

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

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

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林允静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵联产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响

熊仕娟¹, 刘俊¹, 徐卫红^{1*}, 谢文文¹, 陈蓉¹, 张进忠¹, 熊治庭², 王正银¹, 谢德体¹

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 采用盆栽试验, 在土壤 Cd ($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 污染条件下, 测定了不同浓度的 Na_2SeO_3 (Se 水平为 0、0.5 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 处理对 2 个黄瓜 (*Cucumis sativus* L.) 品种 (低 Cd 富集植物品种津优 1 号和高 Cd 富集品种燕白) 生物量、丙二醛 (MDA) 含量、抗氧化酶活性及黄瓜体内 Cd 形态和 Cd 积累量的影响。结果表明, 叶面喷施硒 (Na_2SeO_3) 后, 黄瓜叶、茎、根、果实、植株干重, 以及 Cd 含量和积累量在两个品种间的差异达到了显著性水平。随硒浓度的增加, 燕白叶的丙二醛 (MDA) 含量逐渐增加, 津优 1 号叶的丙二醛含量则逐渐减少; 燕白根的丙二醛含量先增后降, 津优 1 号根的丙二醛含量先降后增。喷施 Na_2SeO_3 后, 黄瓜叶和根的 CAT、SOD 和 POD 活性呈现不同变化趋势。喷施外源硒降低了 2 个品种果实中不同形态 Cd 含量。叶面喷施 Na_2SeO_3 使黄瓜叶、茎、根和果实中的 Cd 含量分别下降了 3.2% ~ 17.9%、14.6% ~ 28.2%、5.1% ~ 18.5% 和 60.6% ~ 75.8%。比较 2 个供试黄瓜品种, 无论喷施 Na_2SeO_3 与否, 黄瓜植株中 Cd 积累量以津优 1 号 > 燕白。

关键词: 硒; 抗氧化酶; 丙二醛; 镉积累; 镉形态; 黄瓜

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0286-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.038

Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber (*Cucumis sativus* L.)

XIONG Shi-juan¹, LIU Jun¹, XU Wei-hong^{1*}, XIE Wen-wen¹, CHEN Rong¹, ZHANG Jin-zhong¹, XIONG Zhi-ting², WANG Zheng-yin¹, XIE De-ti¹

(1. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the influence of different selenium (Se) levels (0, 0.5 and $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) on the plant growth, concentration of malonaldehyde (MDA), activities of antioxidant enzymes, accumulation and chemical forms of cadmium (Cd) in cucumber when exposed to Cd ($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that dry weights of leaf, stem, root, fruit and plant, and concentrations and accumulation of Cd significantly differed between two varieties of cucumber Yanbai and Jinyou 1. With increasing levels of Se, the contents of MDA in the leaves of Yanbai increased, but the contents of MDA in the leaves of Jinyou 1 decreased. The contents of MDA in the roots of Yanbai first increased and then decreased, while the contents of MDA in Jinyou 1 first decreased and then increased. The variation trends of CAT, SOD and POD in the leaves and roots of both varieties were different with increasing levels of Se. The concentrations of different chemical forms of Cd in the fruit decreased after spraying of Se, compared with the control. Cadmium concentrations in the leaves, stem, roots and fruit of both varieties decreased by 3.2% - 17.9%, 14.6% - 28.2%, 5.1% - 18.5% and 60.6% - 75.8% in the presence of Se when exposed to Cd. Accumulation of Cd in the plant of both varieties was in order of Jinyou 1 > Yanbai in the presence or absence of Na_2SeO_3 .

Key words: selenium; antioxidant enzymes; malonaldehyde; Cd accumulation; Cd forms; cucumber

镉 (cadmium, Cd) 是一种积累性的剧毒重金属元素, 具有很强的致畸、致癌、致突变性作用, 可通过食物链方式进入生物体而危害人和动物的健康^[1,2]。近年来, 工业生产、农业施肥及污水灌溉等人为因素大大增加了土壤中的镉含量^[3]。目前, 中国约 24.1% 的菜园土壤 Cd 含量超过国家土壤环境质量二级标准^[4], 镉已成为土壤和蔬菜重金属污染的主要种类之一。硒 (selenium, Se) 是人体不可缺少的微量元素, 硒缺乏或过量均会使人体产生多种病症, 适量硒对人体有抗癌作用^[5,6]。硒还对镉、铅、汞等重金属元素有拮抗作用^[7-9], 适宜浓度的硒有利于消除植物体内过多的自由基、保护细胞膜结构

的完整性、缓解重金属对植物的毒害^[8,10], 增强植物对逆境的抵抗力。目前, 国内外对硒与镉的交互作用研究有水稻 (*Oryza sativa* L.)^[11-13]、小麦 (*Triticum aestivum*)^[14]、油菜 (*Brassica juncea* L.)^[14,15]、生菜 (*Lactuca sativa* L. var. *capitata* L.)^[16]、大蒜 (*Allium sativum* L.)^[17] 等作物, 但硒与镉之间的交互作用报道不一致^[8-17]。关于黄瓜

收稿日期: 2014-07-07; 修订日期: 2014-08-16

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (Nycytx-35-gw16); 国家自然科学基金项目 (20477032); 国家科技支撑计划项目 (2007BAD87B10)

作者简介: 熊仕娟 (1990 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与农产品安全, E-mail: xiongshijuan5@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xuwei_hong@163.com

(*Cucumis sativus* L.)果实中 Cd 的化学形态的研究也鲜有报道. 因此,本研究在前期水培筛选试验基础上,选取了一个植株低镉富集品种(津优 1 号)和植株高镉富集品种(燕白),采用盆栽法模拟镉污染的土壤条件,探讨了硒、镉的相互关系以及硒对不同品种黄瓜生物量、镉的积累及化学形态的影响,以为镉污染的菜园土壤上蔬菜生产的合理布局提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

2 个黄瓜(*Cucumis sativus* L.)品种分别为植株低镉富集品种(津优 1 号)和植株高镉富集品种(燕白). 供试土样为重庆市九龙坡区白市驿蔬菜基地土壤. 土壤有机质含量 $36.54 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤总氮含量为 $2.618 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤碱解氮含量为 $104.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤速效 K 含量为 $101.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤有效 P 含量为 $13.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 Cd 含量 $<0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤硒含量为 $0.017 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤阳离子交换量(CEC)为 $0.192 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 pH 值为 6.03.

