

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析·····	廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)
阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究·····	苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)
上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究·····	包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)
七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究·····	马娟娟, 李真 (2060)
冬季东海、南黄海中 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究·····	宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)
大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价·····	徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)
深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征·····	王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)
表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析·····	孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)
桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程·····	唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)
汾河源区不同景观带水文过程研究·····	杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)
北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征·····	郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)
光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用·····	章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)
紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应·····	陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)
基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究·····	陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)
镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价·····	周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)
两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响·····	杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)
湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化·····	武晓飞, 李大鹏 (2164)
不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响·····	王尚, 李大鹏 (2171)
池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究·····	吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)
再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放·····	王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)
低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响·····	赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)
活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂·····	刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)
准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学·····	刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)
AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究·····	涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)
镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究·····	杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)
微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究·····	刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)
聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究·····	唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)
丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响·····	侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)
聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化·····	周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)
鄱阳湖持久性有机污染物(POPs)长距离传输潜力模拟·····	弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)
基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估·····	廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)
农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策·····	谭冰, 王铁宇, 李奇峰, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)
渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价·····	王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)
基于荧光传感器 Frex 的特性检测水质环境中生物毒性物质·····	赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)
对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放·····	张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)
基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育·····	赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)
酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究·····	刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)
河蚬(<i>Corbicula fluminea</i>)扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响·····	王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)
海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态·····	田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)
DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响·····	吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)
重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究·····	田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)
1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性·····	王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)
黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响·····	江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)
黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应·····	李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)
宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征·····	蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)
长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响·····	张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)
长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响·····	常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)
伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价·····	赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)
江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价·····	张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)
小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析·····	欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)
保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究·····	张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)
米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究·····	吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)
水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响·····	刘晓桦, 张洪, 李永峰 (2433)
《环境科学》征订启事 (2208)	
《环境科学》征稿简则 (2400)	
信息 (2084, 2200, 2229, 2391)	

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响

江玲¹, 杨芸¹, 徐卫红^{1*}, 王崇力¹, 陈蓉¹, 熊仕娟¹, 谢文文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 400715; 2. 武汉大学资源环境学院, 武汉 430079)

摘要: 采用盆栽试验研究了重金属 Cd (20 mg·kg⁻¹) 污染下, 黑麦草-丛枝菌根对 2 个番茄品种生长、叶和根丙二醛 (MDA) 含量、抗氧化酶活性、Cd 积累及化学形态的影响。结果表明, 番茄果实干重和植株总干重、叶和根抗氧化酶活性及丙二醛含量、植株各部位 Cd 含量及积累量在不同品种和处理间的差异达到显著性水平。黑麦草和丛枝菌根单一或复合修复显著提高了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干重, 降低了叶和根的 MDA 含量及过氧化氢酶 (CAT)、超氧化物歧化酶 (SOD) 和过氧化物酶 (POD) 活性。黑麦草和丛枝菌根单一或复合修复降低了 2 个番茄品种果实中 Cd 提取总量和各形态 Cd 含量, 降幅分别为 19.4% ~ 52.4%、31.0% ~ 75.2%、19.7% ~ 59.1%、3.1% ~ 48.2%、20.0% ~ 65.0%、40.7% ~ 100.0% 和 15.2% ~ 50.0%。Cd 主要积累在番茄的叶和茎, 果实和根积累较少。黑麦草和丛枝菌根单一或复合修复不同程度降低了番茄果实、叶、茎和根中的 Cd 含量; 减少了茎 Cd 积累量和植株全 Cd 量。“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理还减少了 2 个番茄品种果实的 Cd 积累量, 降幅分别为 42.9% 和 43.7%。供试 2 个番茄品种, 以“洛贝琪”对 Cd 的耐性和抗性较强, 果实 Cd 含量和积累量及植株 Cd 总积累量则以“洛贝琪” < “德福 mm-8”。

关键词: 黑麦草-丛枝菌根; 抗氧化酶; 镉积累; 镉形态; 番茄品种

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2349-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.043

Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato

JIANG Ling¹, YANG Yun¹, XU Wei-hong¹, WANG Chong-li¹, CHEN Rong¹, XIONG Shi-juan¹, XIE Wen-wen¹, ZHANG Jin-zhong¹, XIONG Zhi-ting², WANG Zheng-yin¹, XIE De-ti¹

