

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第12期

Vol.36 No.12

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(卷终)

2014年APEC前后北京城区PM _{2.5} 中水溶性离子特征分析	杨懂艳,刘保献,张大伟,石爱军,周健楠,景宽,富佳明	(4325)
2013年北京市不同方位PM _{2.5} 背景浓度研究	李云婷,程念亮,张大伟,孙瑞雯,董欣,孙乃迪,陈晨	(4331)
APEC期间北京空气质量改善对比分析	李文涛,高庆先,刘俊蓉,李亮,高文康,苏布达	(4340)
嘉兴市春季PM ₁₀ 、主要污染气体和气溶胶粒径分布的周末效应	沈利娟,王红磊,吕升,李莉,张孝寒,章国骏,王翥	(4348)
烟花燃放对珠三角地区春节期间空气质量的影响	赵伟,范绍佳,谢文彰,孙家仁	(4358)
典型钢铁行业汞排放特征及质量平衡	张雅惠,张成,王定勇,罗程钟,杨熹,徐凤	(4366)
上海市公园绿地树叶对大气重金属污染的磁学响应	刘飞,褚慧敏,郑祥民	(4374)
重庆金佛山降雪中飞灰单颗粒特征及来源解析	于正良,杨平恒,景伟力,袁道先,任坤,李林立	(4381)
利用新型组合填料的生物滴滤塔净化混合废气研究	梅瑜,成卓韦,王家德,陆胤	(4389)
低浓度CO ₂ 在聚苯胺/Y分子筛复合材料上的吸附	刘凤玲,卢霞,张慧,葛鑫,刘杰,张泳真	(4396)
红壤丘陵区冬季大气湿沉降化学特征及森林冠层对其截留作用机制	郝卓,高扬,张进忠,于贵瑞	(4403)
中亚热带常绿阔叶林湿沉降过程中盐基离子变化特征	安思危,孙涛,马明,王定勇	(4414)
基于Landsat 8影像估算新安江水库光合有效辐射衰减系数	张毅博,张运林,查勇,施坤,周永强,刘明亮	(4420)
白石水库颗粒有机物及沉积物中碳、氮稳定同位素的空间分布特征	郭凯,赵文,王珊,戴玉新,张荣坤,李东明	(4430)
小关水库夏季浮游植物功能群对富营养化特征的响应	李磊,李秋华,焦树林,李钥,肖晶,邓龙,孙荣国,高永春,骆兰	(4436)
湖泊基质客土改良的环境效应:对芦苇生长及光合荧光特性的影响	余居华,钟继承,范成新,黄蔚,商景阁,古小治	(4444)
贵州纳朵洞洞穴水水文地球化学变化特征及其环境意义	沈蔚,王建力,王家录,蒋先淑,毛庆亚,陈挚秋,刘肖	(4455)
碧水岩地下河中微量金属元素对降雨的响应特征及来源分析	邹艳娥,蒋萍萍,张强,汤庆佳,康志强,龚晓萍,陈长杰,俞建国	(4464)
钱塘江(杭州段)表层水中全氟化化合物的残留水平及分布特征	张明,唐访良,俞雅雯,徐建芬,李华,吴敏华,张伟,潘见阳	(4471)
长江中游沉积物中多溴联苯醚的污染特征及风险评价	田奇昌,唐洪波,夏丹,王莎莎,高丽荣	(4479)
城市地表水表层沉积物重金属污染特征与潜在生态风险评估:以永康市为例	齐鹏,余树全,张超,梁立成,车继鲁	(4486)
柠檬酸对三峡水库消落区土壤中汞活化及甲基化的影响	覃蔡清,梁丽,游蕊,邓晗,王定勇	(4494)