1.2 盆栽试验

试验于 2013 年 2 月 27 日~2013 年 5 月 30 日在西南大学资源环境学院玻璃温室内进行. 试验共设 3 个 Se 浓度,即 0、0.5 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 模拟土壤镉污染的浓度为 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 所用 Se、Cd 分别为 Na_2SeO_3 和 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$. 5 kg 风干土壤通过 40 目筛,然后用 Cd(浓度 $20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)处理并混匀后装入塑料盆内(直径 30 cm,高 18 cm),平衡 2~3 周. 移栽黄瓜幼苗每钵 1 株. 在黄瓜开花期叶面喷施 Na_2SeO_3 的营养液. 每 5 d 喷施一次,共喷施 7 次,每次喷施 $100 \text{ mL} \cdot \text{pot}^{-1}$,对照处理喷等量的纯水. 基肥中 $\text{P}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4)$ 、 $\text{K}(\text{KCl})$ 的用量分别为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{N}(\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和尿素)为 $180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 每个处理设置 3 次重复,随机排列. 用土壤水分速测仪测定 3 次浇水前的土壤含水量,取平均值,然后计算所需的补水量,根据补水量浇去离子水使土壤湿度达到田间最大持水量的 60%. 从黄瓜第一次结果开始记产,2013 年 5 月 30 日收获. 将收获的植株在 105°C 下烘干至恒重.

1.3 测定方法

土样基本理化性质测定采用常规方法^[18]. 土壤 Cd 含量采用 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解,用原子吸收

分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)进行测定. CAT 活性测定采用高锰酸钾滴定法^[19]; POD 活性测定采用愈创木酚法^[20]; SOD 活性测定采用氮蓝四唑(NBT)还原法^[20]. 植株干样不同部位 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消煮,用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)进行测定, Cd 的检测限为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤 Se 含量采用硝酸、硫酸消解,用原子荧光光度计(PF6.3 北京普析通用仪器有限公司)测定.

黄瓜植株果实中镉形态分级测定采用连续浸取法浸取镉^[21](表 1),用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定各形态镉的含量, Cd 检测限为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 各形态 Cd 所用的提取剂依次为 80% 乙醇(F_E , 提取以硝酸盐、氯化物为主的无机盐以及氨基酸盐)、去离子水(F_W , 提取水溶性有机酸盐、重金属一代磷酸盐)、 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{NaCl}$ 溶液(F_{NaCl} , 提取果胶盐, 蛋白质结合态或呈吸着态的重金属)、2% 醋酸(F_{HAC} , 难溶性重金属磷酸盐, 二代磷酸盐)、 $0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{HCl}$ 溶液(F_{HCl} , 提取草酸盐)^[22].

1.4 统计分析

本研究所列结果为 3 次重复的测定值,数据采用 SPSS 21.0 统计软件进行方差分析和多重比较.

2 结果与分析

2.1 生物量

由表 1 可知,黄瓜茎、根、叶、果实及植株干重在燕白和津优 1 号 2 个品种间和 Na_2SeO_3 处理间的差异均达到了显著性水平. 在重金属 Cd 污染($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)条件下,喷施 Na_2SeO_3 显著增加了 2 个黄瓜品种的根、茎、叶、果实及植株干重,且上述指标均随着喷施的硒浓度的增加而增大. 与不喷施 Na_2SeO_3 的对照相比,喷施了 Na_2SeO_3 的两个黄瓜品种的根、茎、叶、果实及植株干重分别增加了 25.9%~64.4%、7.5%~26.2%、8.0%~23.2%、10.8%~27.7% 及 11.5%~26.5%.

2.2 根和叶的丙二醛含量

由图 1 和图 2 可见,不同 Na_2SeO_3 浓度处理对 2 个品种黄瓜叶、根的丙二醛含量有不同的影响. 随着 Se 浓度的增加,燕白和津优 1 号两个品种叶的丙二醛含量呈相反的趋势变化,前者喷施 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Se 分别比对照增加了 47.1% 和 62.7%, 后者比对照降低了 30.7% 和 44.0%.

表 1 不同 Se 浓度对黄瓜生长的影响¹⁾

Table 1 Influences of different Se levels on the growth of cucumber

Se /mg·L ⁻¹	干重/g·pot ⁻¹					
	叶		茎		根	
	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号
0	12.77 ± 0.33b	10.997 ± 0.27b	7.767 ± 0.21b	6.947 ± 0.21b	1.017 ± 0.13c	2.477 ± 0.09b
0.5	13.797 ± 0.48a	12.717 ± 0.29ab	8.347 ± 0.16a	8.757 ± 0.19a	1.327 ± 0.25b	3.117 ± 0.12a
1.0	13.857 ± 0.31a	13.547 ± 0.46a	8.507 ± 0.24a	8.767 ± 0.32a	1.667 ± 0.10a	3.277 ± 0.08a

Se /mg·L ⁻¹	干重/g·pot ⁻¹			
	果实		植株	
	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号
0	20.197 ± 0.23b	19.917 ± 0.52c	41.737 ± 0.78c	40.317 ± 0.40c
0.5	23.067 ± 0.23a	22.077 ± 0.61b	46.517 ± 0.69b	46.647 ± 0.35b
1.0	23.297 ± 0.23a	25.437 ± 0.38a	47.307 ± 0.61a	51.007 ± 0.79a

1) 不同小写字母代表同一个品种不同 Se 浓度之间的差异显著性($P \leq 0.05$),下同

2 个品种黄瓜根的丙二醛含量随 Se 浓度的增加也表现出相反的变化,燕白根的丙二醛含量随 Se 浓度的增加呈先升高后降低的变化,在 Se 浓度为 0.5 mg·L⁻¹时达到最高值 0.59 μmol·L⁻¹,较对照增加了 168.2%, Se 浓度为 1.0 mg·L⁻¹时比对照增加了 22.7%; 津优 1 号根的 MDA 含量则先减后增,并在 Se 浓度为 0.5 mg·L⁻¹时为最低值 0.40 μmol·L⁻¹,较对照降低了 16.7%, Se 浓度为 1.0 mg·L⁻¹时比对照增加了 14.6%。比较同一品种黄瓜根部和叶片,燕白黄瓜叶片丙二醛含量随着施用硒浓度的增加而升高,而根的 MDA 含量则先增后减; 津优 1 号黄瓜叶的丙二醛含量则随喷施 Se 浓度的增加而减少,根的丙二醛含量则先减少后增加。

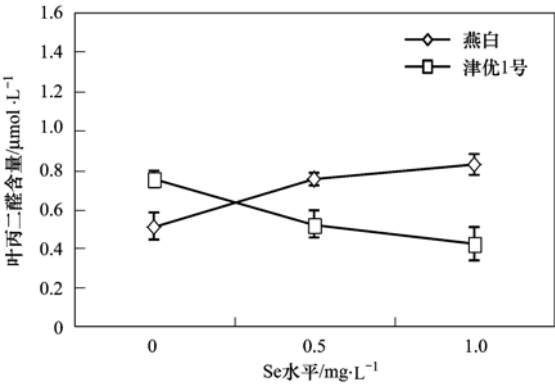


图 1 不同 Se 浓度对黄瓜叶丙二醛含量的影响

Fig. 1 Effect of Se levels on MDA concentration in leaf of cucumber

2.3 根和叶的抗氧化酶活性

SOD、CAT 和 POD 等抗氧化酶作为植物体内重要的抗氧化系统,可消除或减少植物体内的自由基,是植物体中一个重要的保护机制^[23,24]。在 Cd 污染下,随着喷施 Se 浓度的增加,除了燕白黄瓜根和叶的 POD 活性先增加后降低,同一品种黄瓜根、叶的