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

Abstract: Pot experiments were carried out to investigate the effects of ryegrass and arbuscular mycorrhiza on the plant growth, malondialdehyde (MDA), antioxidant enzyme activities of leaf and root, accumulation and chemical forms of cadmium (Cd) in two varieties of tomato when exposed to Cd (20 mg·kg⁻¹). The results showed that dry weights of fruit and plant, and contents of malondialdehyde (MDA) and antioxidant enzyme activities of leaf and root, and concentrations and accumulations of Cd significantly differed between two varieties of tomato. Dry weights of fruit, roots, stem, leaf and plant were increased by single or combined remediation of ryegrass and arbuscular mycorrhiza, while MDA contents and antioxidant enzyme activities of leaf and root reduced. The total extractable Cd, F_E , F_W , F_{NaCl} , F_{HAc} , F_{HCl} , and F_R in fruit of two varieties of tomato reduced by 19.4% - 52.4%, 31.0% - 75.2%, 19.7% - 59.1%, 3.1% - 48.2%, 20.0% - 65.0%, 40.7% - 100.0% and 15.2% - 50.0%, respectively. Cadmium accumulations in tomato were in the order of leaf > stem > fruit > root. Cadmium concentrations in leaf, stem, root and fruit of both varieties decreased by single or combined remediation of ryegrass and arbuscular mycorrhiza, and Cd accumulations of stem and plant of two varieties also reduced. Cd accumulations in fruit of two varieties decreased by 42.9% and 43.7% in the combined remediation treatments, respectively. Tolerance and resistance of ‘LUO BEI QI’ on Cd was more than ‘De Fu mm-8’, and Cd concentrations and Cd accumulations in fruit and plant were in the order of ‘LUO BEI QI’ < ‘De Fu mm-8’ in the presence or absence of single or combined remediation of ryegrass and arbuscular mycorrhiza.

Key words: ryegrass and arbuscular mycorrhiza; antioxidant enzyme; accumulation of cadmium; chemical forms of cadmium; varieties of tomato

收稿日期: 2013-10-02; 修订日期: 2013-11-29

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-25-C-05); 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: 江玲 (1987 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属植物修复技术, E-mail: jiangling1112@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xuwei_hong@163.com

镉(Cd)被列为首位土壤重金属污染物^[1,2]。广泛应用于电镀工业、化工、电子业和核工业等领域^[3]。其“三废”的排放,以及污泥污灌、城市垃圾等使得土壤Cd污染日趋加重^[4]。我国Cd污染耕地达1 133万hm²,郊区菜园土壤、蔬菜Cd污染的问题在我国大中城市均存在^[5]。作物根系吸收的Cd易向可食部位迁移,而后通过食物链进入人体内富集,危害人类健康^[6]。由于Cd污染具有隐蔽性、潜伏性、长期性和不可逆性,土壤Cd污染的治理和修复一直是国内外土壤学、环境科学等领域研究的难点和热点^[7]。传统的治理方法如淋滤法、客土法、吸附固定法等物理方法以及络合浸提法等化学方法,投资昂贵,需用复杂设备条件或打乱土层结构,且可能带来二次污染^[8,9]。自从1983年美国科学家Chaney等首次提出运用植物去除土壤中重金属污染物的设想(即植物修复)以来,人们逐渐将重金属污染治理的研究重点转向了植物修复技术^[9]。但重金属富集植物,尤其是超积累植物生长速度较慢,生物量较小,因此,修复速度较慢。此外,植物修复的效果还受到土壤类型、温度、湿度、营养等环境条件的制约。土壤污染的微生物修复是利用对有毒重金属离子有抗性的微生物来改变和转化金属离子形态。近几年,重金属污染土壤的植物-微生物联合修复作为一种强化植物修复技术逐渐成为国内外研究的热点。

黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)为一年生或多年生草本植物,是禾本科中产量较高的一种牧草。有研究报道,黑麦草对土壤重金属具有较强的富集作用,同时建植速度快、分蘖力强,能够迅速覆盖地面,可作为土壤重金属修复植物^[10]。丛枝菌根是植物根系与丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza, AM)真菌形成的一种共生体,广泛存在于包括重金属污染土壤的各种生境中,且可以影响宿主植物对重金属的吸收、积累、转移^[11]。有报道显示AM真菌侵染能够降低植株地上部重金属浓度^[12,13],从而提高植物对重金属元素毒害的抗性。但由于菌根真菌是物质从土壤进入植物体内的重要通道之一,因此,也有报道显示,AM真菌促进某些植物的根对Cu、Zn、Cd的吸收。

Cd具有较高的生物有效性,易在蔬菜中积累^[14]。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^[15~17]。番茄是人们喜食的一种茄果类蔬菜。有研究表明番茄对Cd耐性和吸收富集存在基因型差

异^[18]。这为筛选低Cd积累番茄品种提供了依据。目前,有关植物-微生物对Cd污染土壤的蔬菜吸收影响的报道较少。土壤接种菌根真菌促进黑麦草等重金属超积累植物或重金属富集植物体内重金属元素浓度的效应能否同时表现在降低蔬菜重金属吸收量方面?为此,本研究选取了重庆地区2个主栽番茄品种,采用盆栽试验模拟Cd污染的土壤条件,分析黑麦草-丛枝菌根真菌对不同番茄品种生长、生理特性、Cd的积累及化学形态的影响,以期为蔬菜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

供试植物为番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)和黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)。番茄品种为德福mm-8和洛贝琪,由重庆市农林科学院提供。供试丛枝菌根(arbuscular mycorrhiza)真菌分别为摩西球囊霉、幼套球囊霉、根内球囊霉,由北京市农林科学院营养与资源研究所提供。供试土壤采自重庆市九龙坡区含谷蔬菜基地。土壤全N和有机质分别为2.618和36.54 g·kg⁻¹,有效N、有效P和速效K分别为104.0、13.1和101.3 mg·kg⁻¹,pH为6.03,CEC为19.2 cmol·kg⁻¹,土壤Cd<0.005 mg·kg⁻¹。

