

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第10期

Vol.34 No.10

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

南京地区大气气溶胶 PM _{2.5} 中稳定碳同位素组成研究	吴梦龙, 郭照冰, 刘凤玲, 孙德玲, 卢霞, 姜文娟 (3727)
太原市空气颗粒物中正构烷烃分布特征及来源解析	胡冬梅, 彭林, 白慧玲, 牟玲, 韩锋, 刘效峰, 冀豪栋, 张鹏九 (3733)
交通与气象因子对不同粒径大气颗粒物的影响机制研究	罗娜娜, 赵文吉, 晏星, 官兆宁, 熊秋林 (3741)
公交车燃用生物柴油的颗粒物排放特性	楼狄明, 陈峰, 胡志远, 谭丕强, 胡炜 (3749)
兰州及其周边区域大气降水 δ ¹⁸ O 特征及其水汽来源	陈粉丽, 张明军, 马潜, 李小飞, 王圣杰, 李菲 (3755)
天山乌鲁木齐河源 1 号冰川区气溶胶水溶性离子变化特征及来源分析	岳晓英, 李忠勤, 张明军, 周平, 樊晋 (3764)
O ₃ /H ₂ O ₂ 氧化苯乙烯气体性能及机制	何觉聪, 黄倩茹, 叶杞宏, 罗雨薇, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (3772)
马尾松针叶组织稳定硫同位素地球化学特征及来源示踪	关晖, 肖化云, 朱仁果, 郑能建, 瞿玲露 (3777)
江西省表层土壤和苔藓硫含量及硫同位素组成对比研究	李男, 肖化云, 陈永忠, 周丹, 罗笠, 吴代敏 (3782)
辽河流域非点源污染空间特征遥感解析	王雪蕾, 蔡明勇, 钟部卿, 姚延娟, 殷守敬, 吴迪 (3788)
景观带尺度高寒区水文特征时空变化规律研究	杨永刚, 胡晋飞, 肖洪浪, 邹松兵, 尹振良 (3797)
金普湾海域表层沉积物中基质结合态磷化氢的分布特征	游丽丽, 宗海波, 张淑芳, 尹国宇, 李涛, 侯立军 (3804)
崇明东滩湿地干湿交替过程脲酶活性变化初探	韩建刚, 曹雪 (3810)
FDA 水解酶分析法表征近海泥滩微生物活性	刘叶, 邹立, 刘陆, 高冬梅 (3818)
中国东北主要河流沉积物中多溴二苯醚的含量状况及生态风险分析	袁海峰, 成杭新, 赵传冬, 刘应汉, 杨柯, 李括, 彭敏, 刘飞 (3825)
深圳大鹏湾海域表层沉积物和生物体中多环芳烃残留及其风险评价	孙闰霞, 柯常亮, 谷阳光, 卢腾腾, 杜飞雁, 马胜伟, 林钦 (3832)
PMF 和 PCA/MLR 法解析上海市高架道路地表径流中多环芳烃的来源	边璐, 李田, 侯娟 (3840)
三峡库区蓄水初期大宁河重金属食物链放大特征研究	余杨, 王雨春, 周怀东, 高博, 赵高峰 (3847)
小型封闭水体环境因子与叶绿素 a 的时空分布及相关性研究	李飞鹏, 张海平, 陈玲 (3854)
太湖氮、磷自净能力的实验与模型模拟	韩涛, 翟淑华, 胡维平, 张红举, 李钦钦 (3862)
湖泊疏浚方式对内源释放影响的模拟研究	陈超, 钟继承, 范成新, 孔明, 余居华 (3872)
水体/底泥生物基城市河道富营养化水体修复试验研究	周慧华, 宋晓光, 吴革, 谢鑫源 (3879)
底泥调控剂对感潮河涌沉积物中重金属的影响	区凤荏, 孙国萍, 许玫英 (3888)
区域水化学条件对淮南采煤沉陷区水域沉积物磷吸附特征的影响研究	易齐涛, 孙鹏飞, 谢凯, 曲喜杰, 王婷婷 (3894)
4 种人工湿地填料的 f ₂ 噬菌体吸附特性	陈迪, 郑祥, 魏源送, 杨勇 (3904)
稻壳灰对抗生素磺胺的吸附特性研究	纪莹雪, 王凤贺, 张帆, 张艳红, 王国祥, 顾中铸 (3912)
紫外辐射对腐殖酸化学稳定性影响机制研究	王文东, 周礼川, 丁真真, 王洪平, 孙学军 (3921)
基于石墨烯载体的铁基材料制备及除砷性能比较	朝木尔乐格, 冯流, 霍艳霞 (3927)
nTiO ₂ 在水中的分散沉降行为研究	陈金媛, 方金凤, 魏秀珍 (3933)
微生物-铁氧化物交互作用对黄土中砷活化迁移的影响	谢芸芸, 陈天虎, 周跃飞, 谢巧勤 (3940)
两性离子在聚偏氟乙烯 (PVDF) 膜表面接枝改性的研究	周桂花, 肖峰, 肖萍, 王东升, 段晋明, 石健, 臧莉 (3945)
化粪池排口处土壤对典型农户生活污水氮素污染物的消减测算研究	周锋, 王文林, 王国祥, 马久远, 万寅婧, 唐晓燕, 梁斌, 季斌 (3954)
珠江三角洲典型集约化猪场废水污染特征及风险评价	李文英, 彭智平, 于俊红, 黄继川, 徐培智, 杨少海 (3963)
污泥堆肥草坪基质利用对草坪生长及土壤和水环境的影响	金树权, 周金波, 陈若霞, 林斌, 王德耀 (3969)
活性污泥絮体粒径分布与分形维数的影响因素	李振亮, 张代钧, 卢培利, 曾善文, 杨永浩 (3975)
不同恢复方式对硝化颗粒污泥活性的影响	郭秀丽, 高大文, 卢健聪 (3981)
生物陶粒反应器的氨自养反硝化研究	陈丹, 王弘宇, 宋敏, 杨开, 刘晨 (3986)
亚高山草甸土壤呼吸的空间异质性研究	严俊霞, 李君剑, 李洪建, 张义辉 (3992)
SiB3 模式对作物区 CO ₂ 通量的模拟研究	张庚军, 卢立新, 蒋玲梅, 蒋磊, Ian Baker (4000)
缙云山土地利用方式对土壤活性有机质及其碳库管理指数的影响	徐鹏, 江长胜, 郝庆菊, 祝滔 (4009)
典型农业城市街道灰尘重金属特征及其环境风险评价: 以许昌市为例	闫慧, 陈杰, 肖军 (4017)
苏州、无锡和南通道路灰尘中的多溴联苯醚和多氯联苯	史双昕, 董亮, 李玲玲, 张辉, 李斯明, 张天野, 黄业茹 (4024)
废旧汽车拆解区土壤中多环芳烃垂向分布特性	吴彦瑜, 胡小英, 洪鸿加, 彭晓春 (4031)
铬污染土壤的稳定化处理及其长期稳定性研究	王旌, 罗启仕, 张长波, 谈亮, 李旭 (4036)
典型磺胺类抗生素在土柱中的淋溶规律研究	李曼, 陈卫平, 魏福祥, 焦文涛 (4042)
3 种金属氧化物纳米材料在不同土壤中迁移行为研究	方婧, 余博阳 (4050)
多孔介质中 NAPLs 流体毛细管指进形态及分形表征	李慧颖, 杜晓明, 杨宾, 伍斌, 徐竹, 史怡, 房吉敦, 李发生 (4058)
毛竹入侵对常绿阔叶林主要树种的化感作用研究	白尚斌, 周国模, 王懿祥, 梁倩倩, 陈娟, 程艳艳, 沈蕊 (4066)
珠江口典型水产养殖区抗生素抗性基因污染的初步研究	梁惜梅, 袁湘平, 施震 (4073)
江苏盐城地区水产品重金属含量与安全评价	刘洋, 付强, 高军, 徐网谷, 殷波, 曹亚乔, 秦卫华 (4081)
铜胁迫对不同基因型谷子幼苗基因组 DNA 多态性的影响	张义贤, 付亚萍, 肖志华, 张喜文, 李萍 (4090)
利用高通量测序对封存 CO ₂ 泄漏情景下土壤细菌的研究	田地, 马欣, 李玉娥, 查良松, 伍洋, 邹晓霞, 刘爽 (4096)
酸性矿山废水区域废矿石中真核生物多样性分析	李思远, 郝春博, 王丽华, 吕铮, 张丽娜, 刘莹, 冯传平 (4105)
十溴联苯醚降解菌的特性及功能蛋白初步分析	常晶晶, 尹华, 秦华明, 叶锦韶, 彭辉, 宋小飞 (4112)
硒对水稻吸收积累和转运锰、铁、磷和硒的影响	胡堂, 黄益宗, 黄艳超, 刘云霞, 梁建宏 (4119)
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	刘俊, 周坤, 徐卫红, 陈惠, 张明中, 江玲, 杨芸, 王崇力, 熊治庭 (4126)
电子废物排放持久性有毒污染物的控制政策分析	李力, 吕永龙, 王铁宇 (4132)
《环境科学》征稿简则 (3926) 《环境科学》征订启事 (4057) 信息 (3878, 3953, 3999, 4041)	