微生物对冰封期湖泊沉积物中有机磷降解释放的影响	左乐,吕昌伟,何江,王伟颖,颜道浩	(4501)
扰动和加藻共同作用下太湖沉积物中形态磷变化规律	陈俊,李大鹏,朱培颖,黄勇,王忍	(4509)
生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应	张树楠,肖润林,刘锋,吴金水	(4516)
开放系统下方解石对磷的去除	李振炫,刁家勇,黄利东,陈艳芳,刘大刚,许正文	(4523)
铜在壳核结构磁性颗粒上的吸附:效能与表面性质的关系	李秋梅,陈静,李海宁,张晓蕾,张高生	(4531)
基于优质碳源提供的CMBR复合工艺短程硝化-反硝化除磷研究	程继辉,吴鹏,程朝阳,沈耀良	(4539)
ANAMMOX菌利用零价铁转化氨和硝酸盐实验	周健,黄勇,袁怡,刘忻,李祥,沈杰,杨朋兵	(4546)
基于GIS的天津市饮用水水质健康风险评价	符刚,曾强,赵亮,张玥,冯宝佳,王睿,张磊,王洋,侯常春	(4553)
北京自备井水源内毒素污染及与其他水质参数的相关分析	张灿,刘文君,敖澍,史云,安代志,刘治平	(4561)
广州市小学生多环芳烃内暴露水平	苏慧,赵波,张素坤,刘珊,任明忠,李杰,石小霞	(4567)
构建三元混合污染物的三维等效图	刘雪,刘树深,刘海玲	(4574)
化学提取法表征污染土壤中PAHs老化规律和蚯蚓富集特征	张亚楠,杨兴伦,卞永荣,谷成刚,刘总堂,李娇,王代长,蒋新	(4582)
不同取样尺度下华北落叶松人工林土壤呼吸的空间变异性	严俊霞,梁雅南,李洪建,李君剑	(4591)
基于环境效应的土壤重金属临界负荷制图	施亚星,吴绍华,周生路,王春辉,陈浩	(4600)
土壤中铅锌的稳定化处理及机制研究	谢伟强,李小明,陈灿,陈寻峰,钟宇,钟振宇,万勇,王琰	(4609)
纳米氧化锌、硫酸锌和AM真菌对玉米生长的影响	李帅,刘雪琴,王发园,苗艳芳	(4615)
蜈蚣草中砷与砷的赋存特征及其相互作用	张玉秀,马旭,廖晓勇,阎秀兰,马栋,龚雪刚	(4623)
纳米沸石对土壤Cd形态及大白菜Cd吸收的影响	熊仕娟,徐卫红,谢文文,陈蓉,陈永勤,迟芬琳,陈序根,张进忠,熊治庭,王正银,谢德体	(4630)
黑麦草、丛枝菌根对番茄Cd吸收、土壤Cd形态的影响	陈永勤,江玲,徐卫红,迟芬琳,陈序根,谢文文,熊仕娟,张进忠,熊治庭	(4642)
耐盐类固醇激素降解菌交替赤杆菌MH-B5的降解特性、降解途径及其固定化	马聪,秦丹,孙倩,于昌平	(4651)
浙江省瓯江氨氧化古菌和氨氧化细菌分布及多样性特征	李虎,黄福义,苏建强,洪有为,俞慎	(4659)
缙云山马尾松林和柑橘林土壤微生物PLFA沿海拔梯度的变化	曾清苹,何丙辉,毛巧芝,吴耀鹏,黄祺,李源	(4667)
华北平原耕作土壤特性对基因工程菌迁移的影响	张静,刘平,刘春,陈晓轩,张磊	(4676)
再生铜冶炼过程多氯萘与二噁英类排放特征分析与控制技术评估	田亚静,姜晨,吴广龙,丁琼,王铁宇,吕永龙	(4682)
《环境科学》第36卷(2015年)总目录		(4690)
《环境科学》征订启事(4347)	《环境科学》征稿简则(4454)	信息(4463,4530,4573,4581)