1.2 试验方法

盆栽试验于2013-02-27~2013-06-26在西南大学资源环境学院玻璃温室内进行。试验供设置4个处理,分别为“Cd”(对照)、“Cd+黑麦草”(在番茄幼苗移栽15 d后在其周围播黑麦草种子,40粒·钵⁻¹)、“Cd+丛枝菌根”(3种菌根各15 g共45 g)、“Cd+黑麦草+丛枝菌根”。模拟土壤Cd污染的浓度为20 mg·kg⁻¹。将5 kg过5 mm筛的风干土装入塑料盆内(直径×高=25 cm×17 cm),加入20 mg·kg⁻¹的CdCl₂溶液并混匀,平衡2~3周后,进行番茄幼苗移栽,每钵1株。底肥P、K分别为100和150 mg·kg⁻¹,以NH₄H₂PO₄和KCl的形式加入,N为180 mg·kg⁻¹,以NH₄H₂PO₄和尿素的形式加入。试验所用的药品、肥料均采用分析纯。每个处理设置4次重复,每个处理4盆,随机排列。培养期间土壤水分含量保持为田间最大持水量的60%。浇水前用土壤水分速测仪测定土壤的含水率,3次测量取平均值,然后计算所需的补水量,采用去离子水按所需水量补水。从2013年5月27日开始采摘番茄红果,每次采摘均记录产量,于6月26日全部收获。植株在105℃下杀青15 min,在

60℃下烘干至恒重。

1.3 测定方法

土壤基本理化性质采用常规方法测定^[19]。土样经 HCl-HNO₃-HClO₄ 消解后,用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000,Norwalk, USA)测定土壤 Cd 含量。番茄叶和根过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾滴定法测定^[20];过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定^[21];超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)还原法测定^[21];丙二醛(MDA)采用硫代巴比妥酸(TBA)比色法^[21]。将烘干植株样品在研钵中研碎,经 HNO₃-HClO₄ 法消煮,用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000,Norwalk,USA)测定不同部位 Cd 含量,镉的检测限为 0.005 mg·kg⁻¹。

番茄果实中各 Cd 形态分级采用连续浸取法浸取 Cd^[22]。在 2013 年 6 月 26 日番茄全部收获后,选取完全成熟果实,采用四分法取样并切碎。准确称取 4.000 g 果实鲜样,置于烧杯中,加入 37.5 mL 提取剂,使样品保持浸透状态,并在 30℃ 恒温箱中放置过夜(约 17~18 h),次日回收提取液,再加入同体积的同样提取液,浸取 2 h 后再回收提取液,重复 2 次,即在 24 h 内提取 4 次。将 4 次提取液(共 150 mL)混合,经电热板蒸至近干后,加入适量 HNO₃-HClO₄ 混合酸(4:1,体积比)消煮澄清后用 10% 盐酸定容到 50 mL 的容量瓶中,然后用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000,Norwalk,USA)测

定 Cd 的含量,镉的检测限为 0.005 mg·kg⁻¹。提取剂及提取顺序为 80% 乙醇(*F_E*,提取硝酸盐、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、重金属一代铁酸盐)、1 mol·L⁻¹氯化钠溶液(*F_{NaCl}*,提取果胶盐,与蛋白质结合态或呈吸着态的重金属)、2% 醋酸(*F_{HAc}*,难溶性重金属铁酸盐,包括二代铁酸盐)、0.6 mol·L⁻¹盐酸(*F_{HCl}*,提取草酸盐)。

本研究所列结果为 3 次重复的测定值,数据采用 SPSS 18.0 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 可知,番茄果实、茎及总干重在各处理间和 2 个品种间的差异达到了显著水平。与对照相比较,在重金属 Cd 污染(20 mg·kg⁻¹)下,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”显著提高了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干重,增幅分别为 17.6%~91.4% 和 64.2%~76.8%、10.9%~84.2% 和 4.2%~65.1%、13.7%~72.3% 和 4.3%~57.0%、32.9%~42.4% 和 4.4%~40.0%、25.3%~236.3% 和 17.9%~150.3%。2 个番茄品种果实、根、茎、叶及总干重均以“Cd + 丛枝菌根”处理最高。比较供试的 2 个番茄品种的果实干重及植株总干重,各处理均为“洛贝琪”>“德福 mm-8”。

表 1 不同处理对番茄生长的影响

处理	植株干重/g·钵 ⁻¹									
	果实		根		茎		叶		总干重	
	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪
Cd	12.29	14.91	2.02	2.38	23.80	25.51	10.58	11.80	48.59	55.60
Cd + 黑麦草	14.45	24.48	2.24	2.48	30.11	26.61	14.06	12.32	60.86	65.54
Cd + 丛枝菌根	23.52	25.44	3.72	3.93	27.07	29.05	15.07	14.73	70.38	74.15
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	15.48	17.98	2.96	3.42	26.69	27.79	12.19	13.40	58.04	61.61
LSD _{0.05}										
品种	0.941		0.850		0.673		0.413		2.982	
处理	1.032		0.192		0.298		0.752		3.461	
品种 × 处理	0.648		0.374		0.425		0.547		2.734	