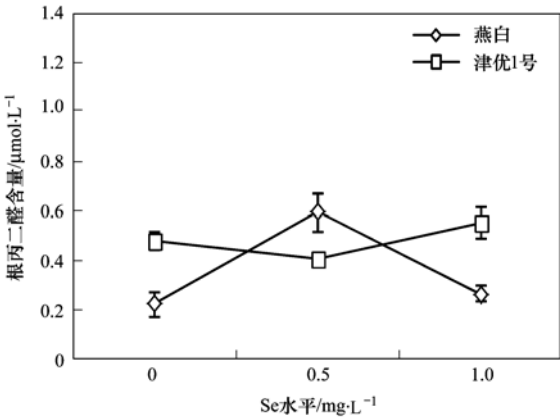


图 2 不同 Se 浓度对黄瓜根丙二醛含量的影响

Fig. 2 Effect of Se levels on MDA concentration in root of cucumber

CAT、SOD 和 POD 活性均表现出不同的变化,且在相同的硒浓度下,各品种黄瓜根的抗氧化酶活性普遍高于叶(图 3~8)。随着喷施 Se 浓度的增加,两个品种黄瓜间根和叶的 CAT 活性表现相同的变化趋势,根为先降后升,叶为先升后降,喷施 Se 对黄瓜叶的 CAT 活性影响较小,而对根影响显著,在 Se 浓

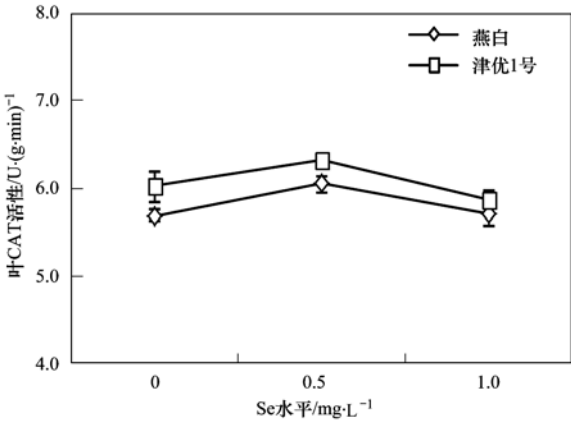


图 3 不同 Se 浓度对黄瓜叶 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effect of Se levels on CAT activity in leaf of cucumber

度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 燕白和津优 1 号品种黄瓜根的 CAT 活性最低, 分别为 $11.39 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $8.81 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, Se 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大, 分别为 $15.74 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $16.80 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ (图 3 和图 4)。Se 浓度对燕白黄瓜根和叶的 SOD 活性均有明显影响, 而对津优 1 号黄瓜根的 SOD 活性影响较小, 对叶的 SOD 活性影响较大(图 5 和图

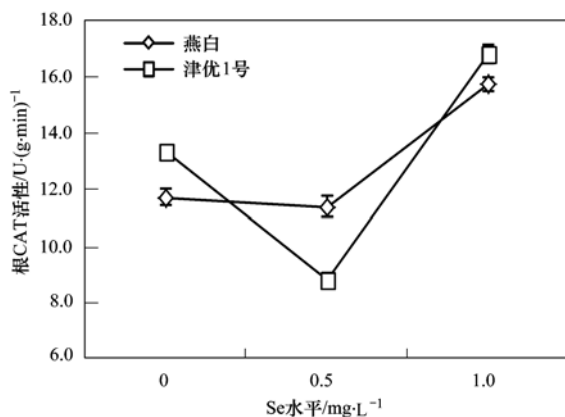


图 4 不同 Se 浓度对黄瓜根 CAT 活性的影响

Fig. 4 Effect of Se levels on CAT activity in root of cucumber

6)。随着喷施硒浓度的增加, 燕白黄瓜叶片 SOD 活性逐渐升高, 并于 Se 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最大值 $123.31 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 比对照增加了 155.0%, 根呈先平缓增加后显著降低的趋势, Se 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 SOD 活性比对照降低了 66.9%; 津优 1 号黄瓜叶 SOD 活性随 Se 浓度的增加呈先降低后升高的显著变化, 根呈缓慢增加的趋势, 但与对照相比, Se 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶的 SOD 活性分别降低了 74.9% 和 31.9%。喷施不同的 Se 浓度对两个品种黄瓜根和叶的 POD 活性均有明显的影响(图 7 和图 8)。喷施 Se 有利于燕白黄瓜 POD 活性的提高, Se 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶和根

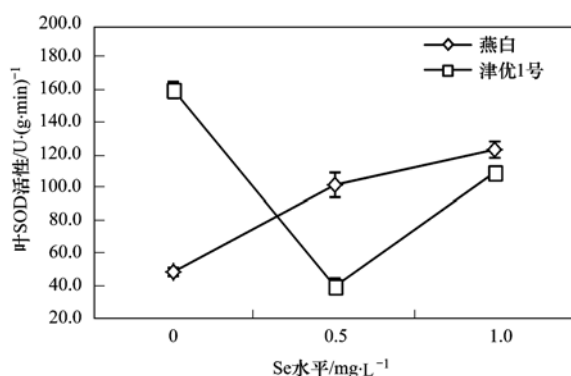


图 5 不同 Se 浓度对黄瓜叶 SOD 活性的影响

Fig. 5 Effect of Se levels on SOD activity in leaf of cucumber

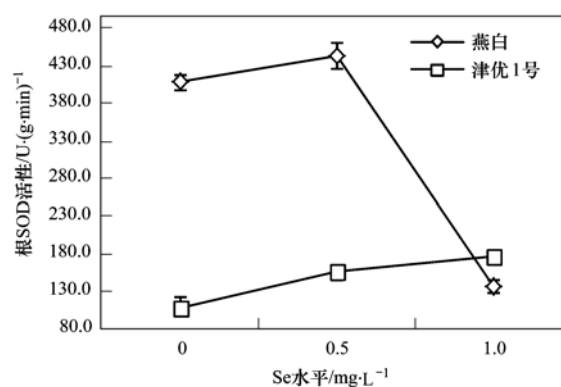


图 6 不同 Se 浓度对黄瓜根 SOD 活性的影响

Fig. 6 Effect of Se levels on SOD activity in root of cucumber

的 POD 活性最高, 分别为 $7.49 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$ 和 $10.07 \text{ U} \cdot (\text{g} \cdot \text{min})^{-1}$, 但随着 Se 浓度的增加, 其活性有所降低; 喷施 Se 对津优 1 号黄瓜叶的 POD 活性有抑制作用, Se 浓度为 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 叶的 POD 活性分别比对照降低了 36.5% 和 17.4%, Se 的浓度越大, 抑制作用越小, 而喷施 Se 对根 POD 活性的提高有促进作用, 并于 Se 浓度为