黑麦草、丛枝菌根对番茄 Cd 吸收、土壤 Cd 形态的影响

陈永勤¹, 江玲¹, 徐卫红^{1*}, 迟荪琳¹, 陈序根¹, 谢文文¹, 熊仕娟¹, 张进忠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: 采用大田试验研究了在重金属 Cd ($5.943 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 污染下, 黑麦草和丛枝菌根对 2 个品种番茄 (“德福 mm-8” 和 “洛贝琪”) 生长、Cd 含量以及对土壤微生物、酶活性、pH 和 Cd 形态的影响。结果表明, 黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理显著提高了 2 个品种番茄果实、根、茎、叶和植株总干重, 增幅分别为 14.1% ~ 38.4% 和 4.2% ~ 18.3%、20.9% ~ 31.5% 和 8.4% ~ 10.3%、13.0% ~ 16.8% 和 3.0% ~ 9.5%、10.7% ~ 16.8% 和 2.7% ~ 7.6%、14.3% ~ 36.6% 和 4.5% ~ 16.8%。黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理增加了土壤中细菌、真菌、放线菌数量及土壤脲酶、转化酶、磷酸酶、过氧化氢酶活性, 且土壤微生物数量及土壤酶活性在不同品种和处理间的差异达到显著性水平 ($P < 0.05$)。与番茄套种黑麦草或接种丛枝菌根提高了土壤 pH 值, 降低了土壤中可交换态 (EXC-Cd)、碳酸盐态 (CAB-Cd) 和铁锰氧化态 (Fe-Mn-Cd) 和土壤中 Cd 总量, 土壤中 Cd 总量降幅为 16.9% ~ 27.8%。2 个番茄品种果实、叶、茎和根中的 Cd 含量分别显著下降了 6.9% ~ 40.9%、5.7% ~ 40.1%、4.6% ~ 34.7% 和 9.8% ~ 42.4%。Cd 主要积累在番茄的叶、根和茎中, 果实积累较少。比较供试的 2 个番茄品种, 果实 Cd 含量和积累量及植株 Cd 总积累量以 “洛贝琪” $<$ “德福 mm-8”。

关键词: 黑麦草; 丛枝菌根; Cd 吸收; 土壤 Cd 形态; 土壤微生物数量和酶活性; 番茄品种

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)12-4642-09 DOI: 10.13227/j.hjks.2015.12.041

Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil

CHEN Yong-qin¹, JIANG Ling¹, XU Wei-hong^{1*}, CHI Sun-lin¹, CHEN Xu-gen¹, XIE Wen-wen¹, XIONG Shi-juan¹, ZHANG Jin-zhong¹, XIONG Zhi-ting²

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

Abstract: Field trial was carried out to investigate the effects of ryegrass and arbuscular mycorrhizal single or compound treatment to two varieties of tomato (“Defu mm-8” and “Luobeiqi”) on the plant growth, concentrations and accumulations of Cd as well as the impact on microorganisms, enzyme activities, pH and Cd forms in soil when exposed to Cd ($5.943 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$). The results showed that dry weights of fruit, root, stem, leaf and plant significantly increased by single or compound treatment of ryegrass and arbuscular mycorrhizal by 14.1%-38.4% and 4.2%-18.3%, 20.9%-31.5% and 8.4%-10.3%, 13.0%-16.8% and 3.0%-9.5%, 10.7%-16.8% and 2.7%-7.6%, 14.3%-36.6% and 4.5%-16.8%, respectively. The amounts of bacteria, fungi, actinomycetes of soil and the activities of urease, invertase, acid phosphatase, catalase in soil were increased by single or compound treatment of ryegrass and arbuscular mycorrhizal, and the soil microorganism amounts and enzyme activities significantly differed between the two varieties of tomato and treatments ($P < 0.05$). Soil pH was increased by single or compound treatment of ryegrass and arbuscular mycorrhizal, while the concentrations of EXC-Cd, CAB-Cd, Fe-Mn-Cd and total Cd in soil were decreased, and the total Cd content was decreased by 16.9% - 27.8%. Cadmium concentrations in fruit, leaf, stem and root of both varieties were significantly decreased by 6.9% - 40.9%, 5.7% - 40.1%, 4.6% - 34.7% and 9.8% - 42.4%, respectively. Cadmium accumulations in tomato were in order of leaf > stem > root > fruit. Comparing the two tomato varieties, Cd concentrations and Cd accumulations in fruit and plant were in order of “Luobeiqi” < “Defu mm-8” in the presence or absence of single or compound treatment of ryegrass and arbuscular mycorrhizal.