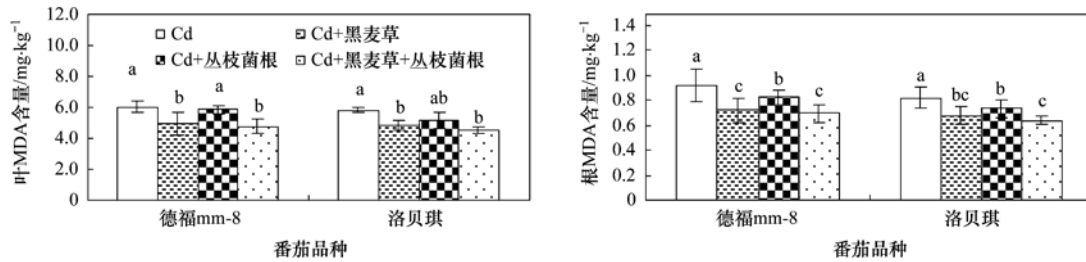
2.2 丙二醛

丙二醛(MDA)作为生物在逆境条件下膜脂过氧化的终产物,其含量可以指示植物体内脂类过氧化作用的程度,逆境胁迫下植物的抗性通常与其体内 MDA 含量呈负相关^[23]。由图 1 可见,与 Cd 处理(对照)比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均降低了 2

个品种番茄叶片及根部的 MDA 含量,其中,降幅最大的是“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理,分别减少了 20.8%、22.0% 和 22.2%、24.4%;其次是“Cd + 黑麦草”处理,分别减少了 17.1%、17.4% 和 17.4%、21.6%;“Cd + 丛枝菌根”处理,较对照分别减少了 2.6%、11.8% 和 9.8%、10.6%。番茄

叶的 MDA 含量在 2 个品种之间差异不显著,各处理

以“洛贝琪”根的 MDA 含量略低于“德福 mm-8”。



图中小写字母为同一品种不同处理之间差异显著达 0.05% 的显著水平 ($P < 0.05$), 下同

图 1 不同处理对番茄叶和根 MDA 含量的影响

Fig. 1 Influence of different treatments on contents of MDA in leaf and roots of tomato

2.3 抗氧化酶

生物代谢产生的自由基对生物膜有伤害作用,而植物体内的 CAT、SOD、POD 抗氧化酶对逆境诱导产生的活性氧清除相关,逆境中它们将组成植物体内活性氧清除剂系统,有效清除植物体内的自由基和过氧化物^[10]。由图 2~图 4 可见,与对照相比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”处理的叶片和根部

CAT、SOD、POD 活性都有所下降,其中最为明显的是处理“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”,其次是处理“Cd + 黑麦草”,最后是处理“Cd + 丛枝菌根”。番茄叶和根部 CAT、根 SOD 在 2 个品种之间差异不显著,但番茄叶片 SOD、叶和根的 POD 活性在 2 个品种间差异性显著,且各处理均为“洛贝琪”叶和根的 SOD 和 POD 含量明显高于“德福 mm-8”。

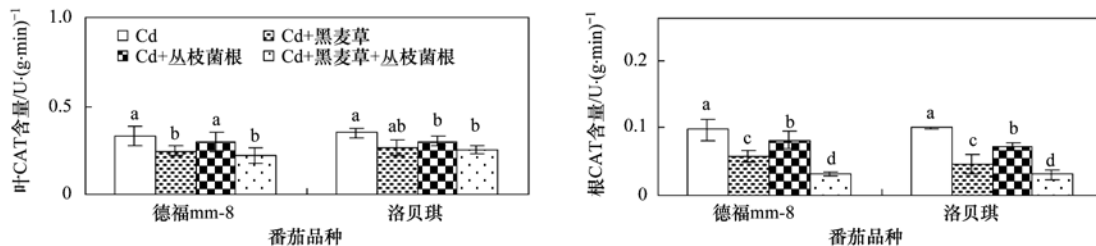


图 2 不同处理对番茄叶和根 CAT 活性的影响

Fig. 2 Influence of different treatments on activities of CAT in leaf and roots of tomato

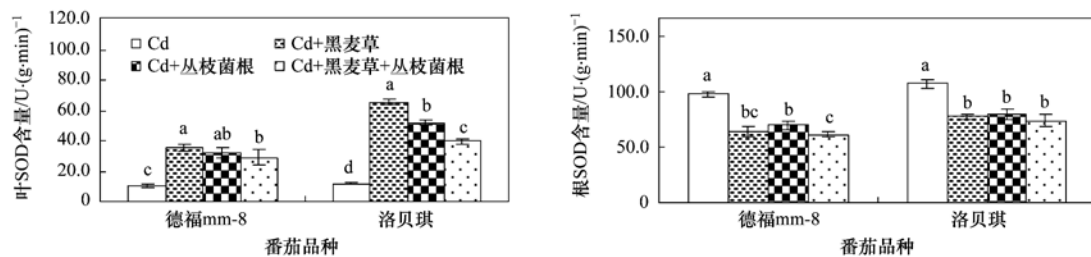


图 3 不同处理对番茄叶和根 SOD 活性的影响

Fig. 3 Influence of different treatments on activities of SOD in leaf and roots of tomato