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

刘俊¹, 周坤¹, 徐卫红^{1*}, 陈惠¹, 张明中¹, 江玲¹, 杨芸¹, 王崇力¹, 熊治庭²

(1. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 2. 武汉大学资源与环境科学学院, 武汉 430079)

摘要: 采用盆栽试验研究了重金属 Cd ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 污染下, 叶面喷施不同 Fe 浓度 (0、50、100、200 和 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 对不同品种番茄生长、抗氧化酶活性及番茄体内 Cd 形态和积累量的影响。结果表明, 喷施 Fe 后, 番茄干重、Cd 含量和积累量在 2 个品种之间的差异达到了显著水平。Fe 显著增加了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及植株总干重。随 Fe 浓度增加, 2 个品种根超氧化物歧化酶 (SOD) 活性以及渝粉 109 根过氧化氢酶 (CAT) 活性先下降然后呈升高趋势, 2 个品种根过氧化物酶 (POD) 活性以及 4641 根 CAT 活性则先升高然后下降。番茄果实中的 Cd 以 $F_R > F_{\text{HCl}} > F_E > F_{\text{NaCl}} > F_{\text{HAC}} > F_W$ 。适量的 Fe 减少了番茄果实中各形态 Cd 含量, 但高量 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 增加了 4641 果实中 F_{HCl} 、 F_R 以及渝粉 109 果实中 F_E 、 F_{NaCl} 、 F_R 和 Cd 总提取量。番茄 Cd 积累量以叶 > 茎 > 果实 > 根。叶面喷施 Fe 使番茄叶、茎、根和果实中的 Cd 含量分别降低了 7.1% ~ 25.3%、30.8% ~ 50.4%、13.0% ~ 45.1% 和 2.8% ~ 11.7%。供试 2 个番茄品种, 无论喷 Fe 与否, 果实 Cd 含量及植株 Cd 总积累量以 4641 < 渝粉 109。

关键词: 铁镉交互; 生理特性; 镉累积; 镉形态; 番茄品种

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)10-4126-06

Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato

LIU Jun¹, ZHOU Kun¹, XU Wei-hong¹, CHEN Hui¹, ZHANG Ming-zhong¹, JIANG Ling¹, YANG Yun¹, WANG Chong-li¹, XIONG Zhi-ting²

(1. College of Resources and Environments, Southwest University, Chongqing 400715, China; 2. College of Resource and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China)

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the influence of different iron (Fe) levels (0, 50, 100, 200 and $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) on the plant growth, activities of antioxidant enzymes, accumulation and chemical forms of cadmium (Cd) in tomato when exposed to Cd ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that dry weights of fruit, roots, stem, leaf, and plant, and concentration and accumulation of Cd significantly differed between the two varieties of tomato tested. Dry weights of fruit, roots, stem, leaf, and plant increased in the presence of Fe. Activities of superoxide dismutase (SOD) of root in both varieties, and activities of catalase (CAT) of root in Yufen109 decreased at first, and then increased with increasing levels of Fe, but activities of peroxidase (POD) of root in both varieties and activities of CAT of root in 4641 increased at first, and then reduced with increasing levels of Fe. Chemical forms of Cd in fruit of tomato were in the order of $F_R > F_{\text{HCl}} > F_E > F_{\text{NaCl}} > F_{\text{HAC}} > F_W$. All chemical forms of Cd obviously decreased after the application of adequate Fe compared to the control, while F_{HCl} and F_R of 4641, and the total extractable Cd, F_E , F_{NaCl} and F_R of Yufen109 increased at $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe treatment. Cadmium accumulations of tomato were in the order of leaf > stem > fruit > roots. Cadmium concentration in leaf, stem, roots and fruit of both varieties decreased by 7.1% - 25.3%, 30.8% - 50.4%, 13.0% - 45.1% and 2.8% - 11.7% in the presence of Fe when exposed to Cd, and the Cd concentration of fruit and Cd accumulations in plant were in the order of 4641 < Yufen109 in the presence or absence of Fe.