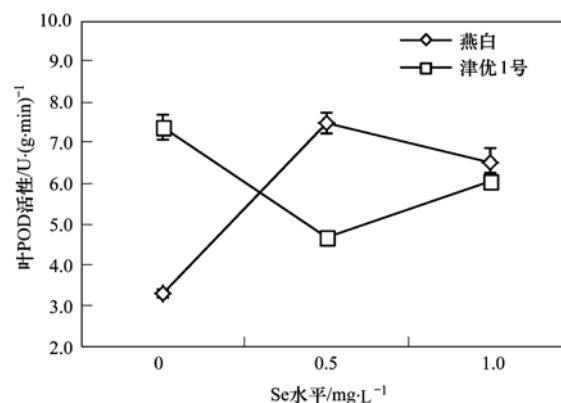


图 7 不同 Se 浓度对黄瓜叶 POD 活性的影响

Fig. 7 Effect of Se levels on POD activity in leaf of cucumber

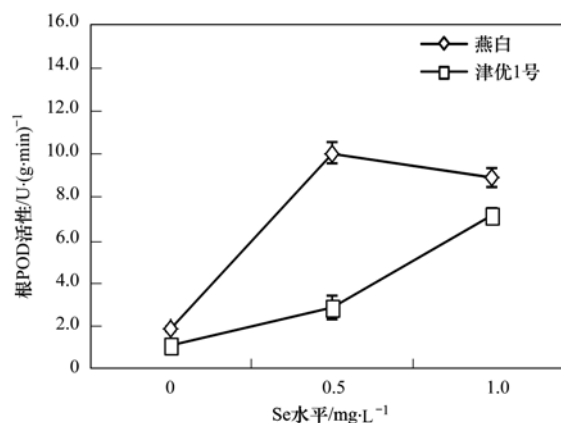


图 8 不同 Se 浓度对黄瓜根 POD 活性的影响

Fig. 8 Effect of Se levels on POD activity in root of cucumber

1.0 mg·L⁻¹时达到最大值 7.12 U·(g·min)⁻¹, 比对照增加了 513.8%. 比较两个黄瓜品种, 燕白黄瓜抗氧化酶活性总体高于津优 1 号.

2.4 果实 Cd 形态

由表 2 可知, 黄瓜果实中镉各形态含量及 Cd 提取总量在两个品种间、Se 浓度间的差异均达到了显著性水平. 不同 Se 浓度下, 2 个品种黄瓜果实中各形态 Cd 含量略有不同. 对于燕白品种黄瓜, 除 Se 浓度为 1.0 mg·L⁻¹时, 其果实中镉含量为残渣态镉 (F_R) > 氯化钠提取态镉 (F_{NaCl}) > 盐酸提取态镉 (F_{HCl}) > 醋酸提取态镉 (F_{HAc}) > 乙醇提取态镉 (F_E) > 水提取态镉 (F_W) 外, 其余处理的果实各形态 Cd 含量为: $F_R > F_{NaCl} > F_{HCl} > F_{HAc} > F_W > F_E$; 而津优 1 号黄瓜果实中各形态 Cd 含量在 Se 浓度为 0、0.5 和 1.0 mg·L⁻¹时分别表现为: $F_R > F_{NaCl} > F_{HAc} > F_{HCl} > F_W > F_E$ 、 $F_R > F_{NaCl} > F_{HAc} > F_{HCl} > F_E > F_W$ 、 $F_{NaCl} > F_R > F_{HCl} > F_{HAc} > F_E > F_W$. 值得注意的是, 燕白和津优 1 号两个品种黄瓜的 F_R 平均含量分别为 0.689 mg·kg⁻¹ 和 0.526 mg·kg⁻¹, 均高于其它形态的 Cd 含量, 分别占 Cd 提取总量的 43.7% 和 39.3%. F_{NaCl} 含量仅次于 F_R , 两个品种黄瓜的 F_{NaCl} 平

均含量为 0.380 mg·kg⁻¹, 占 Cd 提取总量的质量分数为 26.1%. 在所有 Cd 形态中, F_R 和 F_{NaCl} 活性偏低, 两者平均含量之和为 0.988 mg·kg⁻¹, 占 Cd 提取总量的质量分数为 68.5%. 活性较高的 F_E 和 F_W 的平均含量均为 0.038 mg·kg⁻¹, 占 Cd 提取总量的质量分数为 2.6%, 两者的平均含量之和 (0.076 mg·kg⁻¹) 占 Cd 提取总量的质量分数为 5.2%. 此外, 研究发现, 除了津优 1 号中的 F_{HCl} 含量随着 Se 浓度而增加, 喷施 Se 均可降低 2 个品种黄瓜中各形态 Cd 含量, 其中 F_W 、 F_E 、 F_{HAc} 及津优 1 号中的 F_R 含量随着 Se 浓度的增加而有所降低, 分别比对照降低了 56.0% ~ 95.1%、48.0% ~ 75.2%、10.3% ~ 33.2% 及 24.0% ~ 66.7%; 2 个品种黄瓜的 F_{NaCl} 、 F_{HCl} 及燕白黄瓜的 F_R 含量均在 Se 浓度为 0.5 mg·L⁻¹时降至最低, 分别比对照降低了 22.2%、16.2% 及 42.7%, 随着 Se 浓度的增加, Cd 含量有所增加, 但仍比对照降低了 17.1%、2.7% 及 20.4%. 研究还发现, 随着喷施 Se 浓度的增加, 两个品种黄瓜的 Cd 提取总量均表现为下降变化, Se 浓度为 1.0 mg·L⁻¹时, 燕白和津优 1 号品种黄瓜 Cd 提取总量分别较对照下降了 20.7% 和 46.4%.

