真菌通过耐热蛋白固持重金属降低其生理毒害,从而缓解土壤重金属污染的机制.

1 材料与方法

1.1 实验材料

1.1.1 菌种与植物来源

本实验采用无污染是北京西山针叶林的外生菌根真菌红绒盖牛肝菌 (*Xerocomus chrysenteron*), 由北京林业大学森林病理研究室雷增普教授采集、鉴定和提供. 所用植物为油松 (*Pinus tabulaeformis*), 由北京林业局种子库提供.

1.1.2 真菌培养

菌根真菌 *Xerocomus chrysenteron* 母菌接种于固体培养基上,生物膜封口,置于 25℃ 恒温培养箱培养一周. 在无菌条件下用打孔器在菌体边缘取直径 8 mm 的圆菌块,作为菌丝培养的接种体,置于 50 mL 的灭菌 Kottke 营养液中,在 25℃ 以 120 r·min⁻¹ 匀速振动下,培养 1 周,获得实验用菌丝.

1.1.3 幼苗培养与接种

自来水洗净并挑选出颗粒饱满、无病虫害的油松

种子,经 10% 的过氧化氢溶液浸泡 30 min 表面消毒后,用灭菌去离子水冲洗 5 ~ 6 次,浸于 50 ~ 60℃ 的去离子水中,置于 40℃ 的恒温培养箱中 24 h 以催芽,而后再将种子转移至盛有珍珠岩的培养皿上发芽. 待种子露白后,将其根部朝下种于盛有珍珠岩的塑料盒中 (盒长 25 cm, 宽 17.5 cm, 高 10 cm, 栽种密度为每盒 16 棵),放入人工气候培养室 (25℃ 光照, 14 h; 18℃ 黑暗, 10 h) 培养,每周每盒交替浇一次 200 mL 的蒸馏水或不含葡萄糖、稀释到 10% 的 Kottke 营养液.

幼苗生长 4 周后,掘出幼苗在无菌环境下进行接种. 将菌丝在搅拌器中打散并搅拌均匀制成悬浮液作为接种体,幼苗根部用无菌水洗净后,浸入菌丝悬浮液中使其沾满菌丝体,然后种植于装有灭菌珍珠岩的保鲜盒中. 以幼苗根部浸入灭活后冷却的菌丝悬浮液为未接种对照. 所有幼苗置于人工气候培养室中培养 (25℃ 光照, 14 h; 18℃ 黑暗, 10 h) 6 周. 培养期间,每周每盒交替浇一次 200 mL 蒸馏水或不含葡萄糖、稀释到 10% 的 Kottke 营养液.

1.2 实验设计

使用非土壤型固体培养体 (石英砂), 构建人工根际环境 (图 1).

研究铜胁迫下 *Xerocomus chrysenteron* 接种对油松根际蛋白质分泌量及对重金属的固持作用的影响,使用 CuSO₄ · 5 H₂O 母液配制出 0、2、50、150 mg·kg⁻¹ 共 4 个不同铜含量的石英砂培养体系,每个处理 4 个平行.

研究镉胁迫下 *Xerocomus chrysenteron* 接种对油松根际蛋白质分泌量及对重金属的固持作用的影响,使用 CdCl₂ · 2.5 H₂O 母液配制出 0、0.5、0.75、1.5 mg·kg⁻¹ 这 4 个不同镉含量的石英砂培养体系,每个处理 4 个平行.

将镜检有二杈小根的幼苗和根系镜检无菌丝的对照幼苗转移到石英砂中培养. 所有幼苗培养 4 周

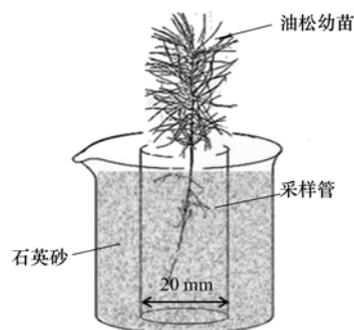


图 1 植物培养体系

Fig. 1 Plant culture systems

后取样。

采用直径为 20 mm 的采样管提取根系周围的石英砂和苗木。风干后的石英砂称取干重,然后用缓冲液提取石英砂中的根系分泌物,以供后续实验使用;风干后的幼苗取其根系称重,以备后续重金属含量测定。

1.3 蛋白质提取

根据 Rillig^[14] 在研究球囊霉素时,依不同热提取条件对球囊霉素相关土壤耐热蛋白的分类方法,在该研究中将菌根分泌的耐热蛋白分为易提取耐热蛋白(easily extracted thermostable protein, EETP)和总提取耐热蛋白(total thermostable protein, TTP)。