Key words: antagonism of iron and cadmium; physiological characterization; Cd accumulation; Cd fractions; tomato varieties

镉 (cadmium, Cd) 是自然界中最常见的一种重金属微量元素^[1], 也是土壤重金属主要污染物^[2,3]。据统计, 全世界每年向环境中释放的 Cd 达 30 000 t 左右, 其中 82% ~ 94% 的 Cd 进入到土壤中。我国每年由工业废弃物排放到环境中的 Cd 总量就达 680 t^[4]。郊区菜园土壤、蔬菜 Cd 污染的问题在我国大中城市均存在, 且日趋严重^[5]。约 24.1% 的菜地样本中 Cd 含量超过国家土壤环境质量二级标准^[6]。

在土壤 Cd 污染治理中, 利用 Cd 的吸附迁移受竞争性阳离子与 Cd^{2+} 的拮抗效应, 来抑制 Cd 吸收或转移到作物可食部位中的 Cd 污染农艺调控方法, 近

收稿日期: 2013-01-13; 修订日期: 2013-03-10

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: 刘俊 (1987 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与农产品安全, E-mail: liulove_jun@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xuwei_hong@163.com

年来已逐渐受到研究者的关注^[7,8]. 其中,植物中铁和镉的交互作用一直是土壤学、生态学、环境科学研究的热点问题. 早在1997年 Chlopecka 等^[9]就报道,在土壤中添加 $50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的铁氧化物使玉米和大麦对 Cd 的吸收显著降低. Shao 等^[10] 也指出,土壤加入铁肥后水稻根、茎和果实的 Cd 含量显著减少. 但也存在相反报道^[11].

Cd 是蔬菜主要重金属污染物,极易在蔬菜中富集,并通过食物链危害人类健康. 蔬菜吸收积累重金属 Cd 的能力不仅在种间差异显著,而且在品种间也表现出显著性差异^[12~14]. 番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.) 是全世界栽培最为普遍的果菜之一,在我国各地也均有栽培. 我国加工番茄2009年达到865万t,占全世界20%以上. 研究表明番茄对Cd耐性和吸收富集存在基因型差异^[15],但铁对番茄生长、Cd积累及化学形态的影响还鲜见报道. 为了进一步探讨铁、镉的相互关系以及Fe对不同番茄品种Cd吸收和向可食部位(果实)转移的影响,本研究选取了重庆地区2个主栽番茄品种(4641和渝粉109),采用盆栽试验模拟Cd污染的土壤条件,探讨了Fe对不同品种番茄抗氧化酶活性、光合特性、Cd的积累及化学形态的影响,以期为菜园土壤Cd污染的合理防治提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试作物为番茄 (*Lycopersicon esculentum* Mill.), 品种4641和渝粉109,由重庆农业科学院蔬菜花卉所提供. 供试土壤采自重庆市九龙坡区白市驿蔬菜基地. 土壤 pH 为 6.9, 土壤全 N 为 $1.21 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤有机质为 $33.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤碱解 N 为 $110.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效 P 为 $10.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效 K 为 $104.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤有效 Fe 为 $57.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 土壤 CEC 为 $20.7 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$. 土壤 Cd 未检测出.

1.2 试验方法

试验于2012-03-10~2012-07-09在西南大学资环学院玻璃大棚内进行. 试验共设5个Fe浓度,即0、50、100、200和400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$). Cd浓度为10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$). 过40目筛的风干土5kg,经过Cd处理后装入塑料盆内(直径×高=25cm×17cm),平衡2~3周后,每钵移栽番茄幼苗1株. 在开花期开始进行叶面喷施Fe的营养液,以喷去离子水为对照处理. 每隔5d喷施1次,每次喷施100mL·钵⁻¹,共喷7次. 土壤水分保

持田间持水量的60%. 肥底N为180 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和尿素形式加入,P、K分别为100 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和150 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和KCl加入. 试验设置3次重复,随机排列. 从第一次结果开始记产,2012年7月9日全部收获. 植株在85℃下杀酶15min,在60℃下烘干至恒重.

1.3 测定方法

按文献[16]的方法测定土壤基本理化性质. 番茄叶过氧化氢酶(CAT)活性采用文献[17]的方法测定;过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)活性采用文献[18]的方法测定. 番茄果实中各Cd形态分级采用连续浸取法测定^[19]. 植株Cd含量采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消煮,原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定.

数据采用SPSS 16.0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

从表1可以看出,番茄果实、根、茎、叶及总干重在2个品种间、Fe浓度间的差异达到了显著水平. 在重金属Cd污染(10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)下,除50 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时4641的根干重以及400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时渝粉109的叶干重外,喷施Fe显著增加了2个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干重,增幅分别为5.0%~48.7%、13.3%~71.1%、16.0%~63.1%、9.8%~54.6%及18.5%~40.3%. 但随Fe浓度增加,番茄果实、根、茎、叶及总干重均表现出先增加,在100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时到达最高,然后降低. 比较2个品种,未喷Fe时,果实干重以4641>渝粉109,但喷施Fe200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或400 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,果实干重以渝粉109>4641.

2.2 抗氧化酶活性

重金属Cd胁迫会诱导植物产生大量的自由基,而CAT、SOD及POD等抗氧化酶能有效清除植物体内的自由基和过氧化物^[20]. 在Cd污染下,2个品种番茄根CAT活性随Fe浓度的变化表现出不同的趋势(图1). 4641根CAT随Fe浓度CAT活性先增加,在200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe时达到最大值,然后下降;而渝粉109随Fe浓度增加,CAT活性先下降,在50 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe时达到最低,然后逐渐回升. 随Fe浓度增加,POD活性则随Fe浓度增加,先增加,在100 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或200 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe时达到最大值,然后下降(图2),而2个品种根SOD活性先下降,在100

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe 时达到最低值, 然后呈增加趋势 (图 3).

表 1 不同 Fe 浓度对番茄生物量的影响

Table 1 Effects of different Fe levels on biomass of tomato

项目		植株干重/ $\text{g}\cdot\text{株}^{-1}$									
		果实		根		茎		叶		总干重	
		4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109
Fe 浓度 $/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0	28.00	25.91	2.73	2.41	20.26	35.03	13.14	15.67	64.17	78.98
	50	34.69	27.18	2.42	2.85	26.23	39.30	15.59	24.22	78.91	93.57
	100	34.92	30.53	4.67	2.93	30.00	42.45	16.02	20.40	85.59	96.33
	200	37.40	38.50	4.26	3.50	33.11	45.69	15.30	18.26	90.06	105.96
	400	33.74	37.42	3.78	2.73	31.26	40.58	14.43	15.34	83.21	96.07
LSD _{0.05}	品种	0.509		0.153		0.362		0.483		1.826	
	Fe 浓度	0.167		0.224		0.271		0.318		1.509	
	品种 $\times$ Fe 浓度	0.432		0.076		0.895		0.420		1.102	

