

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第10期

Vol.36 No.10

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

基于细颗粒物来源追踪技术的2013年12月上海市严重污染过程中PM _{2.5} 的源贡献分析·····	李莉, 安静宇, 严茹莎 (3543)
华北地区乡村站点(曲周)夏季PM _{2.5} 中二次无机组分的生成机制与来源解析·····	陈仕意, 曾立民, 董华斌, 朱彤 (3554)
成都市大气PM _{2.5} 中有机磷阻燃剂的污染水平及来源·····	印红玲, 李世平, 叶芝祥, 杨迎春, 梁金凤, 游俊杰 (3566)
不同生物质燃烧排放多环芳烃及糖醇类化合物的模拟研究·····	黄帅, 黄欣怡, 吴水平, 胡清华, 陈晓秋 (3573)
北京地区大气消光特征及参数化研究·····	陈一娜, 赵普生, 何迪, 董璠, 赵秀娟, 张小玲 (3582)
光助芬顿反应催化降解气体中甲苯·····	郑思灿, 陈天虎, 刘海波, 邹雪华, 朱承驻, 陈冬 (3590)
遗体火化二噁英类排放水平及影响因素·····	尹文华, 于晓巍, 韩静磊, 冯桂贤, 付建平, 杨艳艳, 鞠勇明, 张素坤 (3596)
我国餐厨废物生化处理设施恶臭排放特征分析·····	张妍, 王元刚, 卢志强, 韩萌, 商彬彬, 曹阳, 张君 (3603)
太湖湖表反照率时空特征及影响因子·····	曹畅, 李旭辉, 张弥, 刘寿东, 肖薇, 肖启涛, 徐家平 (3611)
基于GOCI影像的太湖水体漫衰减系数遥感反演·····	王珊珊, 李云梅, 王桥, 吕恒 (3620)
河口盐度梯度下短叶茳苳沼泽湿地土壤间隙水溶解性甲烷时空特征·····	杨平, 张子川, 杜威宁, 黄佳芳, 全川 (3633)
石家庄市土壤水分运移的稳定同位素特征分析·····	陈同同, 陈辉, 韩璐, 邢星, 付阳阳 (3641)
长寿湖水库垂直剖面不同形态汞的季节变化特征及其影响因素·····	白薇扬, 张成, 唐振亚, 赵铮, 王定勇 (3649)
三峡库区消落带4种典型植物根际土壤养分与氮素赋存形态·····	王晓峰, 袁兴中, 刘红, 张磊, 尉建军, 岳俊生 (3662)
湖泊水-沉积物界面DIC和DOC交换通量及耦合关系·····	王伟颖, 吕昌伟, 何江, 左乐, 颜道浩 (3674)
水体扰动条件下物质在沉积介质中的迁移·····	李邵龙, 陈道毅 (3683)
城市道路径流的排污特征·····	武俊良, 任玉芬, 王雪梅, 王效科, 陈利顶, 刘刚才 (3691)
杭州市余杭区典型农村暴雨径流污染特征·····	段圣辉, 赵钰, 单保庆, 唐文忠, 张文强, 张淑珍, 郎超 (3697)
海水淡化超滤-反渗透工艺沿程溴代消毒副产物变化规律·····	杨哲, 孙迎雪, 石娜, 胡洪管 (3706)
天然有机物和电解质对水中C ₆₀ 凝聚行为的影响·····	方华, 荆洁, 于江华, 王钰葶 (3715)
铅改性高岭土原位改良技术控制重污染河道底泥磷释放效果·····	王虹, 林建伟, 詹艳慧, 章喆, 王笛入 (3720)
污水管网中无机氮类营养盐变迁规律·····	金鹏康, 焦丁, 任武昂 (3730)
微好氧水解酸化在石化废水预处理中的应用研究·····	朱晨, 吴昌永, 周岳溪, 伏小勇, 陈学民, 邱延波, 吴晓峰 (3738)
倒置A ² /O-MBR组合工艺处理生活污水效能及膜污染特性·····	王旭东, 马亚斌, 王磊, 杨怡婷, 黄丹曦, 夏四清 (3743)
高氨氮对具有回流的PN-ANAMMOX串联工艺的脱氮影响·····	李祥, 崔剑虹, 袁砚, 黄勇, 袁怡, 刘忻 (3749)
苯甲酸盐厌氧驯化体系中三氯乙烯的还原脱氯特性·····	李姜维, 杨晓永, 胡安谊, 于昌平 (3756)
驯化污泥厌氧还原脱氯促进2,4,6-三氯酚矿化及胞外呼吸脱氯途径·····	宋佳秀, 李玲, 盛凡凡, 郭翠香, 张永明, 李祖元, 王天丽 (3764)
苯酚对厌氧氨氧化污泥脱氮效能长短期影响·····	杨朋兵, 李祥, 黄勇, 朱亮, 崔剑虹, 徐彬彬 (3771)
连续流好氧颗粒污泥系统处理低COD/N实际生活污水的工艺优化·····	鲁磊, 信欣, 鲁航, 朱辽东, 谢思建, 武勇 (3778)
FNA对好氧吸磷的长期抑制及污泥吸磷方式转化·····	马娟, 李璐, 俞小军, 孙雷军, 孙洪伟, 陈永志 (3786)
污水处理厂不同工艺的污泥脱水效能分析及其影响因素研究·····	刘吉宝, 李亚明, 吕鑑, 魏源送, 杨敏, 郁达伟 (3794)
残留过氧化氢对微波-过氧化氢-碱预处理后污泥水解酸化的影响·····	贾瑞来, 刘吉宝, 魏源送, 才兴 (3801)
大围山典型森林土壤有机氮垂直分布特征·····	丁咸庆, 马慧静, 朱晓龙, 陈珊, 侯红波, 彭佩钦 (3809)
缙云山不同土地利用方式对土壤活性有机碳、氮组分的影响·····	祁心, 江长胜, 郝庆菊, 李鉴霖 (3816)
三峡库区典型退耕还林模式土壤养分流失控制·····	吴东, 黄志霖, 肖文发, 曾立雄 (3825)
坡位与土层对喀斯特原生林土壤微生物生物量与丰度的影响·····	冯书珍, 苏以荣, 张伟, 陈香碧, 何寻阳 (3832)
不同种植方式对亚热带红壤微生物多样性的影响·····	沈冰洁, 祝贞科, 袁红朝, 葛体达, 王久荣, 陈明利, 吴晓英, 吴金水 (3839)
有色冶金区土壤-玉米系统汞累积及健康风险·····	纪小凤, 郑娜, 王洋, 刘强, 张静静 (3845)
改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响·····	陈永华, 张富运, 吴晓英, 梁希, 袁斯文 (3852)
菹草乙酸酯组分抑菌活性物质的分离纯化和鉴定·····	孙颖颖, 苏振霞, 浦寅芳, 肖辉, 王长海 (3860)
血吸虫病疫区水生生物体内氯苯化合物的污染特征与潜在风险·····	李昆, 赵高峰, 周怀东, 赵健, 张盼伟, 刘巧娜, 王兴勋, 刘晓茹 (3866)
生物传感细胞ADP1_pWHLux在水环境急性毒性检测中的应用·····	唐慧, 宋一之, 姜博, 陈光玉, 贾建丽, 张旭, 李广贺 (3872)
虹鳟鱼鳃及肝脏多种CYP1基因表达模式作为生物标志物监测海河水污染状况·····	高锴, 闫佩, 檀翠玲, 罗彦鹤, 孙静, Maria E. Jönsson, Ingvar Brandt, 唐运平 (3878)
纳米氧化锌对斑马鱼肝脏的毒性效应·····	刘林, 赵群芬, 金凯星, 朱帅旗, 王小飞, 吕佳昀 (3884)
黄连根茎浸提物对隆线蚤的急性毒性作用·····	陈亚楠, 袁玲 (3892)
发酵稻壳对亚铁离子和硫离子的吸附-解吸附特性·····	谢晓梅, 廖敏, 华嘉媛, 陈娜, 张楠, 徐培智, 解开治, 徐昌旭, 刘光荣 (3896)
搅拌棒吸附萃取-气相色谱-质谱联用测定海水中邻苯二甲酸酯·····	高晨晨, 李锋民, 卢伦, 孙玥 (3906)
COD组分分析的实验条件及结果可靠性分析·····	李志华, 张银, 韩杏, 余科, 李汝佳 (3913)
养猪废水和污泥中11种兽用抗生素的同时分析技术及其在生物降解过程的应用·····	丁佳丽, 刘锐, 郑炜, 余卫娟, 叶朝霞, 陈吕军, 张永明 (3918)
土壤微生物产电技术及其潜在应用研究进展·····	邓欢, 薛洪婧, 姜允斌, 钟文辉 (3926)
《环境科学》征订启事 (3553)	
《环境科学》征稿简则 (3589)	
信息 (3705, 3755, 3763, 3800)	