提取 EETP 时,在 50 mL 血清瓶中加入 10 mL 柠檬酸钠缓冲溶液(20 mmol·L⁻¹, pH 7.0),并按比例加入风干后的样品,121℃ 高温高压提取 30 min,5 000 r·min⁻¹ 离心 10 min 分离后,保存提取液备用。提取 TTP 是在 50 mL 血清瓶中加入 10 mL 柠檬酸钠缓冲溶液(50 mmol·L⁻¹, pH 8.0),121℃ 高温高压提取 60 min,5 000 r·min⁻¹ 离心取出提取液,再加入等量缓冲溶液循环多次直到提取液中不能检出蛋白质,收集提取液作为总提取蛋白质;或者一次性提取 90 min,收集提取液^[8,15]。

1.4 测定方法

1.4.1 蛋白质含量测定

使用考马斯亮蓝法测定样品中的蛋白质含量^[16]。

1.4.2 重金属含量测定:

在聚四氟乙烯瓶中,加入 3 mL TTP 或 10 mg 油松根系,1 mL HNO₃ 在电热板上消解 30 min(防止烧干),加入少许 H₂O₂ 至液体透明,定容至 25 mL,4℃ 保存于 15 mL 塑料离心管中,待测。使用美国 Thermo Fisher Scientific 公司生产的 XSeries 2 电感耦合等离子质谱(inductively coupled plasma-mass spectrometry, ICP-MS)测定消解样品中铜和镉的含量,每个样品平行测定 3 次。

1.5 数据处理

应用 Excel 2007 和 SPSS 16.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 接种对根系分泌耐热蛋白的影响

$$\text{菌根强化指数} = \frac{\text{每克接种幼苗根系干重分泌的耐热蛋白量} - \text{每克未接种幼苗根系干重所分泌的耐热蛋白量}}{\text{每克未接种幼苗根系干重分泌的耐热蛋白量}}$$

通过 8 周的纯培养及连续取样发现,幼苗生长时间影响根系耐热蛋白的分泌量($P < 0.05$)。在 8 周的培养周期内,随着培养时间的增加,无论接种还是未接种,油松根际耐热蛋白的分泌量呈现先增加后减少的变化趋势,且在第 4 周根际耐热蛋白的量达到最大值(图 2)。

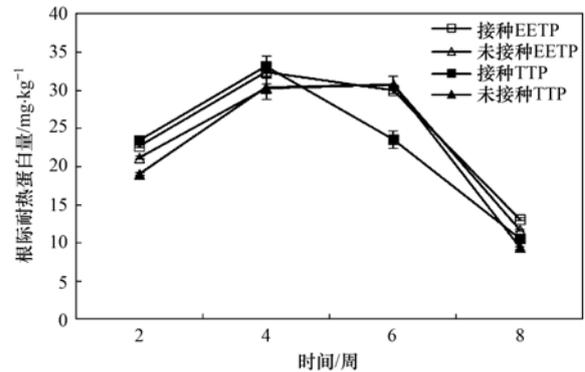


图 2 油松分泌耐热蛋白量随时间的变化

Fig. 2 Thermostable protein content changes with time exuded by *Pinus tabulaeformis*

但是接种并没有显著改变根系的耐热蛋白分泌量($P > 0.05$)。幼苗生长 4 周后,接种条件下 TTP 和 EETP 比未接种的虽然高 8.9% 和 7.0%,但差异并不显著。另外,接种条件下 EETP 约占 TTP 总量的 92%,未接种条件下 EETP 约占 TTP 总量的 93%,可见无论在接种还是未接种条件下,易提取耐热蛋白都是该类耐热蛋白的主要组成部分。

2.2 铜镉胁迫下接种油松分泌耐热蛋白含量变化

与无重金属胁迫时,接种和不接种根系耐热蛋白分泌量没有显著变化的结果不同,在过量 Cu 和 Cd 胁迫下,接种显著增加了油松根际耐热蛋白的分泌量($P < 0.05$,图 3)。其中, Cu 50 mg·kg⁻¹ 和 Cd 0.75 mg·kg⁻¹ 处理下,接种油松根际分泌耐热蛋白最多,TTP 分别是未接种幼苗的 6.81 倍和 7.56 倍,EETP 为 11.79 倍和 7.49 倍。与无重金属处理的空白对照相比,接种幼苗根系分泌 TTP 量在 Cu 处理下为对照的 3.21 ~ 6.39 倍,Cd 处理下为 1.25 ~ 3.62 倍。说明过量 Cu 和 Cd 胁迫,诱导了外生菌根真菌接种根际耐热蛋白的分泌。

为了进一步分析菌根真菌对处于重金属胁迫下的寄主植物抗胁迫能力的增强作用,将菌根接种的增强能力表征为菌根强化指数,其计算公式如下:

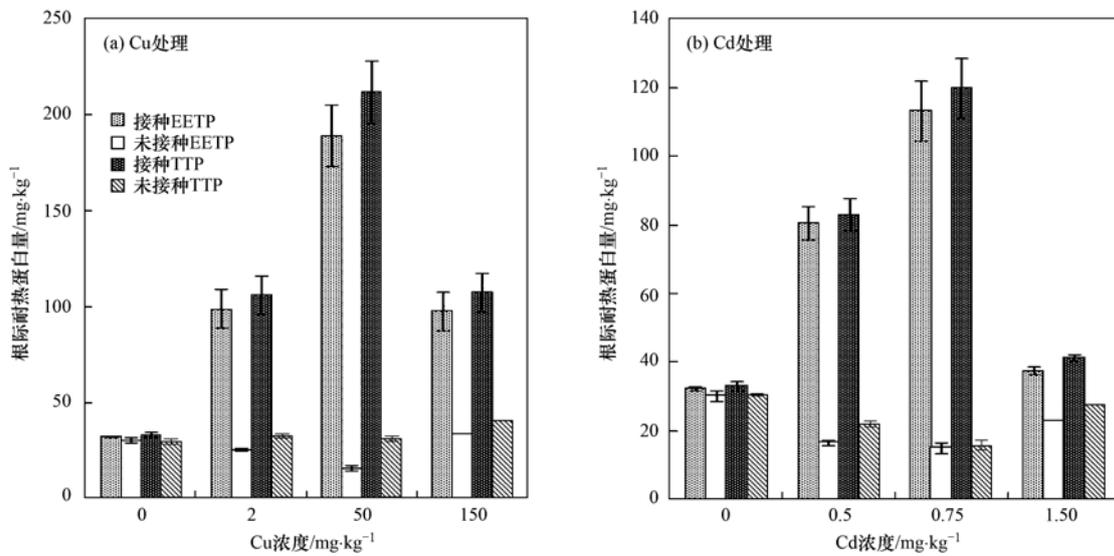


图3 不同铜或镉处理下油松分泌耐热蛋白量

Fig. 3 Thermostable protein content exuded by *Pinus tabulaeformis* under different Cu or Cd treatments

在 Cu 和 Cd 胁迫下,菌根强化指数均大于零,说明菌根接种增强了寄主植物的抗重金属胁迫能力. 随着重金属添加浓度的增加,菌根强化

指数呈现先增加后减少的趋势,在 Cu 50 mg·kg⁻¹和 Cd 0.75 mg·kg⁻¹处理下,强化指数达到最高(图4).

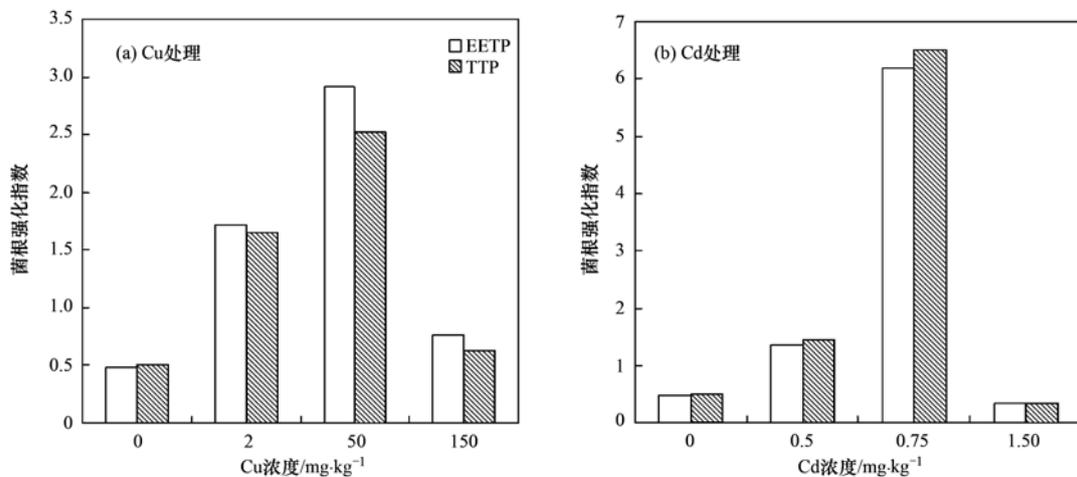


图4 不同铜或镉处理下菌根强化指数

Fig. 4 Mycorrhizal intensifying index under different Cu or Cd treatments

2.3 铜镉在根系细胞和根际耐热蛋白中的分布

用根际耐热蛋白或油松根系细胞中的重金属含量与初始投加量的比值,表示相对固持量,以分析铜镉在根系细胞和根际耐热蛋白中的分布. 从图5可以看出,过量 Cu 和 Cd 胁迫下,无论是 Cu 处理还是 Cd 处理,接种显著增加了根际耐热蛋白中重金属的相对固持量($P < 0.05$). 在 Cu 处理下,接种油松根际耐热蛋白和根系细胞中重金属总相对固持量是未接种的 1.81~2.75 倍,且在接种处理下,根际耐热蛋白(TTP)中 Cu 的相对固持量是根系细胞的 4.19

~43.00 倍,远远大于根系细胞中 Cu 的固持量 ($P < 0.05$) [图5(a)].

Cd 处理也具有相似的结果,说明根系分泌耐热蛋白在固持根际环境中过量重金属中起着非常重要的作用. 但随着 Cd 浓度的增大,耐热蛋白(TTP)和根细胞中 Cd 的相对固持量都呈现减小的趋势 [图5(b)].