2.4 果实 Cd 形态

由表 2 可知,番茄果实中 Cd 的总提取量及各形态 Cd 含量在 2 个品种间、不同处理间差异达到显著水平(除 F_{HAc} 外)。番茄果实中各形态 Cd 含量大小顺序为 $F_{\text{NaCl}} > F_{\text{R}} > F_{\text{W}} > F_{\text{E}} > F_{\text{HCl}} > F_{\text{HAc}}$ 。其中,番茄果实 F_{NaCl} 含量为 $1.435 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.288 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $1.362 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,所占 Cd 提取总量的比例为 52.9% 和 51.6%,平均为 52.3%;其次

是活性偏低的 F_{R} 含量为 $0.426 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.452 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均含量为 $0.439 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的比例为 15.7% 和 18.1%,平均为 16.9% (表 2)。活性较高的 F_{W} 和 F_{E} 含量为各形态 Cd 最小或次低。其中, F_{W} 的含量分别为 $0.349 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.316 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.333 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的比例为 12.9% 和 12.7%,平均为 12.8%; F_{E} 的含量分别为 $0.082 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.065 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平

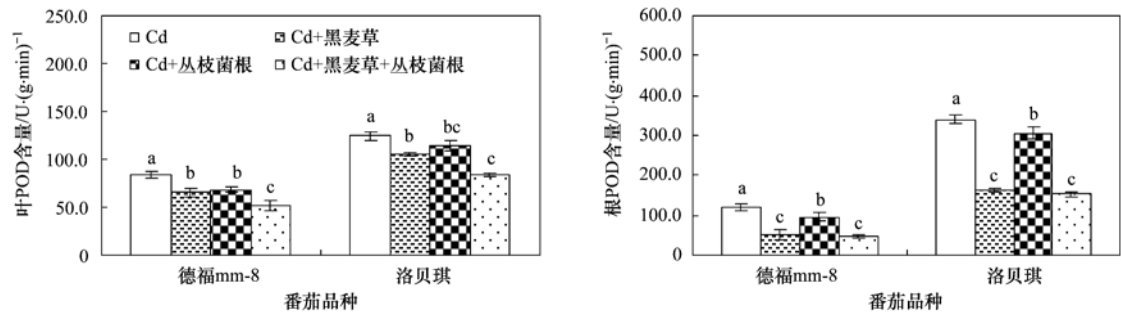


图 4 不同处理对番茄叶和根 POD 活性的影响

Fig. 4 Influence of different treatments on activities of POD in leaf and roots of tomato

均为 $0.074\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 Cd 提取总量的比例分别为 3.0% 和 2.6%, 平均为 2.8% (表 2). 与对照相比较, “Cd + 黑麦草或丛枝菌根” 处理减少了番茄果实中 F_E 、 F_W 、 F_{NaCl} 、 F_{HAc} 、 F_{HCl} 和 F_R 各形态 Cd 含量和 Cd 总提取量, 降幅分别为 31.0% ~ 75.2%、19.7% ~ 59.1%、3.1% ~ 48.2%、20.0% ~ 65.0%、40.7% ~ 100.0%、15.2% ~ 50.0% 和 19.4% ~ 52.4%. 除“德福 mm-8”的 F_{HAc} 和 F_R 外, 各处理以“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”的番茄果实各种 Cd 形态降幅最大, 其次是“Cd + 丛枝菌根”. 比较 2 个番茄品种果实的 Cd 总提取量, 各处理以“德福 mm-8” > “洛贝琪”.

表 2 不同处理对番茄果实 Cd 形态含量的影响¹⁾/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Table 2 Effects of different treatments on chemical forms of Cd in tomato/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

处理	F_E		F_W		F_{NaCl}		F_{HAc}		F_{HCl}		F_R		总提取量	
	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪
Cd	0.141	0.116	0.127	0.101	0.421	0.425	0.030	0.020	0.035	0.027	0.128	0.132	0.882	0.823
Cd + 黑麦草	0.096	0.079	0.102	0.071	0.408	0.329	0.012	0.016	0.018	0.016	0.074	0.112	0.711	0.623
Cd + 丛枝菌根	0.062	0.060	0.068	0.062	0.308	0.277	0.020	0.014	0.016	0.012	0.074	0.067	0.548	0.492
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	0.035	0.050	0.052	0.049	0.257	0.220	0.020	0.007	<0.005	<0.005	0.095	0.066	0.459	0.392
LSD _{0.05}														
品种	0.032		0.004		0.003		0.004		0.002		0.006		0.056	
处理	0.009		0.011		0.002		0.003		0.001		0.001		0.068	
品种 × 处理	0.0116		0.006		0.005		0.001		0.001		0.003		0.072	