改良剂对4种木本植物的铅锌耐性、亚细胞分布和化学形态的影响

陈永华, 张富运, 吴晓芙*, 梁希, 袁斯文

(中南林业科技大学环境科学与工程研究中心, 长沙 410004)

摘要: 本研究以4种耐铅锌木本植物夹竹桃(*Nerium oleander*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、泡桐(*Paulownia*)和苧麻(*Boehmeria*)为材料, 在不同改良剂浓度下(CK组: 100% 铅锌矿渣 $\pm$ 少量磷肥、改良一: 85% 铅锌矿渣 $\pm$ 10% 泥炭土 $\pm$ 5% 菌肥 $\pm$ 少量磷肥、改良二: 75% 铅锌矿渣 $\pm$ 20% 泥炭土 $\pm$ 5% 菌肥 $\pm$ 少量磷肥), 进行了耐性木本植物富集与转移能力以及Pb、Zn在4种木本植物不同部位的亚细胞分布和化学形态分析。结果表明: ①4种植物种植后基质中重金属的浓度基本低于种植前, 夹竹桃与苧麻改良一与改良二之间差异不显著, 泡桐改良二效果显著优于改良一, 栾树改良一效果显著优于改良二; 4种植物地上部对Pb、Zn的富集系数都较低, 但具有较高的转移系数, 适当的基质改良有利于提高植物对Pb、Zn的富集与转移能力。②Pb、Zn在4种植物各部位的亚细胞分布以细胞壁组分和可溶性组分为主, 在线粒体、叶绿体和细胞核等细胞器组分中分布较少; 与CK组相比, 两改良组使可溶性组分对Pb的滞留作用和细胞壁对Zn的滞留作用在增强。③Pb在植物各部位的化学形态以盐酸、氯化钠和乙醇提取态为主, 其他化学形态含量极少; Zn则以残留态、盐酸、醋酸、氯化钠、水和乙醇提取态这6种形态存在, 且都具较高分配比例。与CK组相比, 两改良组使植物各部位活性较弱的Pb的化学形态比例减少, 活性较强的化学形态比例增加; Zn则是根部活性较强的化学形态比例增加, 地上部活性较强的化学形态比例减少。

关键词: 改良剂; 铅锌; 耐性植物; 亚细胞分布; 化学形态

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)10-3852-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.10.039

Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants

CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu*, LIANG Xi, YUAN Si-wen

(Center of Environment Science and Engineering Research, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: Four kinds of lead-zinc tolerant woody plants: *Nerium oleander*, *Koelreuteria paniculata*, *Paulownia* and *Boehmeria* were used as materials to estimate their enrichment and transferable capacity of lead (Pb) and zinc (Zn) and analyze the subcellular distribution and chemical speciation of Zn and Pb in different parts of plants, under different modifier concentrations (CK group: 100% lead-zinc slag plus a small amount of phosphate fertilizer, improved one: 85% of lead-zinc slag $\pm$ 10% peat $\pm$ 5% bacterial manure plus a small amount of phosphate fertilizer, improved two: 75% lead-zinc slag $\pm$ 20% peat $\pm$ 5% bacterial manure $\pm$ a small amount of phosphate). Results showed that: ①The content of Pb, Zn in matrix after planting four kinds of plants was lower than before, no significant difference between improved one and improved two of *Nerium oleander* and *Boehmeria* was found, but improved two was better than improved one of *Paulownia*, while improved one was better than improved two of *Koelreuteria paniculata*; Four plants had relatively low aboveground enrichment coefficient of Pb and Zn, but had a high transfer coefficient, showed that the appropriate modifier concentration was able to improve the Pb and Zn enrichment and transfer ability of plants. ②In subcellular distribution, most of Pb and Zn were distributed in plant cell wall components and soluble components while the distribution in cell organelles such as mitochondria, chloroplasts and nucleus component were less. Compared with CK group, two improved group made soluble components of the cell walls of Pb fixation and retention of zinc role in the enhancement. ③As for the chemical forms of Pb and Zn in plants, the main chemical forms of Pb were hydrochloric acid, sodium chloride and ethanol extractable forms, while other chemical form contents were few, the main chemical forms of Zn were different based on plant type. Compared with CK group, the proportion of the active Pb chemical form in different plant parts decreased in two improved groups, while the proportion of strong activity chemical forms increased; two improved groups led strong activity Zn chemical form of root increased, while strong activity Zn chemical form of aboveground decreased.

Key words: modifier concentration; lead-zinc; tolerant plants; subcellular distribution; chemical form

收稿日期: 2015-02-26; 修订日期: 2015-04-28

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201509037); 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07504001); 国家“十二五”科技支撑计划项目(2012BAC09B03); 湖南省环境科学与工程重点学科建设项目

作者简介: 陈永华(1977~), 男, 博士后, 副教授, 主要研究方向为污染生态学, E-mail: chen Yonghua3333@163.com

* 通讯联系人, E-mail: wuxiaofu530911@vip.163.com

植物抵抗重金属的毒性通常体现为对重金属的避性和耐性,其中耐性又包括对重金属的排斥和富集,植物对重金属的富集主要指重金属经植物吸收、转运后在植物体内以某种不具生物活性的化学结合形态存在于不同的器官组织中,并在植物体内产生细胞区隔化作用,沉淀到细胞壁、进入液泡、与有机酸或蛋白质络合等^[1~3],从而减轻其对植物的毒害。目前对于重金属在植物体内结合形态以及亚细胞分布的研究大多针对超富集植物且多为草本^[4,5],对于耐性植物尤其是木本植物的研究很少。相比于草本植物,木本植物具有生物量大、根系发达、寿命长、抗逆性强、且经济价值高等优点^[6,7],筛选对多种重金属具有耐性的木本植物用于矿区植物恢复,可以实现环境治理与经济增收的双赢,具有广泛的应用前景。经本课题组前期研究发现,夹竹桃 (*Nerium oleander*)、栾树 (*Koelreuteria paniculata*)、泡桐 (*Paulownia*) 和苧麻 (*Boehmeria*) 这4种植物均能在改良铅锌尾矿渣中生长良好,对高浓度 Pb、Zn 复合污染表现出较强的耐性。在此基础上,本研究进一步分析4种植物对 Pb、Zn 的富集能力及 Pb、Zn 在植物体内的亚细胞分布和化学形态,以揭示4种植物对 Pb、Zn 复合污染的耐性及其耐性机制。