3 讨论

在过量 Cu 和 Cd 的胁迫下,接种显著增加了油

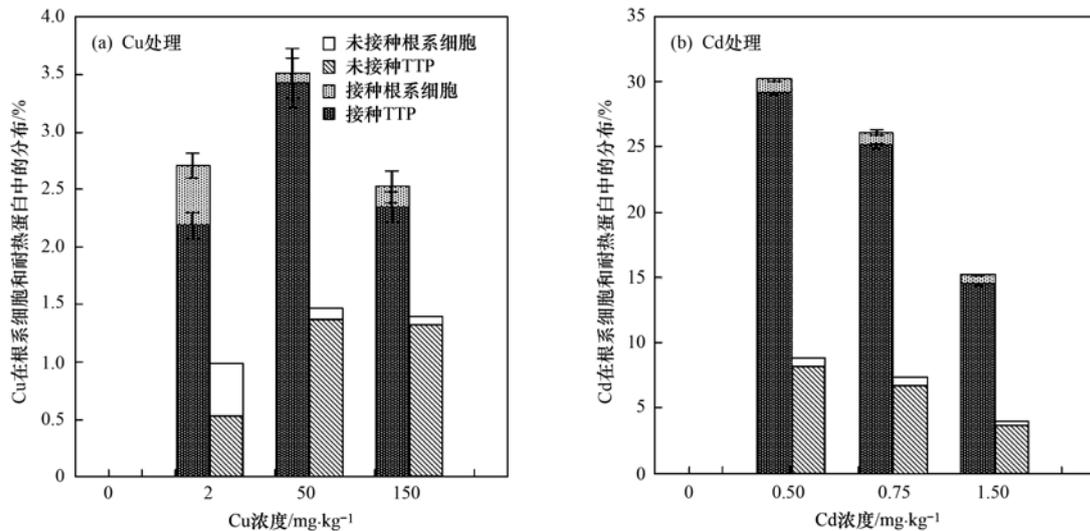


图5 不同铜或镉处理下耐热蛋白与根系细胞中重金属的相对含量

Fig. 5 Relative content of heavy metals in TTP and root cell under different Cu or Cd treatments

松根际耐热蛋白的分泌量,这一结果与 Zheng 等^[17]在研究 *Xerocomus chrysenteron* 接种油松幼苗根系分泌物中水溶性蛋白分泌量增加的实验结果一致. 已有研究表明,菌根植物对重金属胁迫具有显著的耐受性^[18]. Wang 等^[19]在研究中发现,接种丛枝菌根真菌的烟草地收割后,土壤中球囊霉素相关土壤蛋白的总量增加,进一步的分析显示球囊霉素相关土壤蛋白中含有大量的重金属. Morselt 等^[20]的研究也证明了,外生菌根真菌可以通过分泌金属结合蛋白来抵御重金属的胁迫. 因此,外生菌根对重金属胁迫有较高耐受的原因,可能是外生菌根分泌的耐热蛋白具有固持重金属的作用. 在本研究中,2.19% ~ 3.43% 的总 Cu 添加量以及 14.3% ~ 29.1% 的总 Cd 添加量存在于耐热蛋白中,而本实验室前期研究结果显示,在重金属胁迫下,接种了 *Xerocomus chrysenteron* 的松苗的生长状况得到明显地改善,且根际土壤中重金属的有机结合态含量显著增加^[21,22]. 上述结果显示,菌根分泌物中耐热蛋白固持了大量的外加重金属,降低了过量重金属的生物有效性,从而减轻了对植物的毒害作用. 因此,在重金属胁迫下,菌根真菌诱导根系分泌物中对重金属具有固持能力的耐热蛋白量的增加,可能是菌根植物适应土壤环境变化的重要机制之一.

与未接种油松相比,接种油松根系细胞中 Cu 的含量是未接种的 0.85 ~ 2.53 倍,在 Cu 50 mg·kg⁻¹ 处理下,接种油松根系细胞中 Cu 的含量低于未接种,这一结论与以往的研究结果相矛盾^[23]. Cu 作为必需元素,一方面,接种有利于菌丝体向土

壤中延伸,增加了根系的吸收表面积,使植物根细胞能获得更多的 Cu^[24~26]. 另一方面,重金属会破坏未接种根系的原生质膜,导致重金属离子大量进入植物体内,菌根通过保护原生质膜从而减少根系对重金属的吸收^[27]. 这两方面因素共同作用可能使得在 Cu 50 mg·kg⁻¹ 处理下,接种油松根系细胞 Cu 含量低于未接种油松. Cd 处理条件下,接种油松根系细胞中 Cd 的含量是未接种的 1.58 ~ 1.88 倍, Cd 不是植物生长的必需元素,但对一些化合物的巯基以及植物新陈代谢中的磷酸基具有很强的亲和性^[28],很容易被植物吸收^[29],具有强烈的植物毒害作用,少量的镉就会对植物造成严重的危害. 所以,虽然根系分泌耐热蛋白固持了大量的 Cd,但是菌根并没有阻止 Cd 进入植物体内^[23],随着 Cd 添加浓度的增加,被菌丝吸收的 Cd 还是会进入植物根系内. 有研究表明,植物根系细胞中金属螯合物多聚甘氨酸能够将重金属结合在植物根部^[30,31],接种可能增加了根系细胞中多聚甘氨酸的含量^[32],从而导致根部重金属的含量大于非菌根植物.