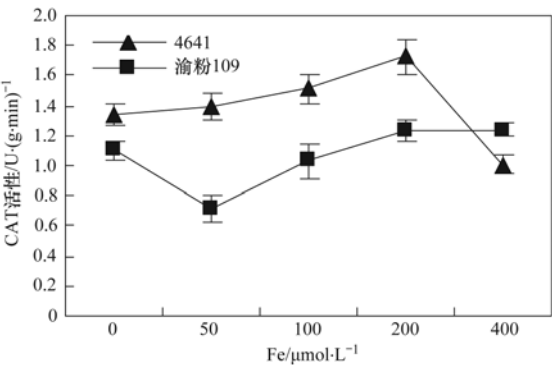


图 1 不同 Fe 浓度对番茄 CAT 活性的影响

Fig. 1 Influence of different Fe levels on activity of CAT in the two varieties of tomato

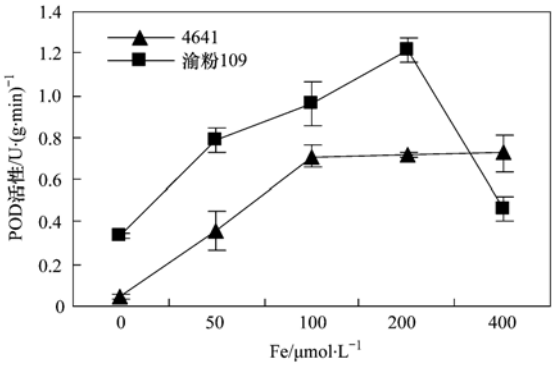


图 2 不同 Fe 浓度对番茄 POD 活性的影响

Fig. 2 Influence of different Fe levels on activity of POD in the two varieties of tomato

2.3 果实 Cd 形态及含量

由表 2 可知, 番茄果实中 Cd 各形态含量及 Cd 提取总量在 2 个品种间、Fe 浓度间的差异达到显著水平. 2 个番茄品种果实中各形态 Cd 平均含量以残渣态 Cd (F_R) > 盐酸提取态 Cd (F_{HCl}) > 乙醇提取态 Cd (F_E) > 氯化钠提取态 (F_{NaCl}) > 醋酸提取态 Cd (F_{HAC}) > 水提取态 Cd (F_W). 其中, 2 个番茄品种果

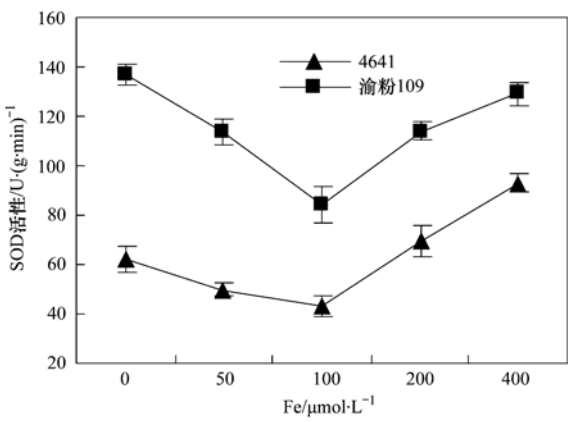


图 3 不同 Fe 浓度对番茄 SOD 活性的影响

Fig. 3 Influence of different Fe levels on activity of SOD in the two varieties of tomato

实 F_R 含量分别为 $0.876\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $1.289\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均为 $1.082\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 所占 Cd 提取总量的质量分数分别为 54.4% 和 59.3%, 平均为 57.2%; F_{HCl} 平均为 $0.311\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的质量分数为 16.5%. 二者均为活性偏低形态 Cd, 其平均含量之和为 $1.393\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的质量分数为 73.7% (表 2). 活性较高的 F_W 和 F_E 平均含量分别为 $0.159\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.066\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的质量分数分别为 8.4% 和 3.5%, 二者平均含量之和为 $0.225\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的质量分数为 11.9%. 试验发现, 喷施适量的 Fe 能减少 2 个番茄品种果实中各形态 Cd 含量, 但随 Fe 浓度的增加, 各形态 Cd 表现出不同的变化趋势. 如随 Fe 浓度增加, 4641 果实中 F_E 、 F_W 和 F_{HAC} 含量逐渐降低, 分别较对照减少了 20.6% ~ 100%、50.4% ~ 100% 和 43.6% ~ 62.7%; 而 2 个品种果实 Cd 总提取量, 以及渝粉 109 果实中各形态 Cd (除 F_{HCl} 外)、4641 果实中 F_{NaCl} 、 F_{HCl} 和 F_R 含量则先降

低,在 50、100 或 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时到达最低值,然后回升. 高量 Fe(400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)反而使 4641 果实中 F_{HCl} 、 F_{R} 以及渝粉 109 果实中 F_{E} 、 F_{NaCl} 、 F_{R} 和总提取量较对照分别增加了 34.5%、33.2%、2.4%、5.0%、8.6% 和 6.4%. 此外,喷施 Fe 使渝粉 109 果实中 F_{HCl} 含量较对照增加了 8.4%~75.5%.

表 2 不同 Fe 浓度对番茄果实 Cd 化学形态及含量的影响¹⁾

Table 2 Effects of different Fe levels on chemical forms and concentration of Cd in tomato

项目		$F_{\text{E}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$F_{\text{W}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$F_{\text{NaCl}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$F_{\text{HAC}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$F_{\text{HCl}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		$F_{\text{R}}/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$		总提取量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	
		4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109
Fe 浓度 $/\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0	0.345	0.170	0.115	0.229	0.334	0.222	0.220	0.167	0.232	0.310	0.839	1.239	2.085	2.337
	50	0.274	0.105	0.057	0.047	0.123	<0.001	0.124	0.138	0.213	0.544	0.827	1.172	1.618	2.006
	100	0.200	0.112	0.024	<0.001	0.022	0.034	0.110	0.082	0.201	0.336	0.799	1.309	1.356	1.873
	200	0.070	0.140	0.013	<0.001	0.088	0.134	0.095	0.138	0.193	0.367	0.819	1.380	1.278	2.159
	400	<0.001	0.174	<0.001	0.172	0.225	0.233	0.082	0.157	0.312	0.405	1.104	1.346	1.723	2.487
LSD _{0.05}	品种	0.068		0.009		0.016		0.011		0.004		0.037		0.221	
	Fe 浓度	0.021		0.003		0.005		0.003		0.015		0.006		0.079	
	品种 × Fe 浓度	0.013		0.005		0.008		0.012		0.021		0.019		0.113	

1) F_{E} 、 F_{W} 、 F_{NaCl} 、 F_{HAC} 、 F_{HCl} 和 F_{R} 分别代表乙醇提取态 Cd、水提取态 Cd、氯化钠提取态 Cd、醋酸提取态 Cd、盐酸提取态 Cd 和残渣态 Cd

2.4 番茄 Cd 积累量

由表 3 可见,番茄 Cd 含量以叶 > 根 > 茎 > 果实. 除渝粉 109 的 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe 处理果实 Cd 含量外,叶面喷施 Fe 使番茄叶、茎、根和果实中的 Cd 含量不同程度降低,Cd 含量降低幅度分别为 15.7%~21.9% 和 7.1%~25.3%、30.8%~47.2% 和 35.6%~50.4%、29.1%~45.1% 和 13.0%~17.1%、2.8%~11.7% 和 4.3%~9.9%. 但随 Fe 浓度增加,番茄叶、茎、根和果实 Cd 含量呈先降后增趋势,即在 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 或 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe 时到达最低值,然后回升.