铅锌矿渣具有物理结构不良、持水保肥能力差;极端贫瘠、N、P、K 及有机含量极低;极端 pH; 重金属含量高等特点,影响植物正常生长,因此基质改良十分必要^[8]。通过查阅文献并结合前人的研究结果,本实验选择磷肥、泥炭土和有机菌肥作为基质改良剂,在前期实验中发现,将磷肥、泥炭土和微生物肥料与铅锌矿渣以不同比例混合进行基质改良,可以明显提高植物成活率,且改良剂加入比例越大,植物长势越好,但在工程应用中,要综合考虑植物修复效果与改良成本,因此本文研究不同改良配比对植物体内重金属含量及分布的影响,旨在为工程应用中选择合适的基质配比和进一步优化配比提供参考。

1 材料与方法

1.1 基质改良

供试基质改良为磷肥(磷酸二铵)、泥炭土和有机菌肥,磷肥、泥炭土购自长沙市红星花卉市场,不含重金属,有机菌肥为本课题组自制,配置方法为:分别配置氢氧化钠、磷酸二氢钠、磷酸氢二钠的混合液体作为基础营养液备用,少量速效磷肥、高浓度抗性菌株 1%、有机肥原料(甘蔗渣:米糠=3:7)

4%、泥炭土 15%,堆放发酵 15 d 备用。

盆栽基质设置 3 个处理 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$): CK 组 (100% 铅锌矿渣 $\pm$ 少量磷肥): $3\,424.62\text{ Pb} \pm 4\,205.88\text{ Zn}$; 改良一 (85% 铅锌矿渣 $\pm$ 10% 泥炭土 $\pm$ 5% 菌肥 $\pm$ 少量磷肥): $3\,240.30\text{ Pb} \pm 3\,973.34\text{ Zn}$; 改良二 (75% 铅锌矿渣 $\pm$ 20% 泥炭土 $\pm$ 5% 菌肥 $\pm$ 少量磷肥): $1\,663.78\text{ Pb} \pm 3\,435.53\text{ Zn}$; 测得 CK 组、改良一和改良二的 pH 分别为: 8.08、6.74 和 6.79。先用大盆将每组基质处理按比例混均后装盆,花盆采用口径为 40 cm,储量为 11 kg 的塑料花盆。

1.2 植物培养

供试植物为 Pb、Zn 耐性木本植物夹竹桃 (*Nerium oleander*)、栾树 (*Koelreuteria paniculata*)、泡桐 (*Paulownia*) 和苧麻 (*Boehmeria*),植物幼苗购自长沙红星花卉市场,所选植物苗高 10 ~ 15 cm,生长健壮,长势良好,无病虫害。每组处理每种植物 3 个平行,每个平行 3 株苗,植物移栽完成时浇足定兜水,前期适当遮阴防晒,后期自然条件下培养,水分管理遵循“不干不浇、浇则浇透”的原则。植物种植时间为 2013 年 3 月 1 日,收获时间为 2013 年 10 月 1 日。

土壤和植物样品采集方法为:全株收获植株,并在收获植物时将其根际土壤充分混匀后,除去杂草、石块、肥料团块等杂物,采集约 1 ~ 2 kg 样品置于洁净的聚乙烯塑料袋中,带回实验室;将收获植株先用自来水冲洗,再用 $20\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ Na-EDTA}$ 交换 20 min,去除根系表面吸附的 Zn^{2+} 和 Pb^{2+} ,最后用去离子水冲洗干净,吸干表面水分。每个处理的植物样品分为根、茎和叶这 3 个部位,每个部位分为 3 个部分,分别用于测定重金属全量、亚细胞组分和化学形态,剩余样品保存于 -4°C 冰箱内备用;植物根系土壤样品自然风干、磨碎,过 100 目筛备用。土壤样品在自然条件下风干,过 60 目筛备用。

1.3 指标测定

(1) 植物对 Pb、Zn 的富集与转移能力指标的测定

植物和植物根系土壤样品重金属含量采用火焰原子吸收分光光度计测量^[9]。植物样品采用“硝酸-高氯酸体系湿法”消解、根系土壤样品采用“王水-高氯酸电热板法”消解。重金属富集系数和转移系数计算公式如下:

富集系数 (BCF) = 植物体内重金属含量/根系土壤中重金属含量 (1)

转移系数 (TF) = 植物地上部分重金属含量/根部重金属含量 (2)

(2)植物亚细胞组分的分离和化学形态分析

采用差速离心法分离植物根、茎、叶中不同的细胞组分;植物体内重金属化学形态采用化学试剂逐步提取法提取^[10,11].

1.4 数据处理

采用 SPSS 12.0 软件分析数据.

2 结果与分析

2.1 Pb、Zn 的富集与转移能力比较

在不同的改良剂浓度下 4 种植物种植前后基质、植物地上部分与地下部 Pb 和 Zn 的含量变化见表 1.

表 1 植物及基质样品中 Pb 和 Zn 的含量/mg·kg⁻¹

Table 1 Pb and Zn contents in samples of plants and matrix/mg·kg⁻¹

重金属	植物	改良	基质		植物	
			种植前	种植后	地下部	地上部
Pb	夹竹桃	CK	3 424.62	2 009.48 ± 35.28a	215.40 ± 17.25a	64.83 ± 2.14a
		改良一	3 240.30	1 585.44 ± 26.53b	105.60 ± 6.51b	38.84 ± 2.03b
		改良二	1 663.78	1 610.50 ± 16.97b	60.55 ± 2.33c	34.75 ± 0.83c
	栾树	CK	3 424.62	2 323.84 ± 6.72a	85.55 ± 7.42a	60.49 ± 1.72b
		改良一	3 240.30	1 698.53 ± 1.17c	61.25 ± 11.38b	80.48 ± 7.36a
		改良二	1 663.78	1 760.42 ± 11.38b	82.90 ± 14.00a	69.14 ± 7.59b
	泡桐	CK	3 424.62	2 001.25 ± 2.82a	77.80 ± 2.12a	103.73 ± 3.42a
		改良一	3 240.30	1 711.20 ± 20.99b	70.20 ± 4.10b	58.99 ± 2.50b
		改良二	1 663.78	1 467.16 ± 26.99c	64.60 ± 10.61b	32.49 ± 2.33c
	苎麻	CK	3 424.62	2 253.00 ± 71.70a	113.25 ± 7.85c	111.59 ± 8.83b
		改良一	3 240.30	1 668.66 ± 3.53b	138.15 ± 9.97b	132.57 ± 4.63b
		改良二	1 663.78	1 715.76 ± 36.78b	154.35 ± 0.49a	142.20 ± 11.03a
Zn	夹竹桃	CK	4 205.88	3 748.75 ± 79.39a	608.70 ± 36.06a	137.27 ± 1.02a
		改良一	3 973.34	3 353.71 ± 166.63b	139.00 ± 8.06b	89.42 ± 4.37b
		改良二	3 435.53	3 305.08 ± 115.81b	120.65 ± 6.43b	83.71 ± 0.06c
	栾树	CK	4 205.88	3 648.63 ± 131.87a	186.45 ± 4.31a	111.95 ± 2.40a
		改良一	3 973.34	2 760.80 ± 14.21c	67.90 ± 2.26b	51.97 ± 0.27c
		改良二	3 435.53	3 083.60 ± 85.01b	53.75 ± 1.63c	61.21 ± 1.79b
	泡桐	CK	4 205.88	3 808.01 ± 216.12a	133.95 ± 6.86a	215.91 ± 1.62a
		改良一	3 973.34	3 368.26 ± 76.66b	136.05 ± 0.21a	170.08 ± 1.38c
		改良二	3 435.53	2 672.95 ± 95.98c	125.70 ± 21.35a	182.48 ± 0.67b
	苎麻	CK	4 205.88	4 111.51 ± 163.36a	167.70 ± 0.14a	192.63 ± 2.28a
		改良一	3 973.34	2 969.06 ± 158.78b	102.35 ± 1.48c	91.65 ± 14.43c
		改良二	3 435.53	2 962.76 ± 141.05b	107.60 ± 0.28b	154.54 ± 1.67b

2.2.1 植物种植前后基质中 Pb、Zn 含量比较

从基质中 Pb、Zn 含量的变化来看:4 种植物种植后的浓度基本低于种植前,表明 4 种植物改良处理对土壤中 Pb、Zn 修复效果优于其他处理;夹竹桃与苎麻改良一与改良二之间差异不显著,泡桐改良二效果显著优于改良一,栾树出现改良一效果显著优于改良二.因此,总体上采用改良剂效果优于没有改良的对照,但是不同的植物应该采用不同的改良剂浓度配比.