对比图5可以看出,必需元素 Cu 在耐热蛋白中的相对固持量显著小于有毒元素 Cd. 这种差异是否由耐热蛋白中氨基酸种类和结构的差异性所导致,还需要对耐热蛋白的序列做进一步测定后,再做分析.

4 结论

(1) 纯培养条件下,外生菌根真菌接种油松分泌耐热蛋白的含量随着时间发生显著性变化,且在

第4周耐热蛋白分泌量达到最大值,但接种和不接种之间,耐热蛋白的分泌量并没有显著差别。

(2) Cu 和 Cd 的胁迫下,外生菌根真菌接种油松分泌耐热蛋白的含量显著高于未接种油松,说明重金属胁迫诱导了接种油松分泌耐热蛋白。

(3) Cu 和 Cd 的胁迫下,外生菌根真菌接种油松根际耐热蛋白和根系细胞中重金属的总固持量显著高于未接种油松,且绝大多数重金属被固持在耐热蛋白中,初步探明了耐热蛋白在固持根际重金属中起着非常重要的作用。

参考文献:

- [1] 骆永明, 滕应. 我国土壤污染退化状况及防治对策 [J]. 土壤, 2006, **38**(5): 505-508.
- [2] Howe R, Evans R L, Ketteridge S W. Copper-binding proteins in ectomycorrhizal fungi [J]. *New Phytologist*, 1997, **135**(1): 123-131.
- [3] Renella G, Landi L, Nannipieri P. Degradation of low molecular weight organic acids complexed with heavy metals in soil [J]. *Geoderma*, 2004, **122**(2-4): 311-315.
- [4] Ahonen-Jonnarh U, Hees P A W V, Lundström U, *et al.* Organic acids produced by mycorrhizal *Pinus sylvestris* exposed to elevated aluminium and heavy metal concentrations [J]. *New Phytologist*, 2000, **146**(3): 557-567.
- [5] Heggo A, Angle J S, Chaney R L. Effects of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on heavy metal uptake by soybeans [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1990, **22**(6): 865-869.
- [6] 黄艺, 陶澍, 陈有鑑, 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.
- [7] 陈家武, 卢以群, 陈志辉. 菌根菌对玉米抗铜、镉、铅、锌及生物有效性的影响 [J]. *湖南农业科学*, 2007, (5): 99-101.
- [8] Wright S F, Upadhyaya A. Extraction of an abundant and unusual protein from soil and comparison with hyphal protein of arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Soil Science*, 1996, **161**(9): 575-586.
- [9] Wright S F, Upadhyaya A, Buyer J S. Comparison of N-linked oligosaccharides of glomalin from arbuscular mycorrhizal fungi and soils by capillary electrophoresis [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, **30**(13): 1853-1857.
- [10] Vodnik D, Grčman H, Maček I, *et al.* The contribution of glomalin-related soil protein to Pb and Zn sequestration in polluted soil [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **392**(1): 130-136.
- [11] González-Chávez M C, Carrillo-González R, Wright S F, *et al.* The role of glomalin, a protein produced by arbuscular mycorrhizal fungi, in sequestering potentially toxic elements [J]. *Environmental Pollution*, 2004, **130**(3): 317-323.
- [12] Cornejo P, Meier S, Borie G, *et al.* Glomalin-related soil protein in a Mediterranean ecosystem affected by a copper smelter and its contribution to Cu and Zn sequestration [J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **406**(1-2): 154-160.
- [13] Chern E C, Tsai D W, Ogunseitan O A. Deposition of glomalin-related soil protein and sequestered toxic metals into watersheds [J]. *Environmental Science and Technology*, 2007, **41**(10): 3566-3572.
- [14] Rillig M C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation [J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 2004, **84**(4): 355-363.
- [15] Wright S F, Nichols K A, Schmidt W F. Comparison of efficacy of three extractants to solubilize glomalin on hyphae and in soil [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(7): 1219-1224.
- [16] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, **72**(1-2): 248-254.
- [17] Zheng W S, Fei Y H, Huang Y. Soluble protein and acid phosphatase exuded by ectomycorrhizal fungi and seedlings in response to excessive Cu and Cd [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, **21**(12): 1667-1672.
- [18] Zhang X H, Lin A J, Chen B D, *et al.* Effects of *Glomus mosseae* on the toxicity of heavy metals to *Vicia faba* [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, **18**(4): 721-726.
- [19] 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): 549-559.
- [20] Morselt A F W, Smits W T M, Limonard T. Histochemical demonstration of heavy metal tolerance in ectomycorrhizal fungi [J]. *Plant and Soil*, 1986, **96**(3): 417-420.
- [21] 黄艺, 彭博, 李婷, 等. 外生菌根真菌对重金属铜镉污染土壤中油松生长和元素积累分布的影响 [J]. *植物生态学报*, 2007, **31**(5): 923-929.
- [22] 黄艺, 李婷, 费颖恒. 外生菌根真菌对油松幼苗根际土壤重金属赋存的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2007, **23**(3): 70-76.
- [23] 王红新, 郭绍义, 许信旺, 等. 接种丛枝菌根对复垦矿区玉米中重金属含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(4): 1333-1337.
- [24] Galli U, Meier M, Brunold C. Effects of cadmium on non-mycorrhizal and mycorrhizal Norway spruce seedlings [*Picea abies* (L.) Karst.] and its ectomycorrhizal fungus *Laccaria laccata* (Scop, ex Fr.) Bk. & Br.: Sulphate reduction, thiols and distribution of the heavy metal [J]. *New Phytologist*, 1993, **125**(4): 837-843.
- [25] Ahonen-Jonnarh U, Finlay R D. Effects of elevated nickel and cadmium concentrations on growth and nutrient uptake of mycorrhizal and non-mycorrhizal *Pinus sylvestris* seedlings [J]. *Plant and Soil*, 2001, **236**(2): 129-138.
- [26] Ricken B, Honfner W. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on heavy metal tolerance of Alfalfa (*Medicago sativa* L.) and Oat (*Avena sativa* L.) on a sewage sludge treated soil