Cd 主要积累在番茄的叶和茎,分别占植株 Cd 总积累量的 55.5% 和 33.3%. 根和果实的 Cd 积累较少,分别占植株 Cd 总积累量的 5.2% 和 5.9%. 随 Fe 浓度的增加,4641 根的 Cd 积累量以及 2 个品种的茎 Cd 积累量、植株总 Cd 积累量表现为先降低,然后增加;2 个品种叶的 Cd 积累量、渝粉 109 根的 Cd 积累量则表现为先增加,然后降低. 而 2 个品种果实的 Cd 积累量随 Fe 浓度增加总趋势为升高. 比较供试 2 个番茄品种,无论是否喷施 Fe,果实的 Cd 含量及植株 Cd 总积累量以 4641 < 渝粉 109,在喷 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 400 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ Fe 时,果实 Cd 积累量也以 4641 < 渝粉 109.

表 3 不同 Fe 浓度对番茄 Cd 含量及积累量的影响¹⁾

Table 3 Effects of different Fe levels on concentration and accumulation of Cd in tomato

项目		Cd 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$								Cd 积累量/ $\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$								Cd 全量	
		叶		茎		根		果实		叶		茎		根		果实		/ $\text{mg}\cdot\text{株}^{-1}$	
		4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109	4641	渝粉 109		
Fe 浓度 $\text{/}\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	0	116.04	131.68	41.33	50.99	68.6	63.37	5.72	6.35	1.53	2.06	0.84	1.79	0.19	0.15	0.16	0.16	2.71	4.17
	50	97.86	101.20	28.59	32.80	48.61	54.98	5.51	6.05	1.53	2.45	0.75	1.29	0.12	0.16	0.19	0.17	2.58	4.06
	100	95.92	98.43	22.69	28.93	37.64	52.53	5.05	5.72	1.54	2.01	0.68	1.23	0.18	0.15	0.18	0.17	2.57	3.57
	200	90.60	102.83	21.81	25.28	43.20	54.73	5.25	6.08	1.39	1.88	0.72	1.16	0.18	0.19	0.20	0.24	2.49	3.46
	400	99.58	122.28	26.60	32.83	52.11	55.14	5.56	6.55	1.44	1.88	0.83	1.33	0.207	0.15	0.19	0.25	2.65	3.60
LSD _{0.05}	品种	2.231		1.726		1.033		0.131		0.238		0.324		0.009		0.001		0.087	
	Fe 浓度	1.084		0.879		1.783		0.107		0.001		0.013		0.002		0.002		0.023	
	品种 $\times$ Fe 浓度	1.967		1.075		1.652		0.276		0.143		0.179		0.006		0.005		0.050	

1) Cd 积累量 = 干重 $\times$ Cd 含量; Cd 全量为各部位 Cd 积累量之和

3 讨论

本试验条件下,在 Cd 污染土壤上(10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd),叶面喷施 Fe 显著提高了 2 个番茄品种果实、叶、茎、根及总干重(表 1). 在高量 Fe 处理中,番

茄生物量和产量也高于未喷 Fe 处理,说明 Fe 与 Cd 的拮抗效应能有效降低 Cd 对番茄的毒害. 此外,Fe 作为植物必需的微量营养元素之一,参与叶绿素的形成,还是一些重要的氧化-还原酶催化部分的组分(如固氮酶中铁蛋白和钼铁蛋白等),在植物体内以

各种形式与蛋白质结合,作为重要的电子传递体或催化剂,参与光合作用、呼吸作用等许多生命活动,促进了番茄的生长,增强了番茄的抗逆能力^[21],从而在一定程度上缓解重金属 Cd 对番茄生长的抑制。但试验也发现,Fe 浓度过大($\text{Fe} > 100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),番茄生物量和产量开始下降。可能是植物体内积累了过量的铁以及铁化合物会诱发多种活性自由基,导致脂质的过氧化和膜的损伤^[22],铁毒害影响了番茄生长。另外,也可能是高量 Fe 与 Cd 的协同效应加重了 Cd 对番茄的毒害作用^[23]。可见,铁镉交互作用与 Fe 浓度有关。供试 2 个番茄品种,未喷 Fe 时,4641 的果实干重明显高于渝粉 109,说明该品种对 Cd 污染环境的耐性更强,但喷 Fe 后,渝粉 109 的果实干重明显高于 4641,可见,渝粉 109 对 Fe 的反应更为敏感,喷 Fe 后,Fe 与 Cd 的拮抗效应减缓 Cd 对渝粉 109 生长的毒害效应,因而也获得了更高的产量。

重金属 Cd 胁迫会影响植物体内活性氧代谢系统的平衡,产生大量的氧自由基,CAT、POD、SOD 等组成的抗氧化系统能够清除氧自由基,可使细胞免受由重金属 Cd 引起的氧化胁迫伤害^[20,24]。在本试验中,随 Fe 浓度增加,2 个品种根 SOD 活性以及渝粉 109 根 CAT 活性先下降,在 $50 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 时达到最低值,然后呈增加趋势。表明喷施 Fe 能降低番茄体内活性氧自由基,从而导致清除自由基酶含量下降,但高量 Fe 反而增加了抗氧化酶活性,以清除因 Fe 毒害产生的大量氧自由基。随 Fe 浓度增加,2 个品种根 POD 活性以及 4641 根 CAT 活性先增加,在 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 时达到最低值,然后下降。该结果与番茄的生长量和产量随 Fe 浓度变化是一致的。可能是低浓度 Fe 提高了 CAT 和 POD 活性,以适应不良环境胁迫,而高浓度 Fe 胁迫使细胞膜系统受到了伤害,导致 CAT 和 POD 活性降低^[25],此外,Fe 与 Cd 的协同效应可能也加重了植物遭受 Cd 的毒害作用,反而使植株体内的 CAT 和 POD 活性下降。