Key words: ryegrass; arbuscular mycorrhizal; Cd absorption; soil Cd forms; soil microbial population and enzyme activities; varieties of tomatoes

镉 (cadmium, Cd) 在自然界中常以硫镉矿存在, 一般含量很低, 不会影响人体健康^[1]。土壤中 Cd 的背景值取值范围为 $0.01 \sim 2.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 平均值为 $0.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其主要取决于成土母质^[2]。但 Cd 因其在土壤中具有高度移动性和对作物的高度毒害性, 被视为生物毒性较大的重金属元素之一^[3]。Cd 被应用于电镀工业、化工业、电子业和核

工业等领域^[1]。随着采矿、电镀、冶金等工业活动

收稿日期: 2015-06-19; 修订日期: 2015-07-24

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (Nycytx-25); 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: 陈永勤 (1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为土壤重金属污染植物修复技术, E-mail: 15023159641@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xuwei_hong@163.com

产生的“三废”的排放,导致 Cd 流入生态环境中,使大面积农田土壤被 Cd 污染^[4~6]。Cd 是植物生长发育的非必要元素,但在 Cd 污染土壤上,作物能吸收一定量的 Cd,而 Cd 则可通过影响细胞质膜的透性影响部分营养元素的吸收和积累,导致果蔬中营养元素和成分的改变,通过食物链进入人体引起 Cd 的急性或慢性中毒^[7]。因此,土壤 Cd 污染的治理和修复已成为环境科学、生态学、土壤学、植物营养学等多门学科的国际研究热点和难点。

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^[8]。丛枝菌根是植物根系与丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal, AM)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^[9]。有报道显示 AM 真菌感染能够降低植株地上部重金属浓度^[10, 11],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 和 Cd 的吸收^[12]。

Cd 具有较高的生物有效性,易在蔬菜中积累^[13]。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^[14~16]。番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.)是人们喜食的一种茄果类蔬菜。前期研究显示番茄果实中可富集较多的 Cd,严重影响了番茄的食用安全。目前,有关微生物强化植物对土壤 Cd 污染修复的报道较少,且不统一^[10~12]。为此,本研究在前期土培试验基础上,探讨了在重度 Cd 污染的菜园土壤上黑麦草和丛枝菌根真菌单一或联合修复对番茄生长、Cd 含量及积累,及其对土壤微生物数量、酶活性、pH 和 Cd 形态的影响,考察土壤接种菌根真菌促进黑麦草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;同时还考察丛枝菌根真菌对黑麦草修复土壤 Cd 污染是否有强化的作用,以期为土壤 Cd 污染修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为番茄(*Lycopersicon esculentum* Mill.),品种为德福 mm-8 和洛贝琪,由重庆市农林

科学院提供。黑麦草(*Lolium multiflorum* L.)品种为邦德。供试丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal)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。供试土壤为酸性紫色土,土壤全 N 和有机质分别为 $1.19 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $27.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效 N、有效 P 和速效 K 分别为 145.9 、 16.52 和 $113.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 为 6.02,土壤 Cd 含量为 $5.943 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

大田试验于 2014-03-20 ~ 2014-07-15 在重庆市潼南县双坝村 3 组进行。大田试验设置 4 个处理,分别为“Cd”(对照)、“Cd + 黑麦草”(在番茄幼苗移栽 15 d 后在两株番茄之间播黑麦草种子, $40 \text{ 粒} \cdot \text{穴}^{-1}$)、“Cd + 丛枝菌根”(3 种菌根各 1 g 共 3 g)、“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”。番茄施肥量为当地常规施肥量,分别为基肥 60 kg 复合肥(17-17-17),第一次追肥(提苗期)10 kg 复合肥,第二次追肥(第一穗果膨大期)20 kg 复合肥,第三次追肥(盛果期)15 kg 复合肥。每个处理设置 3 次重复,随机排列,小区面积为 8 m^2 ,每个小区移栽番茄幼苗 16 株。从第一次结果开始记产,2014 年 7 月 15 日全部收获。植株在 105°C 下杀酶 15 min,在 60°C 下烘干至恒重。