- [German] [J]. Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde, 1996, **159**(2): 189-194.
- [27] Van Tichelen K K, Colpaert J V, Vangronsveld J. Ectomycorrhizal protection of *Pinus sylvestris* against copper toxicity [J]. New Phytologist, 2001, **150**(1): 203-213.
- [28] Pahlsson A B. Toxicity of heavy metals (Zn, Cu, Cd, Pb) to vascular plants [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1989, **47**(3-4): 287-319.
- [29] Colpaert J V, Van Assche J A. The effects of cadmium on ectomycorrhizal *Pinus sylvestris* L. [J]. New Phytologist, 1993, **123**(2): 325-333.
- [30] Rauser W E. Phytochelatins and related peptides. Structure, biosynthesis, and function [J]. Plant Physiology, 1995, **109**(4): 1141-1149.
- [31] Steffens J C. The heavy metal-binding peptides of plants [J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1990, **41**(1): 553-575.
- [32] 黄晶, 凌婉婷, 孙艳娣, 等. 丛枝菌根真菌对紫花苜蓿吸收土壤中镉和锌的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(1): 99-105.
-

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2013年9月27日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2012年度中国科技论文统计结果.统计结果显示2012年度《环境科学》多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.

《环境科学》综合评价总分77.8,排名第一,总被引频次6489,影响因子1.156.

综合评价总分是根据中国科技期刊综合评价指标体系,计算多项科学计量指标(总被引频次、影响因子、他引率、基金论文比、引文率等),采用层次分析法确定重要指标的权重,分学科对每种期刊进行综合评定,计算出每个期刊的综合评价总分.这项指标屏蔽了各个学科之间总体指标背景值的差异,使科技期刊可以进行跨学科比较.根据发布的统计结果,2012年度《环境科学》综合评价总分77.8,在被统计的30种环境科学技术及资源科学技术类期刊中名列第一.