重金属在植物体内的化学形态一般以氯化钠态、醋酸盐态、盐酸盐态等非活性态为主^[26]。但王友保等^[27]报道在三叶草和结缕草茎叶中 Cu 主要形态为残渣态。本试验发现,Cd 在番茄果实中主要以 F_R 存在,平均为 $1.082 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,所占 Cd 提取总量的质量分数为 57.2% (表 2)。其次是 F_{HCl} ,平均为 $0.311 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的质量分数为 16.5%。 F_R 、 F_{HCl} 二者平均含量之和为 1.393

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的质量分数达到了 73.7%,是番茄果实中 Cd 主要存在形式。 F_R 、 F_{HCl} 均为活性偏低形态 Cd,活性较高的 F_W 和 F_E 平均含量之和为 $0.226 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的质量分数仅为 11.9%,从而极大地限制了 Cd 的毒害效应。本试验条件下,喷施适量的 Fe 减少了 2 个番茄品种果实各形态 Cd 含量和 Cd 总提取量,铁镉表现出明显的拮抗效应。该结果与 Krupa 等^[28]报道相似。原因可能与铁转运子基因的表达有关,也可能是由于重金属镉与铁竞争根系吸收运输位点所致^[29]。但高量 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 反而较低量 Fe 增加了 4641 果实中 F_{HCl} 、 F_R 以及渝粉 109 果实中 F_E 、 F_{NaCl} 、 F_R 和总提取量,铁镉表现出一定的协同效应。Stephan 等^[30]就曾报道,铁高效西红柿 cv. Bonner Beste 突变体 *Chloronerva* 在较高 Fe 浓度下能吸收较多的重金属。因此,铁镉交互作用不仅与 Fe 浓度有关,还与供试作物种类和品种有关。

供试 2 个番茄品种 Cd 主要累积于叶和茎中,积累较少的是根和果实,而且 Cd 含量也以叶、茎大于根、果实(表 3)。可见番茄对 Cd 的转移能力较强。此结果与之前报道番茄 Cd 主要集中在根部有所不同^[15]。本试验中,番茄果实中 Cd 含量 $> 5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远远高于国家对蔬菜和水果的 Cd 限量标准($0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),说明番茄不但对 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。提示在 Cd 污染较重的地区,种植番茄可能存在果实产品受 Cd 污染的风险。叶面喷施适量 Fe 使番茄叶、茎、根和果实中的 Cd 含量不同程度降低。该结果与 Chlopecka 等^[9]、Shao 等^[10]报道类似。原因可能是 Fe 供应充足时,铁转运子基因关闭,Fe 吸收增加,镉的被动吸收量下降^[27]。此外,适量的 Fe 与重金属 Cd 竞争根系吸收运输位点所致降低了 Cd 离子在植物体内的木质部长距离输送。但在 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 或 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 时,叶、茎、根和果实中的 Cd 含量到达最低值,然后回升。该结果进一步印证了铁镉交互作用不是简单的拮抗效应,表现出拮抗和协同并存,可能与 Fe 浓度有关。比较供试 2 个番茄品种,无论叶面喷 Fe 与否,果实 Cd 含量及植株 Cd 总积累量以 4641 < 渝粉 109,在喷 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Fe 时,果实 Cd 积累量也以 4641 < 渝粉 109。可见,4641 比渝粉 109 能更少吸收富集土壤中的 Cd,而叶面喷施 Fe 也有效地降低了 4641 植株对 Cd 的吸收富集。

4 结论

(1)在重金属 Cd 污染 ($10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd) 下, Fe 能缓解 Cd 对供试番茄生长的抑制, 显著增加了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干重。但随 Fe 浓度增加, 番茄果实、根、茎、叶及总干重均表现出先增后降的趋势。

(2)随 Fe 浓度增加, 2 个品种根 SOD 活性以及渝粉 109 根 CAT 活性先下降然后呈升高趋势, 2 个品种根 POD 活性以及 4641 根 CAT 活性则先增加然后下降。

(3)番茄果实中的 Cd 主要以活性偏低的残渣态 Cd (F_R) 和盐酸提取态 Cd (F_{HCl}) 形式存在。喷施适量的 Fe 减少了番茄果实中各形态 Cd 含量, 但高量 Fe ($400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$) 增加了 4641 果实中 F_{HCl} 、 F_R 以及渝粉 109 果实中 F_E 、 F_{NaCl} 、 F_R 和 Cd 总提取量。

(4)番茄 Cd 主要积累在叶和茎。叶面喷施适量的 Fe 能有效降低番茄果实 Cd 的含量。但随 Fe 浓度增加, 番茄叶、茎、根和果实 Cd 含量呈先降后增趋势。铁镉交互的作用在两个番茄品种中表现出拮抗和协同效应并存。植物品种、植物部位和 Fe 的供应水平等因素都会影响铁镉交互的作用。

参考文献:

- [1] Xu W H, Li Y R, He J P, *et al.* Cd uptake in rice cultivars treated with organic acids and EDTA [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2010, **22**(3): 441-447.
- [2] Satarug S, Baker J R, Urbenjapol S, *et al.* A global perspective on cadmium pollution and toxicity in non-occupationally exposed population [J]. *Toxicology Letters*, 2003, **137**(1-2): 65-83.
- [3] Wei S H, 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.
- [4] 杨肖娥, 李廷强. 我国农业环境质量和农产品污染剖析[J]. *中国食物营养*, 2003, (10): 22-24, 18.
- [5] 宋波, 高定, 陈同斌, 等. 北京市菜地土壤和蔬菜铬含量及其健康风险评估[J]. *环境科学学报*, 2006, **26**(10): 1707-1715.
- [6] 曾希柏, 李莲芳, 梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J]. *中国农业科学*, 2007, **40**(11): 2507-2517.
- [7] 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.
- [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] Chlopecka A, Adriano D C. Influence of zeolite, apatite and Fe-oxide on Cd and Pb uptake by crops[J]. *Science of the Total Environment* 1997, **207**(2-3): 195-206.
- [10] Shao G S, Chen M X, Wang W X, *et al.* Iron nutrition affects cadmium accumulation and toxicity in rice plants [J]. *Plant Growth Regulation*, 2007, **53**(1): 33-42.
- [11] 张燕. 铁营养状况对黄瓜吸收镉的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2006.
- [12] 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.
- [13] 李德明, 朱祝军, 钱琼秋. 白菜镉积累基因型差异研究[J]. *园艺学报*, 2004, **31**(1): 97-98.
- [14] 孙建云, 沈振国. 镉胁迫对不同甘蓝基因型光合特性和养分吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(11): 2605-2610.
- [15] 朱芳, 方炜, 杨中艺. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异[J]. *生态学报*, 2006, **26**(12): 4071-4081.
- [16] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000. 12-22, 107-195, 335-336.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] Chien H F, Wang J W, Lin C C, *et al.* Cadmium toxicity of rice leaves is mediated through lipid peroxidation [J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, **33**(3): 205-213.
- [22] Sinha S, Gupta M, Chandra P. Oxidative stress induced by iron in *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle; response of antioxidants [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 1997, **38**(3): 286-291.
- [23] Siedlecka A S, Krupa Z. Cd/Fe interaction in higher plants-its consequences for the photosynthetic apparatus [J]. *Photosynthetica*, 1999, **36**(3): 321-331.
- [24] Rodríguez-Serrano M, Romero-Puertas M C, Zabalza A, *et al.* Cadmium effect on oxidative metabolism of pea (*Pisum sativum* L.) roots. Imaging of reactive oxygen species and nitric oxide accumulation *in vivo* [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2006, **29**(8): 1532-1544.
- [25] 章艺, 刘鹏, 史锋, 等. 过量 Fe^{2+} 对大豆叶肉细胞超微结构的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, **11**(1): 87-91.
- [26] 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.
- [27] 王友保, 张莉, 沈章军, 等. 铜尾矿库区土壤与植物中重金属形态分析[J]. *应用生态学报*, 2005, **16**(12): 2418-2422.
- [28] Krupa Z, Siedlecka A, Mathis P. Cd/Fe interaction and its effects on photosynthetic capacity of primary bean leaves [A]. In: *Proceedings of the Xth International Photosynthesis Congress* [C]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1995, **4**: 621-624.
- [29] 安志装, 王校常, 施卫明, 等. 重金属与营养元素交互作用的植物生理效应[J]. *土壤与环境*, 2002, **11**(4): 392-396.
- [30] Stephan U W, Grun M. Physiological disorders of the nicotianamine-auxotroph tomato mutant *chloronerva* at different levels of iron nutrition II. Iron deficiency response and heavy metal metabolism [J]. *Biochemie und Physiologie der Pflanzen*, 1989, **185**(3-4): 189-200.