1.3 测定方法

1.3.1 土壤基本理化性质

土壤 pH 采用电位法测定,土壤有机质采用重铬酸钾-外加热法测定,土壤全氮采用凯氏定氮法测定,碱解氮采用碱解扩散法测定,有效磷采用 Olsen 法提取,钼蓝比色法测定,速效钾采用 NH_4Ac 提取,火焰光度法测定^[17]。

1.3.2 植株 Cd 含量测定

测定植株各部位 Cd 采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (体积比 4:1)法消煮,原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定^[18]。Cd 的检测限为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用国家标准与技术研究所提供的植株标准物质(GBW # 08513)对测定结果进行质量监控。所有植物样品的 Cd 回收率均高于 95%,相对标准偏差(RSD)的精度在 10% 以内。

1.3.3 根际土壤 Cd 含量及 Cd 形态

采用抖土法采集根际土壤。经 $\text{HCl-HNO}_3\text{-HClO}_4$ 消解后,用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定根际土壤 Cd 含量。土壤 Cd 形态分级采用 Tessier 连续提取法^[19]。Cd 的检测限为 $0.005 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。采用国家标准与技术研究所提供的土壤标准物质(GBW #

08303)对测定结果进行质量监控. 所有土壤样品的 Cd 回收率均高于 95%, 相对标准偏差(RSD)的精度在 10% 以内.

1.3.4 根际土壤微生物数量及酶活性测定

根际土壤微生物采用稀释平板分离法测定^[20]. 根际土壤脲酶活性采用靛酚比色法测定^[21]. 根际土壤转化酶采用 3, 5-二硝基水杨酸比色法测定^[22]. 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定^[22]. 根际土壤酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[23].

1.4 统计分析

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 番茄生物量

从表 1 可知, 番茄果实干重和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 污染下, “Cd + 黑麦草或丛枝菌根”提高了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及植株总干重, 增幅分别为 14.1% ~ 38.4% 和 4.2% ~

18.3%、20.9% ~ 31.5% 和 8.4% ~ 10.3%、13.0% ~ 16.8% 和 3.0% ~ 9.5%、10.7% ~ 16.8% 和 2.7% ~ 7.6%、14.3% ~ 36.6% 和 4.5% ~ 16.8%. 2 个番茄品种果实、根、茎、叶及总干重均以“Cd + 黑麦草 + 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, 对照组为“洛贝琪” > “德福 mm-8”, 而黑麦草或丛枝菌根改变了两个品种各部位干重及总干重.

2.2 番茄 Cd 含量及积累量

由表 2 可见, 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 6.9% ~ 37.9% 和 11.8% ~ 40.9%、5.7% ~ 38.6% 和 12.2% ~ 40.1%、5.6% ~ 34.7% 和 4.6% ~ 32.6%、9.8% ~ 42.4% 和 21.7% ~ 41.4%. 番茄叶、茎、根和果实 Cd 含量均以“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”.

表 1 不同处理对番茄生长的影响

Table 1 Effects of different treatments on the growth of tomato

处理	植株干重/g·株 ⁻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	283.32	309.14	2.35	2.73	33.58	36.25	16.30	17.58	335.56	365.71
Cd + 黑麦草	380.40	353.36	3.09	2.96	37.94	37.35	18.04	18.05	439.46	411.73
Cd + 丛枝菌根	323.53	322.19	2.84	3.00	38.29	38.22	18.83	18.74	383.49	382.15
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	392.16	365.72	3.07	3.01	39.22	39.69	19.04	18.92	458.49	427.33
LSD _{0.05}										
品种	1.186		0.091		0.386		0.874		1.311	
处理	3.535		0.153		0.634		1.217		4.074	
品种 × 处理	1.863		0.075		0.492		0.648		2.953	