表 2 不同 Se 浓度对黄瓜果实 Cd 形态含量的影响¹⁾

Table 2 Influences of different Se levels on the chemical forms of Cd in cucumber

Se /mg·L ⁻¹	F_W /mg·kg ⁻¹		F_E /mg·kg ⁻¹		F_{HAc} /mg·kg ⁻¹		F_{NaCl} /mg·kg ⁻¹	
	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号
0	0.075 ± 0.009a	0.102 ± 0.017a	0.025 ± 0.006a	0.101 ± 0.012a	0.145 ± 0.019a	0.226 ± 0.023a	0.424 ± 0.035a	0.452 ± 0.047a
0.5	0.033 ± 0.005b	<0.005 ± 0.000b	0.015 ± 0.005b	0.048 ± 0.008b	0.130 ± 0.017b	0.179 ± 0.012b	0.350 ± 0.029c	0.330 ± 0.021c
1.0	<0.005 ± 0.000c	<0.005 ± 0.000b	0.013 ± 0.002b	0.025 ± 0.004c	0.122 ± 0.010c	0.151 ± 0.010c	0.373 ± 0.020b	0.352 ± 0.028b
Se /mg·L ⁻¹	F_{HCl} /mg·kg ⁻¹		F_R /mg·kg ⁻¹		总提取量/mg·kg ⁻¹			
	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号		
0	0.224 ± 0.015a	0.151 ± 0.012b	0.873 ± 0.059a	0.754 ± 0.045a	1.771 ± 0.087a	1.785 ± 0.073a		
0.5	0.150 ± 0.011c	0.152 ± 0.019b	0.500 ± 0.064c	0.573 ± 0.022b	1.558 ± 0.063b	1.272 ± 0.045b		
1.0	0.199 ± 0.017b	0.176 ± 0.020a	0.695 ± 0.077b	0.251 ± 0.015c	1.404 ± 0.057c	0.956 ± 0.028c		

1) F_W 、 F_E 、 F_{HAc} 、 F_{NaCl} 、 F_{HCl} 和 F_R 分别代表水提取态 Cd、乙醇提取态 Cd、醋酸提取态 Cd、氯化钠提取态 Cd、盐酸提取态 Cd 和残渣态 Cd

2.5 黄瓜 Cd 积累量

黄瓜 Cd 含量及 Cd 积累量在 2 个品种间、Se 浓度间的差异均达到显著水平 (表 3). 除了 Se 浓度为 0 和 1.0 mg·L⁻¹时, 燕白黄瓜 Cd 含量为叶 > 根 > 茎 > 果实, 其余处理 Cd 含量均为根 > 叶 > 茎 > 果实. 除了燕白黄瓜根在 0.5 mg·L⁻¹ Se 处理时 Cd 含量呈最高 (19.67 mg·kg⁻¹), 与对照相比, 喷施 Se 均在不同程度上降低了黄瓜叶、茎、根及果实的 Cd 含量, Cd 含量降低幅度分别为 3.2% ~ 17.9%、14.6% ~ 28.2%、5.1% ~ 18.5% 及 60.6% ~ 75.8%. 值得注意的是, 除了燕白叶和津优 1 号茎,

其它处理 Cd 含量均以 Se 浓度 1.0 mg·L⁻¹时最低. 对于 Cd 积累量, 除了 Se 浓度为 0.5 mg·L⁻¹时燕白黄瓜 Cd 积累量为叶 > 茎 > 果实 > 根, 其余处理均为叶 > 茎 > 根 > 果实 (表 4). Cd 在两个品种黄瓜叶中积累量最大, 茎次之, 分别占 Cd 全量的 60.4% 和 23.0%. 根和果实的 Cd 积累量较少, 仅占 Cd 全量的 10.1% 和 6.6%. 喷施 Se 降低了 2 个品种黄瓜果实的 Cd 积累量, 比对照降低了 55.6% ~ 69.5%, 且随着 Se 浓度的增加, Cd 积累量减少. 除了燕白叶在 Se 浓度 0.5 mg·L⁻¹时 Cd 积累量最低 (0.253 mg·pot⁻¹), 喷施 Se 均在不同程度上增加了黄瓜根

表 3 不同 Se 浓度对黄瓜 Cd 积累的影响
Table 3 Influences of different Se levels on the accumulation of Cd in cucumber

Se /mg·L ⁻¹	Cd 含量/mg·kg ⁻¹									
	叶		茎		根		果实			
	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号
0	21.75 ± 0.56a	24.44 ± 0.71a	15.04 ± 0.37a	14.31 ± 0.25	17.72 ± 0.38ab	25.08 ± 0.53 a	2.21 ± 0.30a	2.97 ± 0.41		
0.5	18.35 ± 0.43b	21.90 ± 0.60b	12.84 ± 0.23b	10.27 ± 0.20	19.67 ± 0.45a	23.59 ± 0.47b	0.87 ± 0.067b	0.84 ± 0.09b		
1.0	21.05 ± 0.40 a	20.07 ± 0.48c	12.49 ± 0.17b	12.11 ± 0.14	16.81 ± 0.50b	20.44 ± 0.25c	0.79 ± 0.08b	0.72 ± 0.05c		

Se /mg·L ⁻¹	Cd 积累量/mg·pot ⁻¹									
	叶		茎		根		果实		Cd 全量/mg·pot ⁻¹	
	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号	燕白	津优 1 号
0	0.278 ± 0.013b	0.269 ± 0.015a	0.117 ± 0.009 0a	0.099 ± 0.005 0b	0.018 ± 0.002 0b	0.062 ± 0.005 0a	0.045 ± 0.007 0a	0.059 ± 0.006 0a	0.457 ± 0.019 a	0.489 ± 0.023a
0.5	0.253 ± 0.018c	0.278 ± 0.020a	0.107 ± 0.005 0a	0.090 ± 0.008 0b	0.026 ± 0.004 0a	0.073 ± 0.0080a	0.020 ± 0.020b	0.019 ± 0.004b	0.406 ± 0.013b	0.460 ± 0.015b
1.0	0.292 ± 0.12a	0.272 ± 0.016a	0.106 ± 0.008 0a	0.11 ± 0.007 0a	0.028 ± 0.001 0a	0.067 ± 0.003 0a	0.019 ± 0.030b	0.018 ± 0.002b	0.444 ± 0.009a	0.463 ± 0.023b

和叶的 Cd 积累量. 燕白黄瓜茎的 Cd 积累量随着 Se 浓度的增加而降低,在 Se 浓度为 1.0 mg·L⁻¹时 Cd 积累量最低,为 0.106 mg·pot⁻¹,而津优 1 号茎的 Cd 积累量随 Se 浓度的增加呈先降低后升高的变化,并以 Se 浓度为 0.5 mg·L⁻¹时降至最低值 0.090 mg·pot⁻¹,Se 浓度为 1.0 mg·L⁻¹时达到最高值 0.106 mg·pot⁻¹. 比较 2 个供试黄瓜品种,不管是否喷施 Se,Cd 全量均以燕白小于津优 1 号.