CONTENTS

Stable Carbon Isotopic Composition in PM _{2.5} in Nanjing Region	WU Meng-long, GUO Zhao-bing, LIU Feng-ling, <i>et al.</i> (3727)
Distribution and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Atmospheric Particle in Taiyuan, China	HU Dong-mei, PENG Lin, BAI Hui-ling, <i>et al.</i> (3733)
Study on Influence of Traffic and Meteorological Factors on Inhalable Particle Matters of Different Size	LUO Na-na, ZHAO Wen-ji, YAN Xing, <i>et al.</i> (3741)
Particle Emission Characteristics of Diesel Bus Fueled with Bio-diesel	LOU Di-ming, CHEN Feng, HU Zhi-yuan, <i>et al.</i> (3749)
Characteristics of δ ¹⁸ O in Precipitation and Water Vapor Sources in Lanzhou City and Its Surrounding Area	CHEN Fen-li, ZHANG Ming-jun, MA Qian, <i>et al.</i> (3755)
Characteristics and Sources of Soluble Ions in Aerosols from Glacier No. 1 at the Headwater of Urumqi River, Tianshan Mountains, China	YUE Xiao-ying, LI Zhong-qin, ZHANG Ming-jun, <i>et al.</i> (3764)
Mechanism and Performance of Styrene Oxidation by O ₃ /H ₂ O ₂	HE Jue-cong, HUANG Qian-ru, YE Qi-hong, <i>et al.</i> (3772)
Sulfur Isotopic Signatures in Leaves of <i>Pinus massoniana</i> Lamb. and Source Apportionment	GUAN Hui, XIAO Hua-yun, ZHU Ren-guo, <i>et al.</i> (3777)
Comparisons of Sulfur Contents and Isotopes Between Mosses and Surface Soils in Jiangxi Province	LI Nan, XIAO Hua-yun, CHEN Yong-zhong, <i>et al.</i> (3782)
Research on Spatial Characteristic of Non-point Source Pollution in Liaohe River Basin	WANG Xue-lei, CAI Ming-yong, ZHONG Bu-qing, <i>et al.</i> (3788)
Spatial and Temporal Variations of Hydrological Characteristic on the Landscape Zone Scale in Alpine Cold Region	YANG Yong-gang, HU Jin-fei, XIAO Hong-lang, <i>et al.</i> (3797)
Distribution of Matrix-Bound Phosphine in Surface Sediments of Jinpu Bay	YOU Li-li, ZONG Hai-bo, ZHANG Shu-fang, <i>et al.</i> (3804)
Effects of Drying-Rewetting Alternation on Urease Activity in Chongming East Intertidal Flat; Results of a Simulation Study	HAN Jian-gang, CAO Xue (3810)
Characterization of Microbial Activities in Marine Mudflat Sediment Using FDA Hydrolase Analysis	LIU Ye, ZOU Li, LIU Lu, <i>et al.</i> (3818)
Analysis of Ecological Risk and the Content Situation of Polybrominated Diphenyl Ethers in Sediments from Northeast China River Basin	NIE Hai-feng, CHENG Hang-xin, ZHAO Chuan-dong, <i>et al.</i> (3825)
Residues and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments and Marine Organisms from Dapeng Bay, Shenzhen	SUN Run-xia, KE Chang-liang, GU Yang-guang, <i>et al.</i> (3832)
Source Apportionment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons Using Two Mathematical Models for Runoff of the Shanghai Elevated Inner Highway, China	BIAN Lu, LI Tian, HOU Juan (3840)
Biomagnification of Heavy Metals in the Aquatic Food Chain in Daning River of the Three Gorges Reservoir During Initial Impoundment	YU Yang, WANG Yu-chun, ZHOU Huai-dong, <i>et al.</i> (3847)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Chlorophyll-a and Their Correlation Analysis in a Small Enclosed Lake	LI Fei-peng, ZHANG Hai-ping, CHEN Ling (3854)
Experiment and Model Simulation of Self-Purification Capacity of Nitrogen and Phosphorus in Lake Taihu	HAN Tao, ZHAI Shu-hua, HU Wei-ping, <i>et al.</i> (3862)
Simulation Research on the Release of Internal Nutrients Affected by Different Dredging Methods in Lake	CHEN Chao, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (3872)
Research of Urban Eutrophic Water Repair by Water/Sediment Biological Bases	ZHOU Hui-hua, SONG Xiao-guang, WU Ge, <i>et al.</i> (3879)
Effects of Regulatory Agent on the Heavy Metal Stability in Tidal Sediments	OU Feng-zhuang, SUN Guo-ping, XU Mei-ying (3888)
Impact of Regional Water Chemistry on the Phosphorus Isothermal Adsorption of the Sediments in Three Subsidence Waters of the Huainan Mine Areas	YI Qi-tao, SUN Peng-fei, XIE Kai, <i>et al.</i> (3894)
Adsorption Characteristics of f2 Bacteriophages by Four Substrates in Constructed Wetland	CHEN Di, ZHENG Xiang, WEI Yuan-song, <i>et al.</i> (3904)
Adsorption Characteristics of the Antibiotic Sulfanilamide onto Rice Husk Ash	JI Ying-xue, WANG Feng-he, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (3912)
Study on the Stability Variation Mechanism of Humic Acid Water Solution After Radiated by the UV Light	WANG Wen-dong, ZHOU Li-chuan, DING Zhen-zhen, <i>et al.</i> (3921)
Comparison of As Removal Performance by Graphene/Iron-Based Material	Chaomuerlege, FENG Liu, HUO Yan-xia (3927)
Studies on the Dispersion and Deposition Behavior of Nano-TiO ₂ in Aquatic System	CHEN Jin-yuan, FANG Jin-feng, WEI Xiu-zhen (3933)
Effect of the Interaction of Microorganisms and Iron Oxides on Arsenic Releasing into Groundwater in Chinese Loess	XIE Yun-yun, CHEN Tian-hu, ZHOU Yue-fei, <i>et al.</i> (3940)
Surface Modification of Polyvinylidene Fluoride (PVDF) Membrane by Using the Zwitterionic Substance	ZHOU Gui-hua, XIAO Feng, XIAO Ping, <i>et al.</i> (3945)
Estimate the Abatement Rate of Septic Tank Sewage Outfall Soil on Nitrogen Pollutants of Typical Farmer Household Sewage	ZHOU Feng, WANG Wen-lin, WANG Guo-xiang, <i>et al.</i> (3954)
Wastewater Pollution Characteristics from Typical Intensive Pig Farms in the Pearl River Delta and Its Ecological Risk Assessment	LI Wen-ying, PENG Zhi-ping, YU Jun-hong, <i>et al.</i> (3963)
Effects of Sludge Compost Used as Lawn Medium on Lawn Growth and Soil and Water Environment	JIN Shu-quan, ZHOU Jin-bo, CHEN Ruo-xia, <i>et al.</i> (3969)
Influencing Factors of Floc Size Distribution and Fractal Dimension of Activated Sludge	LI Zhen-liang, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li, <i>et al.</i> (3975)
Influence of Different Recovery Methods on the Activity of Nitrification Granular Sludge	GUO Xiu-li, GAO Da-wen, LU Jian-cong (3981)
Study on Hydrogen Autotrophic Denitrification of Bio-ceramic Reactor	CHEN Dan, WANG Hong-yu, SONG Min, <i>et al.</i> (3986)
Studies on Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Subalpine Meadow	YAN Jun-xia, LI Jun-jian, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (3992)
Modeling of CO ₂ Fluxes at Cropland by Using SIB3 Model	ZHANG Geng-jun, LU Li-xin, JIANG Ling-mei, <i>et al.</i> (4000)
Effects of the Different Land Use on Soil Labile Organic Matter and Carbon Management Index in Junyun Mountain	XU Peng, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4009)
Heavy Metal Content in Street Dust and Environmental Risk Assessment of Agricultural City: A Case Study of Xuchang City	YAN Hui, CHEN Jie, XIAO Jun (4017)
Polybrominated Diphenyl Ethers and Polychlorinated Biphenyls in Road Dust from Suzhou, Wuxi and Nantong	SHI Shuang-xin, DONG Liang, LI Ling-ling, <i>et al.</i> (4024)
Vertical Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Abandoned Vehicles Dismantling Area Soil	WU Yan-yu, HU Xiao-ying, HONG Hong-jia, <i>et al.</i> (4031)
Stabilization and Long-term Effect of Chromium Contaminated Soil	WANG Jing, LUO Qi-shi, ZHANG Chang-bo, <i>et al.</i> (4036)
Leaching Characteristics of Sulfadiazine and Sulfamethoxazole in Soil Column	LI Man, CHEN Wei-ping, WEI Fu-xiang, <i>et al.</i> (4042)
Transport Behaviors of Metal Oxide Nanomaterials in Various Soils	FANG Jing, YU Bo-yang (4050)
Fractal Characteristics of Capillary Finger Flow for NAPLs Infiltrated in Porous Media	LI Hui-ying, DU Xiao-ming, YANG Bin, <i>et al.</i> (4058)
Allelopathic Potential of <i>Phyllostachys edulis</i> on Two Dominant Tree Species of Evergreen Broad-leaved Forest in Its Invasive Process	BAI Shang-bin, ZHOU Guo-mo, WANG Yi-xiang, <i>et al.</i> (4066)
Preliminary Studies on the Occurrence of Antibiotic Resistance Genes in Typical Aquaculture Area of the Pearl River Estuary	LIANG Xi-mei, NIE Xiang-ping, SHI Zhen (4073)
Concentrations and Safety Evaluation of Heavy Metals in Aquatic Products of Yancheng, Jiangsu Province	LIU Yang, FU Qiang, GAO Jun, <i>et al.</i> (4081)
Effects of Cu ²⁺ Stress on DNA Polymorphism of Genome in Foxtail Millet of Different Genotypes	ZHANG Yi-xian, FU Ya-ping, XIAO Zhi-hua, <i>et al.</i> (4090)
Research on Soil Bacteria Under the Impact of Sealed CO ₂ Leakage by High-throughput Sequencing Technology	TIAN Di, MA Xin, LI Yu-e, <i>et al.</i> (4096)
Microeukaryotic Biodiversity in the Waste Ore Samples Surrounding an Acid Mine Drainage Lake	LI Si-yuan, HAO Chun-bo, WANG Li-hua, <i>et al.</i> (4105)
Characteristics and Functional Protein Analysis of an Effective Decabromodiphenyl Ether-Degrading Strain	CHANG Jing-jing, YIN Hua, QIN Hua-ming, <i>et al.</i> (4112)
Effect of Selenium on the Uptake and Translocation of Manganese, Iron, Phosphorus and Selenium in Rice (<i>Oryza sativa</i> L.)	HU Ying, HUANG Yi-zong, HUANG Yan-chao, <i>et al.</i> (4119)
Effect of Exogenous Iron on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium, and Physiological Characterization in Different Varieties of Tomato	LIU Jun, ZHOU Kun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4126)
Analysis of Control Policy for Persistent Toxic Substances from Electronic Wastes in China	LI Li, LÜ Yong-long, WANG Tie-yu (4132)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年10月15日 34卷 第10期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 10 Oct. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行