2.2.2 植物不同部位 Pb、Zn 含量比较

从不同改良剂浓度处理对植物不同部位 Pb、Zn 含量的影响来看:植物间差异明显.如夹竹桃与泡桐各处理组 Pb、Zn 含量改良组 > CK;栾树、苎麻夹竹桃各处理组 Pb、Zn 含量变化没有规律;因

此,改良剂对植物不同部位 Pb、Zn 含量的影响在植物物种之间差异较大.

2.2.3 植物的富集系数与转移系数比较

从植物地上部 Pb、Zn 富集系数(图 1)可以看出:4 种植物地上部对 Pb、Zn 的富集系数都比较低,都不足 0.1.同时,同种植物对 Pb 和 Zn 的富集系数存在相互竞争的现象,当 Pb 富集系数较高时,其 Zn 富集系数就较低,当 Pb 富集系数较低时,其 Zn 富集系数就较高.

从 4 种植物 Pb、Zn 转移系数(图 2)可以看出:泡桐和苎麻对 Pb、Zn 的平均转移系数高于夹竹桃和栾树.从同种植物 3 种处理来看,夹竹桃以改良二处理下 Pb、Zn 转移系数最高,栾树两改良组 Pb、Zn 转移系数都比较高,泡桐以 CK 组 Pb、Zn 转移系

数最高,改良一次之,苎麻各处理组 Pb、Zn 转移系数都比较高. 综上所述,适当的基质改良有利于植

物对 Pb、Zn 的富集与转移,合适的基质配比因植物种类而异.

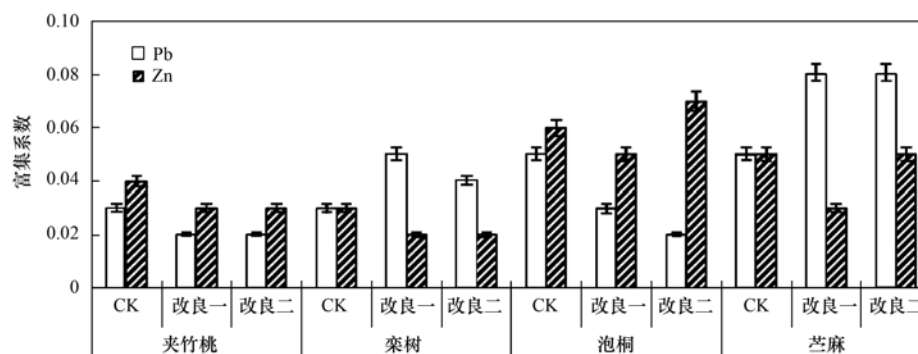


图 1 植物地上部的 Pb、Zn 富集系数

Fig. 1 Plants enrichment coefficient of Pb and Zn

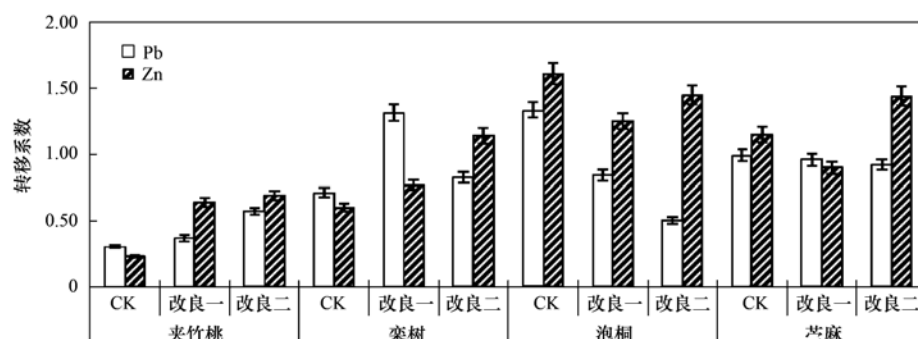


图 2 植物的 Pb、Zn 转移系数

Fig. 2 Plants Transfer coefficient of Pb and Zn

2.2 Pb、Zn 在植物体内的亚细胞分布

2.2.1 Pb 在植物不同部位的亚细胞分布情况

从植物不同部位 Pb 的亚细胞分布情况(见图 3)来看,细胞壁(F1)和可溶性组分(F4)是 Pb 的主要分布位点,由于 Pb 不是植物生长所必需的元素,为减少 Pb 对植物体的伤害,植物叶绿体和细胞核(F2)、线粒体(F3)等细胞器组分中的 Pb 分布量极少. 从各处理组 Pb 的亚细胞分配比例来看,CK 处理下,除夹竹桃的根、叶部及栾树的根部出现 F4 > F1,其它植物各部位均为 F1 > F4; 改良一和改良二处理下,4 种植物各部位 F4 的分配比例都有所增加,尤其以改良一处理下夹竹桃、栾树和泡桐这 3 种植物茎、叶部增幅最大,其分配比例增加至 100%,表明改良剂的加入使可溶性组分对 Pb 的滞留作用增强了.