3 讨论

本研究中,在 20 mg·kg⁻¹的土壤 Cd 污染条件下,喷施 Se 显著增加了 2 个品种黄瓜叶、茎、根、果实及植株干重,喷施硒促进了黄瓜的生长(表 1). Ding 等^[13]和 Zembala 等^[14]的研究也表明,在一定水平的镉胁迫下,添加一定量的硒可减轻镉对植物的毒害,增加植株的生物量. 硒是植物生长发育的有益元素,可参与蛋白质的合成等生命活动,适量硒还可改善作物品质,促进植物对 P、K、Ca、Mg、Zn 等元素的吸收,从而提高植物叶片的叶绿素含量,增强光合作用,促进了黄瓜的生长,增强黄瓜的抗逆性^[25,26]. 研究还发现,两个黄瓜品种中,未喷施 Se 时,燕白果实干重和植株干重均大于津优 1 号,说明燕白对土壤 Cd 污染的耐受性更强,而喷施 Se 后,津优 1 号果实干重和植株干重显著高于燕白,可见津优 1 号对 Se 的反应较为敏感,因此津优 1 号获得了更高的产量.

一般情况下,植物体细胞中自由基的产生与清除处于动态平衡状态,Cd 胁迫会破坏这一动态平衡,产生大量的 O₂⁻、·OH⁻、H₂O₂、O₂ 等,破坏膜系统的完整性,而由 CAT、SOD、POD 等组成的抗氧化系统可清除或减少这些自由基和过氧化物, SOD 可将 O₂⁻ 分解为 H₂O₂ 和 O₂,是清除活性氧的第一道

防线,POD 具有将 H₂O₂ 进行氧化分解的功能,在植物呼吸代谢和植物逆境胁迫中起着重要作用,CAT 的作用主要是清除由光呼吸等产生的 H₂O₂^[27,28]. 植物体内自由基的积累可诱导清除自由基酶活性升高,以减缓自由基对植物的伤害. 在本研究中,除了燕白叶和根的 POD 活性具有相似的变化趋势,同一品种黄瓜根和叶的 CAT、SOD 和 POD 活性均表现出不同的变化(图 3~8). 总体而言,喷施 Se 在一定程度上增加了两个品种黄瓜叶和根的 CAT、SOD 和 POD 活性,这与喷施硒促进黄瓜的生物量和产量的增加基本相符. 说明镉胁迫诱导产生了大量自由基,使抗氧化酶活性提高以消除产生的自由基,这可能是镉污染土壤上外源硒提高了黄瓜的叶、茎、根、果实及植株总干重的生理机制之一. 此外,硒是谷胱甘肽过氧化物酶(GSH-Px)的重要组成部分,该酶也可清除镉胁迫所产生的大量自由基,减缓自由基引发的膜脂过氧化引起的细胞膜损伤^[26]. 在黄瓜叶和根中主要由 SOD 来清除自由基,表现为两个品种黄瓜叶和根均以 SOD 活性最高,CAT 和 POD 活性较低. Saidi 等^[10]在向日葵幼苗的研究中也呈现类似的结果. 研究比较根和叶的抗氧化酶活性还发现,两个品种黄瓜 CAT、SOD 及 POD 活性均以根高于叶,这可能是由于黄瓜叶片 Cd 积累量较高,抑制了叶片的抗氧化酶活性.

丙二醛(MDA)是膜脂的过氧化产物,膜脂过氧化会破坏质膜功能和结构的完整性,增加植物质膜的透性,丙二醛含量高低是反映过氧化作用大小和植物细胞膜受害程度的一个重要指标^[27,29]. 本研究中,在 Cd 污染条件下,喷施 Se 降低了津优 1 号叶的丙二醛含量,说明喷施一定浓度的硒可缓解镉对津优 1 号叶细胞膜的伤害. 张海英等^[8]的研究也表明,在一定 Se 浓度范围内(≤5.0 mg·L⁻¹),草莓叶

片丙二醛含量随喷施 Se 浓度的增加而降低。但津优 1 号根的丙二醛含量先减少后增加,且增加后的丙二醛含量高于对照,说明低硒($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Se)有利于降低根的过氧化作用,从而保护根细胞膜,而高硒($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Se)对黄瓜产生了毒害效应,提高了根部的过氧化作用,增加了根细胞膜的过氧化损伤^[13]。燕白叶的丙二醛含量随硒浓度的增加而增加,根则先增加后减少,但减少后的丙二醛含量仍高于对照,说明喷施硒增加了燕白叶、根细胞膜的透性,增加了叶、根细胞膜的过氧化损伤。原因可能是燕白对外源硒比较敏感所导致的应急反应。尽管镉胁迫造成燕白叶、根及津优 1 号根的氧化损伤,但喷施硒仍显著增加了 2 个品种黄瓜叶、茎、根、果实及植株的干重,表明喷施后抗氧化酶在清除镉诱导的自由基过程中有重要作用远大于由于丙二醛增加导致的细胞膜的过氧化损伤。比较两个品种黄瓜,喷施 Se 对两个品种黄瓜叶、根的丙二醛含量分别表现出相反的变化趋势,可见硒对不同品种黄瓜叶和根的过氧化作用影响不同。此外,在 Se 浓度为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,两个品种黄瓜根的丙二醛含量与对照差异不显著,表明在 Cd 胁迫下,喷施 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Se 对黄瓜根部过氧化作用影响不大。总体而言,两个品种黄瓜丙二醛含量以叶大于根,这主要是由于黄瓜叶部镉积累量大于根部,严重抑制了黄瓜叶片 CAT、SOD 和 POD 活性,因此,叶部较根部发生更多的过氧化反应,产生了更多的丙二醛。

重金属在植物体内的化学形态分为活性态和非活性态,活性态有水溶性态、离子交换态等,非活性态有氯化钠态、盐酸盐态、醋酸盐态、残渣态等。本试验黄瓜果实中 Cd 主要以 F_R 存在,其平均含量为 $0.608 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的 41.5%。这与周坤等^[30]和刘俊等^[31]的研究结果相一致,但与吕选忠等^[16]和陈贵青等^[32]的研究结果不同。 F_{NaCl} 含量次之,平均含量为 $0.380 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的 26.1%。 F_R 和 F_{NaCl} 为活性偏低的 Cd 形态,而两者之和占 Cd 提取总量达 67.6%,是黄瓜果实中 Cd 形态的主要存在形式。 F_W 和 F_E 活性较高,但黄瓜果实中两者之和只有 $0.038 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的 2.6%。说明黄瓜果实中 Cd 的活性受限制,减少了 Cd 对黄瓜的毒害。研究同时发现,除了津优 1 号的 F_{HCl} ,喷施 Se 在不同程度上降低了各形态 Cd 的含量和 Cd 总提取量。可见 Se 对 Cd 具有拮抗作用,可降低植物对镉的吸收,这与前人的研究结果相一致^[16],且本研究以 F_R 的降低最显著。Se 对 Cd 的