CONTENTS

Concentration and Community Diversity of Microbes in Bioaerosols in the Qingdao Coastal Region	QI Jian-hua, WU Li-jing, GAO Dong-mei, <i>et al.</i> (801)
Carbon Source Apportionment of PM _{2.5} in Chongqing Based on Local Carbon Profiles	ZHANG Can, ZHOU Zhi-en, ZHAI Chong-zhi, <i>et al.</i> (810)
Observation of Atmospheric Pollutants in the Urban Area of Beibei District, Chongqing	XU Peng, HAO Qing-ju, JI Dong-sheng, <i>et al.</i> (820)
A Floating-Dust Case Study Based on the Vertical Distribution of Aerosol Optical Properties	WANG Yuan, DENG Jun-ying, SHI Lan-hong, <i>et al.</i> (830)
Analysis and Assessment of Atmospheric Pollution Based on Accumulation Characterization of Heavy Metals in <i>Platanus acerifolia</i> Leaves	LIU Ling, FANG Yan-ming, WANG Shun-chang, <i>et al.</i> (839)
Study on the Emission Characteristics and Potential Environment Hazards of the Heat-setting Machine of the Typical Dyeing and Finishing Enterprise	XU Zhi-rong, WANG Peng, WANG Zhe-ming, <i>et al.</i> (847)
Implementation Results of Emission Standards of Air Pollutants for Thermal Power Plants; a Numerical Simulation	WANG Zhan-shan, PAN Li-bo (853)
On Road Particle Emission Characteristics of a Chinese Phase IV Natural Gas Bus	LOU Di-ming, CHENG Wei, FENG Qian (864)
Chemical Compositions of <i>n</i> -Alkanols in Smoke from Rice and Maize Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, WU Dan, <i>et al.</i> (870)
Diurnal and Seasonal Variations of Surface Atmospheric CO ₂ Concentration in the River Estuarine Marsh	ZHANG Lin-hai, TONG Chuan, ZENG Cong-sheng (879)
Partial Pressure and Diffusion Flux of Dissolved Carbon Dioxide in the Mainstream and Tributary of the Central Three Gorges Reservoir in Summer	LI Shuang, WANG Yu-chun, CAO Man, <i>et al.</i> (885)
Emission of CH ₄ , N ₂ O and NH ₃ from Vegetable Field Applied with Animal Manure Composts	WAN He-feng, ZHAO Chen-yang, ZHONG Jia, <i>et al.</i> (892)
Effects of Different Iron Oxides on Methane Emission in Paddy Soil as Related to Drying/Wetting Cycles	ZHANG Tian-jiao, TANG Jia, ZHUANG Li, <i>et al.</i> (901)
Study on the Dissolution Behavior of Biogenic Silica in the Changjiang Estuary Adjacent Sea	WU Bin, LÜ Wei-xiang, LU Chao, <i>et al.</i> (908)
Phytoplankton Community Structure and Assessment of Water Quality in the Middle and Lower Reaches of Fenhe River	WANG Ai-ai, FENG Jia, XIE Shu-lian (915)
Lake Algae Chemotaxonomy Technology Based on Fluorescence Excitation Emission Matrix and Parallel Factor Analysis	CHEN Xiao-na, HAN Xiu-rong, SU Rong-guo, <i>et al.</i> (924)
Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter (DOM) in Soils and Sediments of Typical Water-Level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	LI Lu-lu, JIANG Tao, YAN Jin-long, <i>et al.</i> (933)
Distribution of Phosphorus in Surface Sediments from the Yellow River Estuary Wetland	YU Zi-yang, DU Jun-tao, YAO Qing-zhen, <i>et al.</i> (942)
Characteristics and Influencing Factors of Phosphorus Adsorption on Sediment in Lake Taihu and Lake Hulun	CHUAI Xiao-ming, YANG Liu-yan, CHENG Shu-bo, <i>et al.</i> (951)
Linking Optical Properties of Dissolved Organic Matter with NDMA Formation Potential in the Huangpu River	DONG Qian-qian, ZHANG Ai, LI Yong-mei, <i>et al.</i> (958)
Reductive Debromination of Polybrominated Diphenyl Ethers in Aquifer by Nano Zero-valent Iron: Debromination Kinetics and Pathway	YANG Yu-han, XU Wei-wei, PENG Si-kan, <i>et al.</i> (964)
Influencing Factors and Reaction Mechanism of Chloroacetic Acid Reduction by Cast Iron	TANG Shun, YANG Hong-wei, WANG Xiao-mao, <i>et al.</i> (972)
Effect of Phosphorus Recovery on Phosphorous Bioaccumulation/Harvesting in an Alternating Anaerobic/Aerobic Biofilter System	ZHANG Shun, TIAN Qing, TANG Man-lin, <i>et al.</i> (979)
Effects of Pretreatment Methods on Corncob as Carbon Source for Denitrification	ZHAO Wen-li, HAO Rui-xia, LI Bin, <i>et al.</i> (987)
Start-Up by Inoculation and Operation of a CANON Reactor with Haydite as the Carrier	FU Kun-ming, ZUO Zao-rong, QIU Fu-guo (995)
Diversity of Operation Performance and Microbial Community Structures in MBRs and CAS Processes at Low Temperature	HUANG Fei, MEI Xiao-jie, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1002)
Enhanced Hydrolysis and Acidification of Waste Activated Sludge by Alkyl Polyglycosides	CHEN Can, SUN Xiu-yun, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1009)
Effect of Substrate Concentration on Pathogen Indicators Inactivation During Thermophilic Anaerobic Digestion	CAO Hong-qing, ZHANG Fei-fei, LI Jian, <i>et al.</i> (1016)