2.3 根际土壤中 Cd 形态及含量

由表 3 可见, 土壤中 Cd 形态含量的大小顺序为残留态 (RES-Cd) > 铁锰氧化态 (Fe-Mn-Cd) > 碳酸盐态 (CAB-Cd) > 可交换态 (EXC-Cd) > 有机态 (OM-Cd). 与番茄套种黑麦草或接种丛枝菌根均降低了土壤中可交换态 (EXC-Cd)、碳酸盐态 (CAB-Cd) 和铁锰氧化态 (Fe-Mn-Cd), 其中种植 2 个番茄品种土壤中 CAB-Cd 的降幅分别为 16.9% ~ 37.8% 和 31.25% ~ 34.4%; Fe-Mn-Cd 降幅分别为 20.6% ~ 38.1% 和 32.0% ~ 38.6%. 套种黑麦草和套种黑麦草并接种丛枝菌根均降低了种植 2 个番茄品种土壤中 RES-Cd, 黑麦草和黑麦草 + 丛枝菌根降低

RES-Cd 含量的降幅分别为 5.8%、8.2% 和 14.8%、17.68%. 但丛枝菌根却增加了种植 2 个番茄品种土壤中 RES-Cd 的含量, 但不显著, 其增幅分别仅为 2.4% 和 0.7%. 与番茄套种黑麦草或接种丛枝菌根均降低了土壤中 Cd 总量, 降幅分别为 16.9% ~ 22.7% 和 25.4% ~ 27.8%.

通过对番茄各部位 Cd 含量与土壤全 Cd 及其形态的相关性分析发现 (表 4), 除了果实与根、叶间 Cd 未达到显著水平外, 番茄中各部位 Cd 含量的相关性均达到了显著水平, 叶、根、茎之间 Cd 含量的相关性达到极显著水平. 其中根与叶、根与茎、叶与茎中 Cd 的相关系数分别为 0.943、0.792、

表 2 不同处理对番茄 Cd 含量及 Cd 积累量的影响¹⁾

Table 2 Effects of different treatments on concentration and accumulation of Cd in tomato

处理	Cd 含量/mg·kg ⁻¹							
	果实		叶		茎		根	
	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	1.16	0.93	2.46	2.62	2.13	1.96	2.45	2.49
Cd + 黑麦草	1.08	0.82	2.32	2.30	2.01	1.87	2.21	1.95
Cd + 丛枝菌根	0.79	0.72	1.80	1.89	1.81	1.55	1.70	1.76
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	0.72	0.55	1.51	1.57	1.39	1.32	1.41	1.46
LSD _{0.05}								
品种	0.13		0.03		0.06		0.04	
处理	0.09		0.18		0.23		0.15	
品种 × 处理	0.11		0.07		0.17		0.05	

处理	Cd 积累量*/mg·株 ⁻¹								Cd 全量/mg·株 ⁻¹	
	果实		叶		茎		根			
	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	0.329	0.288	0.040	0.046	0.072	0.071	0.006	0.007	0.446	0.411
Cd + 黑麦草	0.411	0.290	0.042	0.042	0.076	0.070	0.007	0.006	0.536	0.407
Cd + 丛枝菌根	0.256	0.232	0.034	0.035	0.069	0.059	0.005	0.005	0.364	0.332
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	0.282	0.201	0.029	0.030	0.055	0.052	0.004	0.004	0.370	0.288
LSD _{0.05}										
品种	0.009		0.003		0.005		0.001		0.019	
处理	0.024		0.005		0.009		0.007		0.034	
品种 × 处理	0.012		0.002		0.007		0.001		0.027	

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

表 3 根际土壤 Cd 形态及 Cd 含量¹⁾

Table 3 Cd forms and Cd concentration in rhizosphere soil

处理	Cd 含量/mg·kg ⁻¹											
	可交换态 (EXC-Cd)		碳酸盐态 (CAB-Cd)		铁锰氧化态 (Fe-Mn-Cd)		有机态 (OM-Cd)		残留态 (RES-Cd)		土壤 Cd 总量 ¹⁾	
	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	0.021	0.024	0.662	0.800	0.787	0.937	<0.005	<0.005	1.525	1.775	2.995	3.536
Cd + 黑麦草	<0.005	0.014	0.487	0.537	0.512	0.612	<0.005	<0.005	1.437	1.512	2.437	2.676
Cd + 丛枝菌根	<0.005	<0.005	0.550	0.550	0.625	0.637	<0.005	<0.005	1.562	1.787	2.736	2.974
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	<0.005	<0.005	0.412	0.525	0.487	0.575	<0.005	<0.005	1.400	1.463	2.300	2.563
LSD _{0.05}												
品种	0.002		0.003		0.056		0.002		0.034		0.096	
处理	0.005		0.009		0.081		0.003		0.025		0.138	
品种 × 处理	0.001		0.006		0.547		0.001		0.019		0.074	