2.2.2 Zn 在植物不同部位的亚细胞分布情况

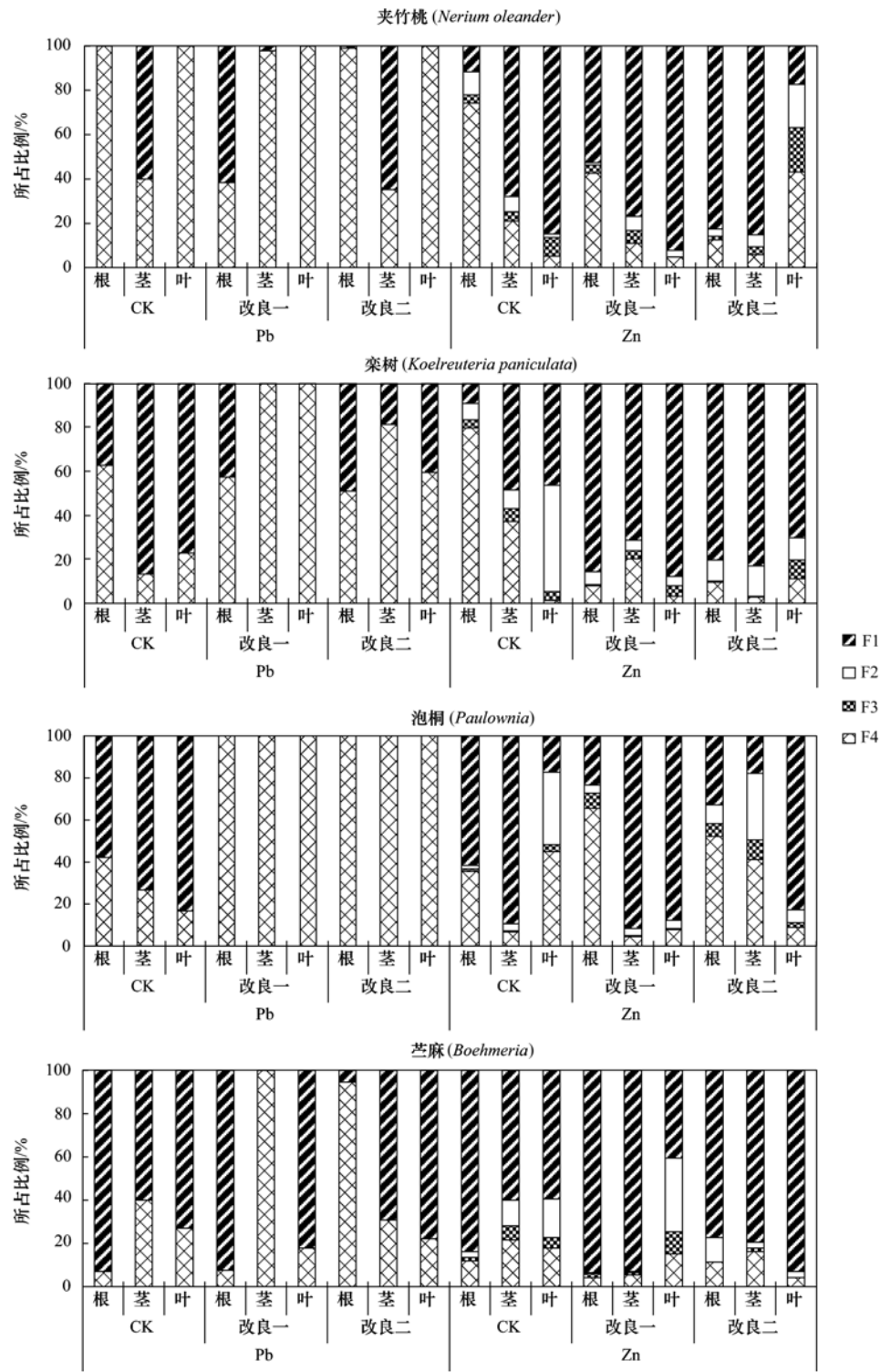
从植物不同部位 Zn 的亚细胞分布情况(见图 3)来看,细胞壁(F1)和可溶性组分(F4)也是 Zn 的主要分布位点,在细胞核、叶绿体(F2)、线粒体

(F3)等细胞器中也有一定的分布,这可能与 Zn 是植物生长所必需的微量元素有关. 从不同处理下各组分的分配比例来看,CK 处理下,夹竹桃和栾树根、茎部以(F4)最高,泡桐和苎麻以 F1 最高; 栾树、泡桐和苎麻这 3 种植物叶部以 F1 或 F4 最高,其次是 F2,且其 F2 远远高于夹竹桃,与植物叶片大,光合作用所需 Zn 含量高有关. 与 CK 组相比,改良一和改良二处理下,4 种植物地上部 Zn 在细胞壁中的分配比例均明显增加,表明改良剂的加入使细胞壁对 Zn 的滞留作用增强了.

2.3 Pb、Zn 在植物体内的化学形态分布

2.3.1 Pb 在植物不同部位的化学形态分布比较

由 Pb 在植物不同部位的化学形态分布情况(见图 4)来看,Pb 主要以盐酸、氯化钠和乙醇提取态这 3 种形态存在,各化学形态所占比例植物间差异较大. 从不同处理下各形态的分配比例来看,CK 处理下,夹竹桃、栾树和泡桐这 3 种植物根部以乙醇提取态为主导形态,苎麻以盐酸提取态为主导形态; 4 种植物茎、叶均以盐酸提取态

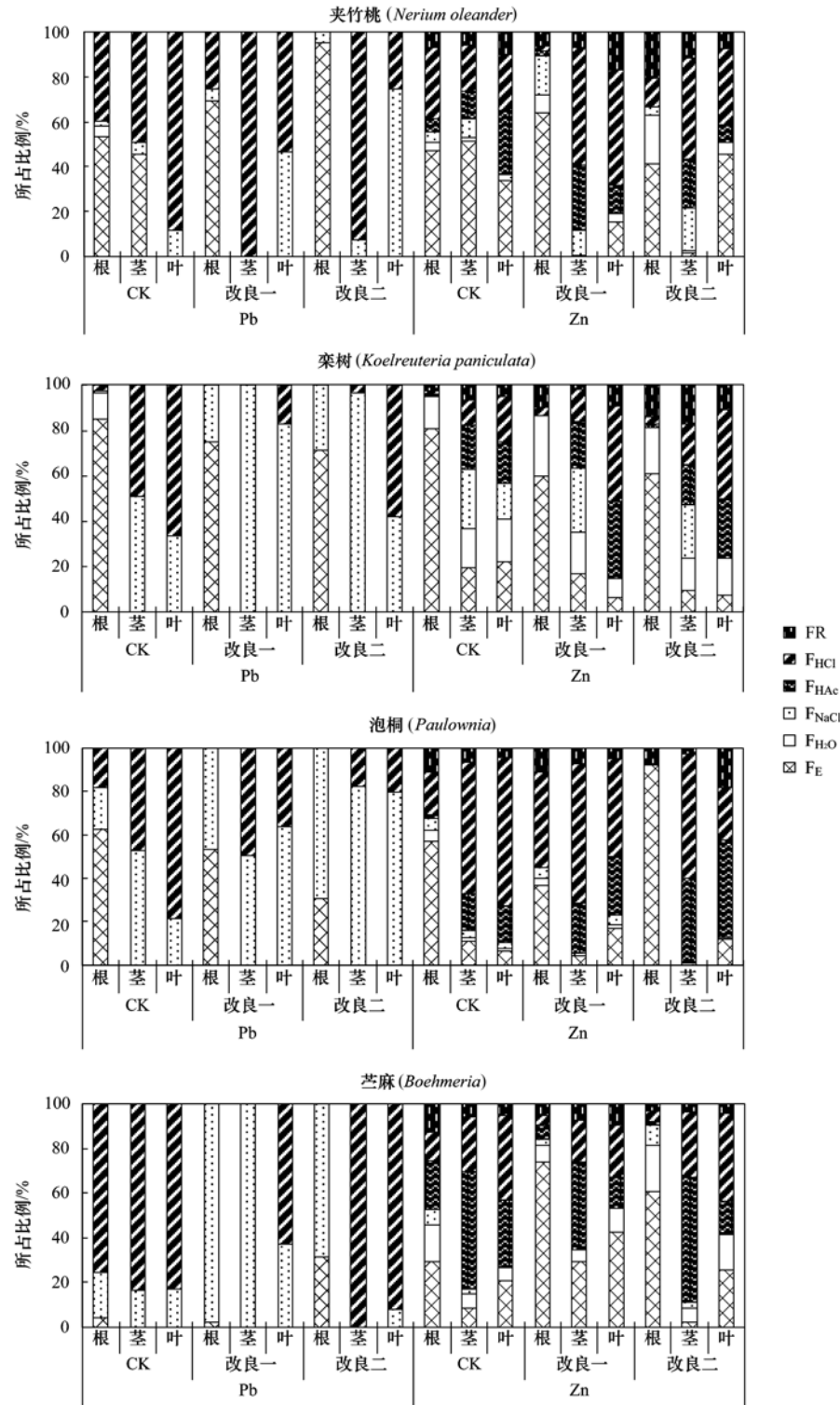


F1 为细胞壁组分; F2 为细胞核和叶绿体组分; F3 为线粒体组分; F4 为可溶性组分
图3 Pb、Zn 在4种植物体内的亚细胞分布情况

Fig. 3 Subcellular distribution of Pb and Zn in four kinds of plants

为主导形态. 与 CK 组相比,两改良处理下,4 种植物各部位中活性较弱的一些化学形态所占比例显著下降,活性较强的一些化学形态所占比例则显著上升. 其中,改良一和改良二处理下,夹竹