Pollution Evaluation and Health Risk Assessment of Heavy Metals from Atmospheric Deposition in Lanzhou	LI Ping, XUE Su-yin, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1021)
Ecological Risk Assessment of Organophosphorus Pesticides in Aquatic Ecosystems of Pearl River Estuary	GUO Qiang, TIAN Hui, MAO Xiao-xuan, <i>et al.</i> (1029)
Source Characteristics and Contamination Evaluation of Heavy Metals in the Surface Sediments of Haizhou Bay	LI Fei, XU Min (1035)
Health Risk Induced by Estrogens During Unplanned Indirect Potable Reuse of Reclaimed Water from Domestic Wastewater	WU Qian-yuan, SHAO Yi-ru, WANG Chao, <i>et al.</i> (1041)
Distribution Characteristics and Erosion Risk of Nitrogen and Phosphorus in Soils of Zhuangnu Town in Lake Wabuhu Basin	LI Ru-zhong, ZOU Yang, XU Jing-jing, <i>et al.</i> (1051)
Distribution and Risk Assessment of Mercury Species in Soil of the Water-Level-Fluctuating Zone in the Three Gorges Reservoir	ZHANG Cheng, CHEN Hong, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (1060)
Health Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Residential Communities Built on Brownfields	CHEN Xing, MA Jian-hua, LI Xin-ning, <i>et al.</i> (1068)
Study on Ecological Risk Assessment Technology of Fluoride Pollution from Arid Oasis Soil	XUE Su-yin, LI Ping, WANG Sheng-li, <i>et al.</i> (1075)
Rainfall Process and Nitrogen Input in Three Typical Forests of Jinyun Mountain	SUN Su-qi, WANG Yu-jie, WANG Yun-qi, <i>et al.</i> (1081)
Effects of Land Use and Landscape Pattern on Nitrogen and Phosphorus Exports in Lanlingxi Watershed of the Three Gorges Reservoir Area, China	HAN Li-yang, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (1091)
Changes and Influencing Factors of the Soil Organic Carbon in Farmland in the Last 30 Years on Hilly Loess Plateau; A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie, <i>et al.</i> (1098)
Organic Carbon and Carbon Mineralization Characteristics in Nature Forestry Soil	YANG Tian, DAI Wei, AN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1105)
Dynamic Change of Phosphorus Leaching of Neutral Purple Soil at Different Re-wetting Rate	ZHANG Si-lan, SHI Xiao-jun, GUO Tao (1111)
Effects of Thiourea on pH and Availability of Metal Ions in Acid Red Soil	YANG Bo, WANG Wen, ZENG Qing-ru, <i>et al.</i> (1119)
Growth Responses of Six Leguminous Plants Adaptable in Northern Shaanxi to Petroleum Contaminated Soil	SHAN Bao-qin, ZHANG Xiong-tao, CAO Qiao-ling, <i>et al.</i> (1125)
Plant N Status in the Alpine Grassland of the Qinghai-Tibet Plateau; Base on the N:P Stoichiometry	ZHANG Ren-yi, XU Dang-hui, CHEN Ling-yun, <i>et al.</i> (1131)
Development and Succession of Artificial Biological Soil Crusts and Water Holding Characteristics of Topsoil	WU Li, CHEN Xiao-guo, ZHANG Gao-ke, <i>et al.</i> (1138)
Carbon Dioxide Assimilation Potential, Functional Gene Amount and RubisCO Activity of Autotrophic Microorganisms in Agricultural Soils	CHEN Xiao-juan, WU Xiao-hong, JIAN Yan, <i>et al.</i> (1144)
Dynamics of Microbes and Enzyme Activities During Litter Decomposition of <i>Pinus massoniana</i> Forest in Mid-subtropical Area	SONG Ying, GU Xi-rong, YAN Hai-yuan, <i>et al.</i> (1151)
Levels and Possible Sources of Organochlorine Pesticides (OCPs) in Camphor (<i>Cinnamomum camphora</i>) Tree Bark from Southern Jiangsu, China	ZHOU Li, ZHANG Xiu-lan, YANG Wen-long, <i>et al.</i> (1159)
Combined Stress of Enhanced UV-B Radiation and 1,2,4-Trichlorobenzene Contamination on the Growth of Green Vegetable	LIU Cui-ying, FAN Jian-ling, XU Xiang-hua (1164)
Effect of Ectomycorrhizae on Heavy Metals Sequestration by Thermostable Protein in Rhizosphere of <i>Pinus tabulaeformis</i> Under Cu and Cd Stress	ZHANG Ying-wei, CHAI Li-wei, WANG Dong-wei, <i>et al.</i> (1169)
Isolation and Characterization of a Halotolerant <i>p</i> -nitroaniline Degrading Strain S8	SONG Cai-xia, DENG Xin-ping, LI Tian, <i>et al.</i> (1176)
Optimized Cultivation of a Bioflocculant M-C11 Produced by <i>Klebsiella pneumoniae</i> and Its Application in Sludge Dewatering	LIU Jie-wei, MA Jun-wei, LIU Yan-zhong, <i>et al.</i> (1183)
Speciation Analysis of Lead Losses from Anthropogenic Flow in China	LIANG Jing, MAO Jian-su (1191)
Establishment and Application of Pollutant Discharge-Environment Quality Model	LI Ming-sheng, SUN Yuan, CHEN Yuan-hang, <i>et al.</i> (1198)
Advances in the Pathway and Molecular Mechanism for the Biodegradation of Microcystins	YAN Hai, WANG Hua-sheng, LIU Xiao-lu, <i>et al.</i> (1205)

《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3月15日 35卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 3 Mar. 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