拮抗作用机制可能是硒可清除细胞代谢活性位点上的镉和镉胁迫诱发产生的自由基,以及 Se 可诱导产生金属硫蛋白,整合进入生物体内的 Cd,从而降低 Cd 的有效性^[15,17]。但与 $0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 相比, $1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Se 反而显著增加了两个品种黄瓜的 F_{NaCl} 和 F_{HCl} 及燕白的 F_R 含量,说明高 Se ($1.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 对 Cd 存在一定的协同作用。比较两个黄瓜品种,未喷施硒时,果实中镉总提取量为燕白 < 津优 1 号,喷施硒后,镉总提取量为燕白 > 津优 1 号。这可能是由于外源硒提高了燕白的抗氧化酶活性,增强了燕白果实对镉的抗性,使果实对镉的吸收和转运量增加。Feng 等^[12]的研究结果表明,Cd 在水稻中主要积累于根部。但本试验发现,两个黄瓜品种中 Cd 主要积累于茎和叶中,根和果实中积累量较少,而黄瓜 Cd 含量以根和叶较多,茎和果实含量较少(表 3)。这表明 Cd 在两个供试黄瓜品种中具有较强的转移能力,且 Cd 主要集中于黄瓜叶部。黄瓜果实中 Cd 含量为 $0.72 \sim 2.97 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远远超过《食品中污染物限量》对蔬菜中镉的限量标准 ($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[33]。可见黄瓜不仅对 Cd 有较强的迁移能力,而且在可食部位对 Cd 也有很强的富集能力。因此,在 Cd 污染环境种植黄瓜,其果实可能存在受 Cd 污染的危险。研究同时发现,除了低硒 ($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Se) 处理增加了燕白根的 Cd 含量,叶面喷施 Se 均不同程度地降低了黄瓜叶、茎、根及果实中的 Cd 含量,且绝大多数处理中叶、茎、根及果实 Cd 含量均为 $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} < 0.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。文献[7,8,11]的研究结果也表明,在镉胁迫下,添加外源硒可降低植物体内的镉含量。可见,外源硒可降低植物对镉的吸收,进一步说明了硒与镉存在拮抗作用。比较两个黄瓜品种,未喷施 Se 时,燕白果实中 Cd 含量和果实中 Cd 积累量分别比津优 1 号低 $0.76 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $0.014 \text{ mg} \cdot \text{pot}^{-1}$,说明津优 1 号较燕白的 Cd 转运至可食部位(果实)的能力更强,数量更多,其食用风险亦更大。喷施 Se 后,2 个黄瓜品种果实 Cd 含量和 Cd 积累量均显著降低,而燕白果实 Cd 含量和 Cd 积累量略高于津优 1 号,说明喷施硒降低津优 1 号体内 Cd 含量的效果优于燕白。试验还发现,无论喷施硒与否,Cd 全量均为燕白 < 津优 1 号。原因可能与燕白植株总干重小于津优 1 号有关。

4 结论

(1) 在重金属 Cd 污染 ($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 下,叶面喷施 Se 可降低重金属 Cd 对黄瓜生长的毒害,不同程

度增加了黄瓜叶、茎、根、果实及植株干重,且随 Se 浓度增加而增加。

(2) 喷施硒提高了两个品种黄瓜叶和根的 CAT、SOD 和 POD 抗氧化酶活性,缓解了镉对黄瓜的毒害。喷硒后黄瓜叶和根抗氧化酶活性升高可能是黄瓜对镉抗性增强和植株总干重增加的生理机制之一。

(3) 黄瓜体内 Cd 主要积累于茎和叶中。喷施硒可有效降低黄瓜叶、茎、根、果实的镉含量和植株镉全量。黄瓜果实中 Cd 主要以活性较低的 F_R 和 F_{NaCl} 形态存在。喷施 Se 减少了黄瓜果实各形态 Cd 的含量和 Cd 总提取量,果实镉总提取量和镉全量为燕白 > 津优 1 号。本试验条件下,硒与镉表现出了明显的拮抗效应。

参考文献:

- [1] Burger J. Assessment and management of risk to wildlife from cadmium[J]. Science of the Total Environment, 2008, **389**(1): 37-45.
- [2] 刘志华, 伊晓云, 王火焰, 等. 不同品种大白菜苗期吸收积累镉的差异研究[J]. 土壤学报, 2008, **45**(5): 987-993.
- [3] 陈志凡, 赵焱, 郭廷忠, 等. 北京市不同区位耕作土壤中重金属总量与形态分布特征[J]. 环境科学, **34**(6): 2399-2406.
- [4] Wei S D, Zhou Q X. Phytoremediation of cadmium-contaminated soils by *Rorippa globosa* using two-phase planting [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2006, **13**(3): 151-155.
- [5] Lenz M, Lens P N L. The essential toxin: the changing perception of selenium in environmental sciences[J]. Science of the Total Environment, 2009, **407**(12): 3620-3633.
- [6] Paul D, Dey S. Selenium content and uptake in crops as affected by soil selenium content and implications on human health[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, **45**(4): 429-436.
- [7] 杨燕君, 刘晓华, 宁婵娟, 等. 叶面施硒对甜柿果实品质及重金属含量的影响[J]. 园艺学报, 2013, **40**(3): 523-530.
- [8] 张海英, 韩涛, 田磊, 等. 草莓叶面施硒对其重金属镉和铅积累的影响[J]. 园艺学报, 2011, **38**(3): 409-416.
- [9] Elguera J C T, Barrientos E Y, Wrobel K, et al. Effect of cadmium [Cd(II)], selenium [Se(IV)] and their mixtures on phenolic compounds and antioxidant capacity in *Lepidium sativum*[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, **35**(2): 431-441.
- [10] Saidi I, Chtourou Y, Djebali W. Selenium alleviates cadmium toxicity by preventing oxidative stress in sunflower (*Helianthus annuus*) seedlings[J]. Journal of Plant Physiology, 2014, **171**(5): 85-91.
- [11] Lin L, Zhou W H, Dai H X, et al. Selenium reduces cadmium uptake and mitigates cadmium toxicity in rice [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, **235-236**: 343-351.
- [12] Feng R W, Wei C Y, Tu S X, et al. A dual role of Se on Cd toxicity: Evidences from the uptake of cd and some essential elements and the growth responses in paddy rice [J]. Biological Trace Element Research, 2013, **151**(1): 113-121.
- [13] Ding Y Z, Feng R W, Wang R G, et al. A dual effect of Se on Cd toxicity: evidence from plant growth, root morphology and responses of the antioxidative systems of paddy rice [J]. Plant and Soil, 2013, **375**(1-2): 289-301.
- [14] Zembala M, Filek M, Walas S, et al. Effect of selenium on macro-and microelement distribution and physiological parameters of rape and wheat seedlings exposed to cadmium stress[J]. Plant and Soil, 2010, **329**(1-2): 457-468.
- [15] Filek M, Keskinen R, Hartikainen H, et al. The protective role of selenium in rape seedlings subjected to cadmium stress[J]. Journal of Plant Physiology, 2008, **165**(8): 833-844.
- [16] 吕选忠, 宫象雷, 唐 勇. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. 土壤学报, 2006, **43**(5): 868-870.
- [17] Sun H W, Ha J, Liang S X, et al. Protective role of selenium on garlic growth under Cadmium Stress [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, **41**(10): 1195-1204.
- [18] 杨剑虹, 王成林, 代亨林. 土壤农化分析与环境监测[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008.
- [19] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000. 165-167.
- [20] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002. 154-155.
- [21] Alarcón A L, Madrid R, Romojaro F, et al. Calcium forms in leaves of muskmelon plants grown with different calcium compounds[J]. Journal of Plant Nutrition, 1998, **21**(9): 1897-1912.
- [22] 张晓璟, 刘吉振, 徐卫红, 等. 磷对不同辣椒品种镉积累、化学形态及生理特性的影响[J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1171-1176.
- [23] Li Y H, Sun H F, Li H R, et al. Dynamic changes of rhizosphere properties and antioxidant enzyme responses of wheat plants (*Triticum aestivum* L.) grown in mercury-contaminated soils[J]. Chemosphere, 2013, **93**(6): 972-977.
- [24] Cho U H, Seo N H. Oxidative stress in *Arabidopsis thaliana* exposed to cadmium is due to hydrogen peroxide accumulation [J]. Plant Science, 2005, **168**(1): 113-120.
- [25] 夏永香, 刘世琦, 李贺, 等. 硒对大蒜生理特性、含硒量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, **18**(3): 733-741.
- [26] 翁伯琦, 黄东风, 熊德中, 等. 施用硒肥对圆叶决明生长、酶活性及其叶肉细胞超显微结构的影响[J]. 生态学报, 2004, **24**(12): 2810-2817.
- [27] 郑爱珍. 镉胁迫对芥蓝根系质膜过氧化及 ATPase 活性的影响[J]. 生态学报, 2012, **32**(2): 483-488.
- [28] 袁祖丽, 吴中红. 镉胁迫对烟草根抗氧化能力和激素含量的影响[J]. 生态学报, 2010, **30**(15): 4109-4118.
- [29] Li Y, Zhang S S, Jiang W S, et al. Cadmium accumulation,