桃根部盐酸提取态分别下降了 15% 和 40%, 叶部分别下降了 45% 和 63%; 栾树和泡桐盐酸提取态和乙醇提取态所占比例下降,氯化钠提取态所占比例上升,成为茎、叶部主要的化学形态,且



FR 为残留态、F_{HCl} 为盐酸提取态、F_{HAc} 为醋酸提取态、F_{NaCl} 为氯化钠提取态、F_{H₂O} 为水提取态、F_E 为乙醇提取态

图 4 Pb、Zn 在 4 种植物体内的化学形态分布

Fig. 4 Chemical speciation of Pb and Zn in four kinds of plants

两改良组间差异不大；苕麻两改良组间呈现不同变化规律,改良一根、茎部氯化钠提取态增加至 98% ~ 100%,改良二茎叶部盐酸提取态比例增加至 92% ~ 100%。

2.3.2 Zn 在植物不同部位的化学形态分布比较

由 Zn 在植物体内的化学形态分布情况(见图 4)可以看出,Zn 在植物体内以残留态、盐酸提取态、醋酸提取态、氯化钠提取态、水提取态和乙醇提取态这

6种形态存在,各化学形态所占比例植物间差异也较大.从不同处理下各形态的分配比例来看,CK处理下,4种植物根部以乙醇提取态、水提取态和氯化钠提取态为主导形态,三者占55%~97%,茎、叶部以醋酸提取态、盐酸提取态和残留态等化学形态为主导形态,各种形态所占比例均较大.与CK组相比,两改良处理下,4种植物根部活性较强的乙醇和水提取态两种化学形态所占比例增加了10%~30%,地上部活性较强的化学形态比例减少.

3 讨论

3.1 4种木本植物对Pb、Zn的富集与转运能力

Pb胁迫至一定程度可以导致酶活性受到抑制,植物失水,细胞膜渗透性改变,扰乱植物对矿质营养元素的吸收等^[12].大部分植物吸收的Pb主要蓄集在植物根部,如玉米、洋葱、黄扇羽豆和茶树根系中的Pb是地上部的8~150倍^[13],Pb在植物根系中的过量积累主要是根系组织的内皮层细胞起到了横向截留作用,限制了Pb向地上部转移,从而减轻Pb对植物地上部的伤害.Zn是植物生长所必需的微量元素之一,但是过量的锌也会对植物产生毒害作用,抑制根的生长,导致叶片褪绿而黄化,光合、蒸腾降低,植株矮化,分蘖和生物量都减少等^[14,15].本研究盆栽基质中的Pb、Zn含量分别高达1 663.78~3 424.62 mg·kg⁻¹和3 435.53~4 205.88 mg·kg⁻¹,远远超过植物的正常耐受范围,供试的4种植物均成活下来,耐性较强,且表现出较强的富集Pb、Zn的能力;4种植物对Pb、Zn的富集与转移系数虽未达到超富集植物标准,但可以通过基质改良的方法提高植物的长势和生物量,进而提高植物体内重金属的总体含量,取得良好的修复效果.

3.2 Pb、Zn在植物体内的亚细胞分布

细胞壁固持和液泡的区隔化是植物体内重金属解毒的两大重要途径^[16,17].有研究表明侧柏和国槐等植物中,Pb主要分布在细胞壁和以液泡为主的可溶部分中,只有少量的分布在叶绿体、线粒体、细胞核等细胞器中^[18],与本研究类似.细胞壁是重金属离子进入细胞的第一道屏障,细胞壁上的多糖分子和蛋白质分子具有大量的羟基、羧基、醛基、氨基等亲金属离子的配位基团,这些金属配位体能与细胞内金属离子结合,从而减少金属离子的跨膜运输,降低细胞原生质体内金属离子的浓度,维持植物细胞的正常生理代谢^[16].在非超富集植物再力花体内,Zn通过区隔化分布及与金属配位体结合表现

出一定的解毒能力,并与常见的超富集植物略有不同:低浓度Zn处理下,Zn主要分布于根部细胞壁,其次为细胞核.随着处理浓度的提高,可溶部分成为Zn的最主要分布位点,其次为细胞壁,表明细胞壁对重金属的阻隔作用存在一定限值^[19].当细胞壁结合的金属离子达到饱和点时,进入细胞内的重金属离子可通过液泡输送来降低其在原生质体中的浓度,或利用液泡的区隔化作用将重金属与胞内其他物质相隔离,并通过有机酸、蛋白质和生物碱等与重金属相结合而降低其活性,从而使植物表现出耐性^[20,21].这与本研究结果一致,在CK处理下,Zn、Pb在细胞壁中的所占比例较高,其次是可溶性组分,改良剂的加入使Pb在可溶性组分中的比例和Zn细胞壁中的比例所增加.

3.3 Pb、Zn在植物体内的化学形态

重金属经过植物吸收、转运后,会以不同化学形态存在于不同的器官组织中,借以限制重金属在植物体内的移动,从而减轻其对植物的毒害^[22,23].采用乙醇、去离子水、氯化钠、醋酸和盐酸等不同提取剂,可以顺序性提取植物组织中的不同结合形态的重金属^[24,25].在超富集植物圆锥南芥(*Arabispiculata franch*)和东南景天(*Sedumalfredii*)根系中,Zn主要以乙醇和氯化钠提取态为主,叶片中Zn主要以乙醇、水、氯化钠提取态为主,表明氨基酸盐、果胶酸、蛋白质在解毒Zn毒害过程中起重要作用^[26].在超富集植物长柔毛委陵菜(*Potentilla grifithii* Hook)体内,叶片中乙醇和水提取态Zn占总量的61%~69%,叶柄和根中氯化钠和乙醇提取态占总量的62%~73%.本研究中,Zn在4种耐性植物体内的化学形态分配与超富集植物基本相同,Zn主要与蛋白质、氨基酸以及水溶性有机酸等结合,形成毒性更小的化合物,从而降低了Zn对植物的毒害.Pb在4种耐性植物体内的化学形态分配因植物品种有差异.

4 结论

(1)从夹竹桃(*Nerium oleander*)、栾树(*Koelreuteria paniculata*)、泡桐(*Paulownia*)和苧麻(*Boehmeria*)这4种植物在不同改良剂浓度种植后的基质Pb、Zn含量的变化来看:4种植物都出现改良剂效果优于对照的规律,但是不同的植物对改良剂浓度配比要求不一致,如:泡桐改良二效果显著优于改良一,栾树出现改良一效果显著优于改良二,夹竹桃与苧麻改良一与改良二之间差异不显著.