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 Cd

2.5 植株 Cd 含量及积累量

由表 3 可见, 番茄各部位 Cd 含量和积累量在 2 个品种间和不同处理间的差异均达到显著水平. 番茄各部位 Cd 含量的大小顺序为叶 > 根 > 茎 > 果实. 与对照相比较, “Cd + 黑麦草或丛枝菌根” 处理使番茄果实、叶、茎和根中的 Cd 含量不同程度降低, Cd 含量降低幅度分别为 17.5% ~ 47.1% 和 28.4% ~ 50.2%、18.5% ~ 36.7% 和 9.4% ~ 31.7%、15.2% ~ 48.0% 和 13.5% ~ 67.5%、27.0% ~ 51.9% 和 20.6% ~ 46.9%. 番茄叶、茎、根和果实 Cd 含量均“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理降幅最大, 其次是“Cd + 丛枝菌根”处理. 2 个番茄品种根 Cd 含量以“洛贝琪” > “德福 mm-8”, 果实 Cd 含量以“德福 mm-8” > “洛贝琪”.

番茄植株各部位 Cd 积累量的大小顺序为叶 > 茎 > 果实 > 根. 其中, 叶、茎积累量分别为植株 Cd

总积累量的 57.1% 和 33.4%, 果实 Cd 积累量仅为植株 Cd 总积累量的 5.2%. 与对照相比较, “Cd + 黑麦草或丛枝菌根” 处理降低了茎 Cd 积累量和植株 Cd 全量, 降幅分别为 4.7% ~ 48.2% 和 23.3% ~ 62.1%、4.0% ~ 39.5% 和 7.6% ~ 41.4%. “Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根” 处理减少了 2 个品种果实 Cd 的积累量, 降幅分别为 42.9% 和 43.7%. “Cd + 黑麦草” 处理降低了“德福 mm-8” 果实 Cd 积累量 (16.7%), 但增加了“洛贝琪” 果实 Cd 积累量 (37.0%); “Cd + 丛枝菌根” 处理减少了“洛贝琪” 果实 Cd 积累量 (10.9%), 但增加了“德福 mm-8” 果实 Cd 积累量 (0.8%). 综合考虑 Cd 含量和积累量, “Cd + 黑麦草或丛枝菌根” 降低番茄果实 Cd 积累量及植株全 Cd 含量的作用大小以“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根” > “Cd + 丛枝菌根” > “Cd + 黑麦草”. 除“Cd + 黑麦草” 处理外, 2 个品种果实 Cd 积累量

表 3 不同处理对番茄果实 Cd 积累的影响

Table 3 Effects of different treatments on accumulation of Cd in tomato

处理	Cd 含量/mg·kg ⁻¹						Cd 积累量/mg·株 ⁻¹						Cd 全量 /mg·株 ⁻¹				
	果实		叶		茎		根		果实		叶				茎		
	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	
Cd	8.79	7.97	117.63	107.85	35.75	42.58	40.37	48.99	0.126	0.119	1.362	1.165	0.958	1.086	0.117	2.53	2.49
Cd + 黑麦草	7.25	5.71	95.85	97.70	30.31	36.84	29.49	38.91	0.105	0.163	1.348	1.204	0.913	0.833	0.097	2.43	2.30
Cd + 丛枝菌根	5.42	4.95	80.25	82.11	20.78	15.14	27.98	35.21	0.127	0.106	1.530	1.127	0.563	0.501	0.138	2.32	1.87
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	4.65	3.97	74.46	73.68	18.57	13.82	19.42	26.03	0.072	0.067	0.908	0.914	0.496	0.412	0.063	1.53	1.46
LSD _{0.05}																	
品种	0.65		0.83		2.50		1.42		0.005		0.007		0.041		0.023		0.110
处理	0.87		2.79		1.61		1.13		0.024		0.033		0.036		0.017		0.062
品种 × 处理	1.53		1.71		1.97		0.92		0.017		0.022		0.037		0.011		0.087

及植株全 Cd 含量“德福 mm-8” > “洛贝琪”。

3 讨论

本试验条件下,在 Cd 污染土壤上 ($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”的其余处理显著提高了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干重。说明黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复均能缓解 Cd 对番茄生长的抑制。2 个番茄品种果实、根、茎、叶及总干重均以“Cd + 丛枝菌根”处理最高,尤其是 2 个品种番茄的根的干重明显高于其他处理。该结果与前人^[12, 13]报道相似。原因可能是因为在 Cd 污染土壤接种枝菌根后,使得土壤内微生物种类增多或增加了土壤中微生物的活性,进而使土壤环境更加适宜番茄的生长。同时,接种菌根菌强化了菌根对植物根系的感染能力,形成互惠互利的共生体^[24],反而抑制了 Cd 对番茄生长的毒害效应。该试验还发现 2 个番茄品种各处理以“洛贝琪”果实干重及植株总干重显著大于“德福 mm-8”。说明 2 个番茄品种由于基因型不同对 Cd 污染的耐性存在显著性差异,这与张薇等^[25]和赵首萍等^[26]的研究是一致的。