1) 土壤 Cd 总量为土壤中各种 Cd 形态的含量之和

表 4 番茄各部位 Cd 含量与土壤全 Cd 以及 Cd 形态的相关系数¹⁾

Table 4 Correlation coefficients among Cd content and forms in soil and parts of the tomato

	根-Cd	茎-Cd	叶-Cd	果实-Cd	Total-Cd	EXC-Cd	CAB-Cd	Fe-Mn-Cd	OM-Cd	RES-Cd
根-Cd	1									
茎-Cd	0.792 **	1								
叶-Cd	0.943 **	0.798 **	1							
果实-Cd	0.429	0.609 *	0.340	1						
Total-Cd	0.578 *	0.508	0.450	0.457	1					
EXC-Cd	0.785 **	0.777 **	0.747 **	0.594 *	0.740 **	1				
CAB-Cd	0.643 **	0.686 **	0.560 *	0.407	0.863 **	0.774 **	1			
FeMn-Cd	0.712 **	0.608 *	0.611 *	0.509 *	0.890 **	0.802 **	0.877 **	1		
OM-Cd	—	—	—	—	—	—	—	—	1	
RES-Cd	-0.026	0.031	-0.112	-0.133	0.145	0.071	0.147	0.241	—	1

1) n 为 16; Total-Cd 表示土壤全 Cd; ** 表示 $P < 0.01$, * 表示 $P < 0.05$

0.798. 土壤中全 Cd、Fe-Mn-Cd、CAB-Cd、EXC-Cd 之间相关性均达到极显著水平,其中全 Cd、Fe-Mn-Cd、全 Cd 与 CAB-Cd、全 Cd 与 EXC-Cd、Fe-Mn-Cd 与 CAB-Cd、Fe-Mn-Cd 与 EXC-Cd、CAB-Cd 与 EXC-Cd 之间的相关系数分别为 0.890、0.863、0.740、0.877、0.802、0.774;而有机态和残留态与土壤全 Cd 及其它形态间均无显著相关性. 番茄各部位的 Cd 含量与土壤全 Cd 及 Fe-Mn-Cd、CAB-Cd、EXC-Cd 之间均达到显著相关性,其中根、茎、叶中 Cd 与土壤 EXC-Cd 之间的相关性达到极显著水平,其相关系数分别为 0.785、0.777、0.747;番茄根、茎中 Cd 与土壤 CAB-Cd 也达到极显著相关性,其相关系数分别为 0.643、0.686;番茄根中 Cd 与土壤 Fe-Mn-Cd 之间的相关性也到达极显著水平,其相关系数为 0.712;番茄果实中 Cd 与土壤 EXC-Cd、Fe-Mn-Cd 之间到达显著相关性,其相关系数分别为 0.594、0.509.

2.4 根际土壤微生物数量

表 5 不同处理对土壤中微生物数量的影响

Table 5 Influence of different treatments on soil microbial population

处理	土壤微生物数量/个·g ⁻¹					
	细菌		真菌		放线菌	
	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪	德福 mm-8	洛贝琪
Cd	142.3	240.3	13.0	19.7	48.0	61.3
Cd + 黑麦草	227.0	292.3	23.7	58.3	61.3	78.7
Cd + 丛枝菌根	502.7	645.7	43.0	67.3	83.0	108.0
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	357.3	505.0	26.3	60.0	73.7	80.3
LSD _{0.05}						
品种	5.13		1.21		3.43	
处理	8.45		3.98		6.09	
品种 × 处理	4.12		2.30		3.92	