(2) 从植物不同部位 Pb 的亚细胞分布情况来看: 细胞壁(F1)和可溶性组分(F4)是 Pb 的主要分布位点, 植物叶绿体和细胞核(F2)、线粒体(F3)等细胞器组分中的 Pb 分布量极少; 从植物不同部位 Zn 的亚细胞分布情况来看, 细胞壁(F1)和可溶性组分(F4)也是 Zn 的主要分布位点, 在细胞核、叶绿体(F2)、线粒体(F3)等细胞器中也有一定的分布。与对照比较, 改良组使可溶性组分对 Pb 的滞留作用和细胞壁对 Zn 的滞留作用在增强。

(3) 从 Pb、Zn 在植物体内的化学形态分布来看: Pb 在植物各部位的化学形态以盐酸、氯化钠和乙醇提取态为主, 其他化学形态含量极少; Zn 则以残留态、盐酸、醋酸、氯化钠、水和乙醇提取态 6 种形态存在, 且都具较高分配比例。与 CK 组相比, 两改良组使植物各部位活性较弱的 Pb 的化学形态比例减少, 活性较强的化学形态比例增加; Zn 则是根部活性较强的化学形态比例增加, 地上部活性较强的化学形态比例减少。

参考文献:

- [1] 张富运, 陈永华, 吴晓芙, 等. 铅锌超富集植物及耐性植物筛选研究进展[J]. 中南林业科技大学学报, 2012, **32**(12): 92-96.
- [2] Huang G Y, Wang Y S. Expression and characterization analysis of type 2 metallothionein from grey mangrove species (*Avicennia marina*) in response to metal stress[J]. Aquatic Toxicology, 2010, **99**(1): 86-92.
- [3] Balestrazzi A, Botti S, Zelasco S, et al. Expression of the *PbMT_{Al}* gene in white poplar engineered with the MAT system is associated with heavy metal tolerance and protection against 8-hydroxy-2'-deoxyguanosine mediated-DNA damage [J]. Plant Cell Reports, 2009, **28**(8): 1179-1192.
- [4] 何东, 邱波, 彭尽晖, 等. 湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3595-3560.
- [5] 周小勇, 仇荣亮, 胡鹏杰, 等. 镉和铅对长柔毛委陵菜体内锌的亚细胞分布和化学形态的影响[J]. 环境科学, 2008, **29**(7): 2028-2036.
- [6] 陈岩松, 吴若菁, 庄捷, 等. 木本植物重金属毒害及抗性机理[J]. 福建林业科技, 2007, **34**(1): 50-55.
- [7] 罗赵慧, 田大伦, 田红灯, 等. 湘潭锰矿废弃地栎树人工林微量元素生物循环[J]. 生态学报, 2013, **33**(20): 6517-6525.
- [8] 张晓君, 杨胜香, 段纯, 等. 蘑菇渣作为改良剂对铅锌尾矿改良效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(3): 526-531.
- [9] Zu Y Q, Li Y, Chen J J, et al. Hyperaccumulation of Pb, Zn and Cd in herbaceous grown on lead-zinc mining area in Yunnan, China[J]. Environment International, 2005, **31**(5): 755-762.
- [10] Weigel H J, Jäger H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants[J]. Plant Physiology, 1980, **65**(3): 480-482.
- [11] Gabbrilli R, Panddini T, Vergnano O, et al. Comparison of two serpentine species with different nickel tolerance strategies [J]. Plant and Soil, 1990, **122**(2): 271-277.
- [12] Reddy A M, Kumar S G, Jyothsnakumari G, et al. Lead induced changes in antioxidant metabolism of horsegram (*Macrotyloma uniflorum* (Lam.) Verdc.) and bengalgram (*Cicer arietinum* L.) [J]. Chemosphere, 2005, **60**(1): 97-104.
- [13] 徐劼, 于明革, 陈英旭, 等. 铅在茶树体内的分布及化学形态特征[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(4): 891-896.
- [14] 孟桂元, 蒋端生, 柏连阳, 等. Cd/Sb/Pb 复合污染对苧麻生长及吸收富集特征的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, **35**(5): 36-41.
- [15] 徐进, 魏嵬, 韩璐, 等. 重金属对油菜种子萌发和胚根生长的影响[J]. 西北植物学报, 2007, **27**(11): 2263-2268.
- [16] 杨亚洲, 张春华, 郑青松, 等. 碱蓬和滨藜对镉和钠吸收、转运及亚细胞分布特性的比较研究[J]. 农业环境科学学报, 2015, **34**(4): 619-626.
- [17] 周丽珍, 罗璇, 何宝燕, 等. NaCl 胁迫下苋菜中镉的亚细胞分布及转运研究[J]. 生态环境学报, 2015, **24**(1): 139-145.
- [18] 周芙蓉, 王进鑫, 张青, 等. 侧柏和国槐叶片中铅的化学形态与分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(11): 2121-2127.
- [19] 李冬香, 陈清西. 锌在再力花体内的富集性及亚细胞分布和化学形态研究[J]. 中国生态农业学报, 2013, **21**(9): 1114-1118.
- [20] He S Y, Wu Q L, He Z L. Effect of DA-6 and EDTA alone or in combination on uptake, subcellular distribution and chemical form of Pb in *Lolium perenne* [J]. Chemosphere, 2013, **93**(11): 2782-2788.
- [21] Li C C, Dang F, Cang L, et al. Integration of metal chemical forms and subcellular partitioning to understand metal toxicity in two lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars [J]. Plant and Soil, 2014, **384**(1-2): 201-212.
- [22] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckermia nivea* (L.) Gaud. [J]. Environmental and Experimental Botany, 2008, **62**(3): 389-395.
- [23] Fu X P, Dou C M, Chen Y X, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(1): 103-107.
- [24] Tang C F, Zhang R Q, Wen S Z, et al. Effects of exogenous spermidine on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Typha latifolia* L. under cadmium stress [J]. Water Science & Technology, 2009, **59**(8): 1487-1493.
- [25] Wu F B, Dong J, Qian Q Q, et al. Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes [J]. Chemosphere, 2005, **60**(10): 1437-1446.
- [26] 于方明, 汤叶涛, 周小勇, 等. 镉对圆锥南芥锌的吸收、亚细胞分布和化学形态影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2010, **49**(4): 118-124.