- activities of antioxidant enzymes, and malondialdehyde (MDA) content in *Pistia stratiotes* L. [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, **20**(2): 1117-1123.
- [30] 周坤, 刘俊, 徐卫红, 等. 铁对番茄镉积累及其化学形态的影响[J]. 园艺学报, 2013, **40**(11): 2269-2279.
- [31] 刘俊, 周坤, 徐卫红, 等. 外源铁对不同番茄品种生理特性、镉积累及化学形态的影响[J]. 环境科学, 2013, **34**(10): 4126-4131.
- [32] 陈贵青, 张晓璟, 徐卫红, 等. 不同 Zn 水平下辣椒体内 Cd 的积累、化学形态及生理特性[J]. 环境科学, 2010, **31**(7): 1657-1662.
- [33] GB 2762-2005, 食品中污染物限量[S].

《环境科学》征稿简则

1. 来稿报道成果要有创新性, 论点明确, 文字精炼, 数据可靠. 全文不超过8 000字(含图、表、中英文摘要及参考文献). 国家自然科学基金项目、国家科技攻关项目、国际合作项目或其它项目请在来稿中注明(在首页以脚注表示). 作者投稿时请先登陆我刊网站(www.hjks.ac.cn)进行注册, 注册完毕后以作者身份登录, 按照页面给出的提示信息投稿即可.
2. 稿件请按 GB 7713-87《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》中学术论文的规范撰写. 论文各部分的排列顺序为: 题目; 作者姓名; 作者工作单位、地址、邮政编码; 中文摘要; 关键词; 中图分类号; 英文题目; 作者姓名及单位的英译名; 英文摘要; 关键词; 正文; 致谢; 参考文献.
3. 论文题目应简练并准确反映论文内容, 一般不超过 20 字, 少用副标题.
4. 中文摘要不少于 300 字, 以第三人称写. 摘要内容包括研究工作的目的、方法、结果(包括主要数据)和结论, 重点是结果和结论. 英文摘要与中文对应, 注意人称、时态和语言习惯, 以便准确表达内容.
5. 前言包括国内外前人相关工作(引文即可)和本工作的目的、特点和意义等. 科普知识不必赘述.
6. 文中图表应力求精简, 同一内容不得用图表重复表达, 要有中英文对照题目. 图应大小一致, 曲线粗于图框, 图中所有字母、文字字号大小要统一. 表用三线表. 图表中术语、符号、单位等应与正文一致.
7. 计量单位使用《中华人民共和国法定计量单位》(SI). 论文中物理计量单位用字母符号表示, 如 mg(毫克), m(米), h(小时)等. 科技名词术语用国内通用写法, 作者译的新名词术语, 文中第一次出现时需注明原文.
8. 文中各级标题采用 1, 1.1, 1.1.1 的形式, 左起顶格书写, 3 级以下标题可用(1), (2)……表示, 后缩 2 格书写.
9. 文中外文字母、符号应标明其大小写, 正斜体. 生物的拉丁学名为斜体. 缩略语首次出现时应给出中文全称, 括号内给出英文全称和缩略语.
10. 未公开发表资料不列入参考文献, 可在出现页以脚注表示. 文献按文中出现的先后次序编排. 常见文献书写格式为:
期刊: 作者(外文也要姓列名前). 论文名[J]. 期刊名, 年, 卷(期): 起页-止页.
图书: 作者. 书名[M]. 出版地: 出版社, 年. 起页-止页.
会议文集: 作者. 论文名[A]. 见(In): 编者. 文集名[C]. 出版地: 出版社(单位), 年. 起页-止页.
学位论文: 作者. 论文名[D]. 保存地: 保存单位, 年份.
报告: 作者. 论文名[R]. 出版地: 出版单位, 出版年.
专利: 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 出版日期.
11. 来稿文责自负, 切勿一稿多投. 编辑对来稿可作文字上和编辑技术上的修改和删节. 在 3 个月内未收到本刊选用通知, 可来电询问.
12. 投稿请附作者单位详细地址, 邮编, 电话号码, 电子邮箱等. 编辑部邮政地址: 北京市 2871 信箱; 邮编: 100085; 电话: 010-62941102, 010-62849343; 传真: 010-62849343; E-mail: hjks@rcees.ac.cn; 网址: www.hjks.ac.cn

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenruiang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《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)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 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