细胞膜作为植物调节和控制细胞内外物质运输和交换的重要结构,其透性是评价植物对污染物反应的常用指标之一^[4, 16, 27]。MDA 是膜脂过氧化的重要产物,可与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,形成不溶性的化合物(脂褐素)沉积,干扰细胞的正常生命活动^[4, 28]。植物细胞膜系统是植物细胞和外界环境进行物质交换和信息交流的界面和屏障,其稳定性是细胞进行正常生理功能的基础^[4, 16, 27]。本试验中,在 Cd 污染土壤上 ($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),与 Cd 处理(对照)比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均降低了 2 个番茄品种叶片及根部的 MDA 含量,说明黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复都具有缓解由于 Cd 胁迫对番茄造成的危害。该结果与肖家欣等^[29]报道丛枝菌根中的根内球囊酶和幼套球囊酶会降低作物中 MDA 的含量相似。而“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”降低番茄叶片及根部的 MDA 含量与番茄产量的增加是相呼应的。

重金属污染会导致植物体内产生大量活性氧自由基,引起蛋白质和核酸等生物活性物质变性、膜质过氧化,由超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化氢酶(CAT)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引起的氧化胁迫伤害^[7, 10, 30]。在本试验中,与对照相比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌

根”处理的叶片和根部 CAT、SOD、POD 活性都有所下降,其中最为明显的是处理“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”,其次是处理“Cd + 黑麦草”。表明黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复能降低植物体内活性氧自由基,从而导致清除自由基酶含量下降以期恢复正常活性水平^[4]。番茄叶片 SOD、叶和根的 POD 活性在 2 个品种间差异性显著,且各处理均以“洛贝琪”根和叶的 SOD 和 POD 含量明显高于“德福 mm-8”。该结果与张薇等^[25]的研究不同基因型的番茄叶片的 CAT、SOD、POD 酶对镉胁迫的敏感程度有所差异相似。本试验中叶、根的抗氧化酶活性变化与 2 个番茄品种的产量变化也表现出一致性。

本试验发现,Cd 在番茄果实中主要以 F_{NaCl} 存在,平均为 $1.362 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,所占 Cd 提取总量的比例为 52.3% (表 2)。与早前报道重金属在植物体内的化学形态一般以氯化钠态为主的结果一致^[16]。这主要是因为 Cd 对蛋白质或其它有机化合物中巯基有很强的亲和力,因此在作物体内,Cd 常与蛋白质相结合^[4]。活性较高的 F_{W} 和 F_{E} 平均含量之和为 $0.407 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,占 Cd 提取总量的比例仅为 15.6%,从而极大地限制了 Cd 的毒害效应。本试验条件下,与对照相比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”处理减少了番茄果实中 F_{E} 、 F_{W} 、 F_{NaCl} 、 F_{HAc} 、 F_{HCl} 和 F_{R} 各形态 Cd 含量。可见,黑麦草和丛枝菌根单一或联合作用均表现对土壤重金属 Cd 污染良好的修复能力。该结果与杜善周等^[24]和王发园等^[31]的报道一致。

供试的 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(表 3),可见番茄对 Cd 的转移能力较强。此结果与朱芳等^[18]研究显示的番茄 Cd 主要集中在根部有所不同。本试验中,番茄果实干样中 Cd 含量 $> 3.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,除以番茄果实的水分系数(平均为 16.5),番茄果实鲜样中 Cd 含量 $> 0.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,远远高于国家对蔬菜和水果的 Cd 限量标准(以 FW 计, $\leq 0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),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。显示在 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。“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”处理降低了茎 Cd 积累量和植株 Cd 全量,“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理还减少了 2 个品种果实 Cd 的积累量。原因可能是黑麦草根与番茄根部竞争吸收运输重金属 Cd 可能降低了 Cd 离子在番茄体内的浓度,丛枝菌根可能改变了 Cd 离子在根部吸收运输的位点从而降低了 Cd

离子向植物体内的木质部长距离输送,使果实中 Cd 含量相对较少.也可能是因为丛枝菌根真菌均降低植物地上部重金属浓度,提高根对重金属的吸收,抑制重金属向地上部转运,认为重金属可与菌根中含有真菌蛋白配体的半胱氨酸形成复合体而滞留在根中^[31]. 试验也发现“Cd + 黑麦草”处理降低了“德福 mm-8”果实 Cd 积累量,但增加了“洛贝琪”果实 Cd 积累量;“Cd + 丛枝菌根”处理减少了“洛贝琪”果实 Cd 积累量,但增加了“德福 mm-8”果实 Cd 积累量.究其原因还有待进一步研究. 比较 2 个番茄品种,各处理果实 Cd 积累量及植株全 Cd 含量一般以“德福 mm-8” > “洛贝琪”. 由此可见,供试 2 个番茄品种无论是生物量、抗氧化酶活性、丙二醛含量还是果实 Cd 总提取量、各部位 Cd 含量及积累量,在 2 个品种间和不同处理间的差异均达到显著性水平. 该结果进一步应证了番茄对 Cd 耐性和吸收富集存在基因型差异^[18].

4 结论

(1)在重金属 Cd 污染($20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Cd}$)下,黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复均有利于缓解 Cd 对番茄生长的抑制. 供试 2 个番茄品种以“洛贝琪”对 Cd 的耐性更强.

(2)黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复可降低 2 个品种番茄叶和根的 MDA 含量, CAT、SOD、POD 活性,减少由于 Cd 胁迫诱导产生的活性氧、植物体内脂类过氧化作用对植株造成的伤害.