CONTENTS

Source Contribution Analysis of the Fine Particles in Shanghai During a Heavy Haze Episode in December, 2013 Based on the Particulate Matter Source Apportionment Technology	LI Li, AN Jing-yu, YAN Ru-sha (3543)
Transformation Mechanism and Sources of Secondary Inorganic Components in PM _{2.5} at an Agriculture Site (Quzhou) in the North China Plain in Summer	CHEN Shi-yi, ZENG Li-min, DONG Hua-bin, <i>et al.</i> (3554)
Pollution Level and Sources of Organic Phosphorus Esters in Airborne PM _{2.5} in Chengdu City	YIN Hong-ling, LI Shi-ping, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (3566)
Simulation Study of the Emission of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Sugar Alcohols from Biomass Burning	HUANG Shuai, HUANG Xin-yi, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (3573)
Characteristics and Parameterization for Atmospheric Extinction Coefficient in Beijing	CHEN Yi-na, ZHAO Pu-sheng, HE Di, <i>et al.</i> (3582)
Photocatalytic Degradation of Gaseous Toluene by a Photo-Fenton Reaction	ZHENG Si-can, CHEN Tian-hu, LIU Hai-bo, <i>et al.</i> (3590)
Emission of PCDD/Fs from Crematories and Its Influencing Factors	YIN Wen-hua, YU Xiao-wei, HAN Jing-lei, <i>et al.</i> (3596)
Odor Emission Characteristics from Biochemical Treatment Facilities of Kitchen Waste in China	ZHANG Yan, WANG Yuan-gang, LU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (3603)
Temporal and Spatial Characteristics of Lake Taihu Surface Albedo and Its Impact Factors	CAO Chang, LI Xu-hui, ZHANG Mi, <i>et al.</i> (3611)
Remote Sensing Inversion of Diffuse Attenuation Coefficient in Lake Taihu Based on the GOCI Images	WANG Shan-shan, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (3620)
Porewater Dissolved Methane in <i>Cyperus malaccensis</i> Marshes Along Salinity Gradient in the Minjiang River Estuary	YANG Ping, ZHANG Zi-chuan, DU Wei-ning, <i>et al.</i> (3633)
Stable Isotopes Characters of Soil Water Movement in Shijiazhuang City	CHEN Tong-tong, CHEN Hui, HAN Lu, <i>et al.</i> (3641)
Seasonal Variations in Vertical Profile of Hg Species and the Influential Factors in Changshou Reservoir	BAI Wei-yang, ZHANG Cheng, TANG Zhen-ya, <i>et al.</i> (3649)
Nutrient Characteristics and Nitrogen Forms of Rhizosphere Soils Under Four Typical Plants in the Littoral Zone of TGR	WANG Xiao-feng, YUAN Xing-zhong, LIU Hong, <i>et al.</i> (3662)
Exchange Fluxes and Coupling Relationship of Dissolved Inorganic Carbon and Dissolved Organic Carbon Across the Water-Sediment Interface in Lakes	WANG Wei-ying, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (3674)
Mass Transport in Porous Sediments During a Turbulent Disturbance	LI Shao-long, CHEN Dao-yi (3683)
Characterization of Pollutant Wash-off in the Urban Stormwater	WU Jun-liang, REN Yu-fen, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (3691)
Research of the Stormwater Runoff and Pollution Characteristics in Rural Area of Yuhang District, Hangzhou	DUAN Sheng-hui, ZHAO Yu, SHAN Bao-qing, <i>et al.</i> (3697)
Formation and Variation of Brominated Disinfection By-products in A Combined Ultrafiltration and Reverse Osmosis Process for Seawater Desalination	YANG Zhe, SUN Ying-xue, SHI Na, <i>et al.</i> (3706)
Effect of Natural Organic Matter and Electrolytes on the Aggregation of C ₆₀ Nanoparticles in Aquatic Systems	FANG Hua, JING Jie, YU Jiang-hua, <i>et al.</i> (3715)
Efficiency of Sediment Amendment with Zirconium-Modified Kaolin Clay to Control Phosphorus Release from Sediments in Heavily Polluted Rivers	WANG Hong, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui, <i>et al.</i> (3720)
Transformation of Nitrogen Nutrients in the Urban Sewage Pipe Network	JIN Peng-kang, JIAO Ding, REN Wu-ang (3730)
Application of Micro-aerobic Hydrolysis Acidification in the Pretreatment of Petrochemical Wastewater	ZHU Chen, WU Chang-yong, ZHOU Yue-xi, <i>et al.</i> (3738)
Efficacy of A ² /O-MBR Combined Process in Wastewater Treatment and the Characteristics of Membrane Fouling	WANG Xu-dong, MA Ya-bin, WANG Lei, <i>et al.</i> (3743)
Effect of High Ammonium on Nitrogen Removal in an Partial Nitrification-ANAMMOX Process with Reflux System	LI Xiang, CUI Jian-hong, YUAN Yan, <i>et al.</i> (3749)
Reductive Dechlorination of Trichloroethylene by Benzoate-Enriched Anaerobic Cultures	LI Jiang-wei, YANG Xiao-yong, HU An-yi, <i>et al.</i> (3756)
2,4,6-Trichlorophenol Mineralization Promoted by Anaerobic Reductive Dechlorination of Acclimated Sludge and Extracellular Respiration Dechlorination Pathway	SONG Jia-xiu, LI Ling, SHENG Fan-fan, <i>et al.</i> (3764)
Short or Long Term Influence of Phenol on Nitrogen Removal Efficiency of ANAMMOX Sludge	YANG Peng-bing, LI Xiang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (3771)
Process Optimization of Aerobic Granular Sludge Continuous-Flow System for the Treatment of Low COD/N Ratio Sewage	LU Lei, XIN Xin, LU Hang, <i>et al.</i> (3778)
Long-Term Inhibition of FNA on Aerobic Phosphate Uptake and Variation of Phosphorus Uptake Properties of the Sludge	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (3786)
Performance and Factors Analysis of Sludge Dewatering in Different Wastewater Treatment Processes	LIU Ji-bao, LI Ya-ming, LÜ Jian, <i>et al.</i> (3794)
Effect of Residual Hydrogen Peroxide on Hydrolysis Acidification of Sludge Pretreated by Microwave -H ₂ O ₂ -Alkaline Process	JIA Rui-lai, LIU Ji-bao, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3801)
Vertical Distribution Characteristics of Typical Forest Soil Organic Nitrogen in Dawei Mountain	DING Xian-qing, MA Hui-jing, ZHU Xiao-long, <i>et al.</i> (3809)
Effects of Different Land Uses on Soil Active Organic Carbon and Nitrogen Fractions in Jinyun Mountain	QI Xin, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (3816)
Control of Soil Nutrient Loss of Typical Reforestation Patterns Along the Three Gorges Reservoir Area	WU Dong, HUANG Zhi-lin, XIAO Wen-fa, <i>et al.</i> (3825)
Effects of Slope Position and Soil Horizon on Soil Microbial Biomass and Abundance in Karst Primary Forest of Southwest China	FENG Shu-zhen, SU Yi-rong, ZHANG Wei, <i>et al.</i> (3832)
Effects of Different Plantation Type on the Abundance and Diversity of Soil Microbes in Subtropical Red Soils	SHEN Bing-jie, ZHU Zhen-ke, YUAN Hong-zhao, <i>et al.</i> (3839)
Accumulation of Mercury in Soil-maize System of Non-ferrous Metals Smelting Area and Its Related Risk Assessment	JI Xiao-feng, ZHENG Na, WANG Yang, <i>et al.</i> (3845)
Effects of Different Modifier Concentrations on Lead-Zinc Tolerance, Subcellular Distribution and Chemical Forms for Four Kinds of Woody Plants	CHEN Yong-hua, ZHANG Fu-yun, WU Xiao-fu, <i>et al.</i> (3852)
Isolation, Purification and Identification of Antialgal Activity Substances of Ethyl Acetate Extracts from the Submerged Macrophytes <i>Potamogeton crispus</i>	SUN Ying-ying, SU Zhen-xia, PU Yin-fang, <i>et al.</i> (3860)
Distribution Characteristics and Potential Risk of CBs in Aquatic Organisms from Typical Epidemic Areas of Schistosomiasis Prevalence	LI Kun, ZHAO Gao-feng, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3866)
Application of Whole-cell Biosensor ADPI _p WHlux for Acute Toxicity Detection in Water Environment	TANG Hui, SONG Yi-zhi, JIANG Bo, <i>et al.</i> (3872)
Application of Rainbow Trout CYP1 Gene Expression Patterns in Gill and Liver for Haihe River Bio-monitoring	GAO Kai, YAN Pei, TAN Cui-ling, <i>et al.</i> (3878)
Toxic Effect of Nano-ZnO in Liver of Zebrafish	LIU Lin, ZHAO Qun-fen, JIN Kai-xing, <i>et al.</i> (3884)
Acute Toxicity of <i>Coptis chinensis</i> Rhizome Extracts to <i>Daphnia carinata</i>	CHEN Ya-nan, YUAN Ling (3892)
Adsorption-desorption Characteristics of Fermented Rice Husk for Ferrous and Sulfur Ions	XIE Xiao-mei, LIAO Min, HUA Jia-yuan, <i>et al.</i> (3896)
Application of Stir Bar Sorptive Extraction and Gas Chromatograph Mass Spectrometer to the Phthalic Acid Esters Analysis in Seawater	GAO Chen-chen, LI Feng-min, LU Lun, <i>et al.</i> (3906)
Experimental Conditions and Reliability Analysis of Results of COD Components	LI Zhi-hua, ZHANG Yin, HAN Xing, <i>et al.</i> (3913)
Method for Simultaneous Determination of 11 Veterinary Antibiotics in Piggery Wastewater and Sludge and Its Application in Biological Treatment	DING Jia-li, LIU Rui, ZHENG Wei, <i>et al.</i> (3918)
Research Progress in Technology of Using Soil Micro-organisms to Generate Electricity and Its Potential Applications	DENG Huan, XUE Hong-jing, JIANG Yun-bin, <i>et al.</i> (3926)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2015年10月15日 第36卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 10 Oct. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行