(3)番茄果实中的 Cd 主要以氯化钠提取态(F_{NaCl})和活性偏低的残渣态 Cd(F_{R})形式存在,占 Cd 提取总量的 69.2%,活性较高的 F_{W} 和 F_{E} 仅占 Cd 提取总量的 15.6%. 番茄果实中各形态 Cd 含量大小顺为 $F_{\text{NaCl}} > F_{\text{R}} > F_{\text{W}} > F_{\text{E}} > F_{\text{HCl}} > F_{\text{HAc}}$. 黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复减少了 2 个番茄品种果实中各形态 Cd 含量.

(4)番茄 Cd 主要积累在叶和茎,果实和根积累较少. 黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复使番茄果实、叶、茎和根中的 Cd 含量不同程度降低. 就番茄产量而言,“Cd + 丛枝菌根”处理最佳,如综合考虑番茄产量、Cd 含量及积累量,以“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理最好.

(5)番茄对 Cd 耐性和对 Cd 的吸收富集存在基因型差异. 因此,在 Cd 污染较重的地区,选择“洛贝琪”为栽培品种可有效降低番茄果实产品遭受 Cd 污染的风险. 由于本试验仅用了 2 个番茄品种,且

盆栽试验又具有一定的局限性,因此,黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复土壤 Cd 污染的效果还有待更深入地研究以及在田间进行验证.

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Radotić K, Dučić T, Mutavdžić D. Changes in peroxidase activity and isoenzymes in spruce needles after exposure to different concentrations of cadmium [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2000, **44**(2): 105-113.
- [4] 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.
- [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] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. *中国生态农业学报*, 2008, **16**(5): 1317-1321.
- [7] 张海波, 李仰锐, 徐卫红, 等. 有机酸、EDTA 对不同水稻品种 Cd 吸收及土壤 Cd 形态的影响[J]. *环境科学*, 2011, **32**(9): 2625-2631.
- [8] 刘吉振, 徐卫红, 王慧先, 等. 硅对不同辣椒品种生理特性、镉积累及化学形态的影响[J]. *中国蔬菜*, 2011, (10): 69-75.
- [9] Hoang Ha N T, Sakakibara M, Sano S, *et al.* The Potential of *Eleocharis acicularis* for phytoremediation: Case study at an abandoned mine site [J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2009, **37**(3): 203-208.
- [10] 徐卫红, 王宏信, 刘怀, 等. Zn、Cd 单一及复合污染对黑麦草根分泌物及根际 Zn、Cd 形态的影响[J]. *环境科学*, 2007, **28**(9): 2089-2095.
- [11] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001.
- [12] 杨秀梅, 陈保冬, 朱永官, 等. 丛枝菌根真菌 (*Glomus intraradices*) 对铜污染土壤上玉米生长的影响[J]. *生态学报*, 2008, **28**(3): 1052-1058.
- [13] 刘茵, 孔凡美, 冯固, 等. 丛枝菌根真菌对紫茅镉吸收与分配的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(6): 1122-1127.
- [14] 张金彪, 黄维南. 镉胁迫对草莓光合的影响[J]. *应用生态学报*, 2007, **18**(7): 1673-1676.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 朱芳, 方伟, 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.
- [19] Cheng S F, Huang C Y. Accumulation of cadmium uptake from soil in the edible root of root vegetables [J]. Journal of Environmental Engineering and Management, 2007, **17**(2): 137-142.
- [20] 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, 2001. 165-167.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] He Z Q, He C X, Zhang Z B, *et al.* Changes of antioxidative enzymes and cell membrane osmosis in tomato colonized by arbuscular mycorrhizae under NaCl stress [J]. Colloids and Surfaces B; Biointerfaces, 2007, **59**(2): 128-133.
- [24] 杜善周, 毕银丽, 吴王燕, 等. 丛枝菌根对矿区环境修复的生态效应[J]. 农业工程学报, 2008, **24**(4): 113-116.
- [25] 张薇, 吕金印, 柳玲. 不同基因型番茄幼苗对镉胁迫的生理响应及镉吸收差异[J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(6): 1065-1071.
- [26] 赵首萍, 张永志, 于国光, 等. Cd 胁迫对 2 种基因型番茄幼苗活性氧清除系统的影响[J]. 中国农学通报, 2011, **27**(19): 166-171.
- [27] 王兴明, 涂俊芳, 李 晶, 等. 镉处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2006, **17**(1): 102-106.
- [28] 王友保, 刘登义. 污灌对作物生长及其活性氧清除系统的影响[J]. 环境科学学报, 2003, **23**(4): 555-557.
- [29] 肖家欣, 安静, 杨安娜, 等. 五种丛枝菌根真菌对白三叶耐铜污染的影响[J]. 中国草地学报, 2011, **33**(6): 57-63.
- [30] 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 & Environment, 2006, **29**(8): 1532-1544.
- [31] 王发园, 林先贵. 丛枝菌根在植物修复重金属污染土壤中的作用[J]. 生态学报, 2007, **27**(2): 793-801.

CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Frex	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2014年6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 15, 2014

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

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行