2.5 根际土壤酶活性

由表 6 可见,与 Cd 处理(对照)比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度地增加了种植 2 个番茄品种土壤中脲酶活性,其中“Cd + 黑麦草”处理增幅最大,分别增加了 18.0%、19.8%;其次是“Cd + 丛枝菌根”处理,分别增加了 15.9%、16.2%;“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理增幅最小,分别增加了 7.5%、13.2%. LSD-Duncan 检验表明,除了对照“Cd”处理与其它处理间土壤脲酶活性达到显著性差异,其它处理间土壤脲酶活性差异性不显著. 与对照相比,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度地增加了种植 2 个番茄品种土壤中转化酶活性(表 6). 其中,种植“德福 mm-8”番茄的土壤中,“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理增幅最大,增加了 30.3%;其次是处理“Cd + 丛枝菌根”,增加了 8.3%;最后

由表 5 可见,与 Cd 处理(对照)比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度地增加了种植 2 个番茄品种土壤中细菌、真菌、放线菌数量. 土壤中细菌、真菌、放线菌增幅分别为 59.9% ~ 253.5% 和 21.7% ~ 168.7%、76.9% ~ 230.8% 和 205.3% ~ 252.6%、27.1% ~ 72.9% 和 27.9% ~ 77.0%. 其中,“Cd + 丛枝菌根”处理增幅最大,其次是“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理,“Cd + 黑麦草”处理最小. LSD-Duncan 检验表明,土壤中细菌在各处理间的差异性均达到显著水平或极显著水平. 种植品种“洛贝琪”番茄的土壤中真菌数量的对照处理与其它 3 个处理间差异性显著,而种植“德福 mm-8”番茄的土壤中真菌数量的对照处理只与“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理间差异性显著. 土壤中放线菌数量,除了种植品种“洛贝琪”番茄的土壤中“Cd + 丛枝菌根”处理与其它 3 个处理间差异性显著外,种植 2 个番茄品种土壤中放线菌数量在各处理间差异性均不显著.

是“Cd + 黑麦草”处理,增加了 5.7%. 而种植“洛贝琪”番茄的土壤中,“Cd + 黑麦草”处理增幅最大,增加了 44.9%;其次是“Cd + 丛枝菌根”,增加了 25.6%,增加最少的是“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理,增加了 12.5%. LSD-Duncan 检验表明,各处理间土壤转化酶活性差异性不显著. 由表 6 可知,与对照相比,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度地增加了种植 2 个番茄品种土壤中酸性磷酸酶活性,种植“德福 mm-8”番茄的土壤中,“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理增幅最大,增加了 53.0%;其次是处理“Cd + 黑麦草”,增加了 19.6%;最后是“Cd + 丛枝菌根”处理,增加了 2.8%. 而种植“洛贝琪”番茄的土壤中,“Cd + 黑麦草”处理增幅最大,增加了 70.6%;其次是“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”,增加了 31.0%,增加最少的是“Cd + 丛枝菌根”处理,增加

了 22.2%。LSD-Duncan 检验表明,除了种植“德福 mm-8”番茄的土壤中对照“Cd”处理与“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理下土壤酸性磷酸酶活性的差异性达到显著水平,种植“洛贝琪”番茄的土壤中对照“Cd”处理与“Cd + 黑麦草”处理下土壤酸性磷酸酶活性的差异性达到显著水平外,其它处理间土壤酸性磷酸酶活性的差异性均不显著。与对照相比,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度地增加了种植“德福 mm-8”番茄土壤中过氧化氢酶活性,但却降低了种植“洛贝琪”番茄土壤中过氧化氢酶的活性(表 6)。LSD-Duncan 检验表明,种植“德福 mm-8”番茄的土壤中对照“Cd”处理与“Cd + 丛枝菌根”处理、“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理下土壤过氧化

氢酶活性的差异性达到显著水平,种植“洛贝琪”番茄的土壤中对照“Cd”处理与“Cd + 黑麦草”处理、“Cd + 丛枝菌根”处理下土壤过氧化氢酶活性的差异性达到显著水平,其它处理间土壤过氧化氢酶活性的差异性均不显著。

2.6 根际土壤 pH

由表 6 可见,与 Cd 处理(对照)比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度的增加了种植 2 个番茄品种土壤 pH 值,但增加均不显著。两个番茄品种的土壤 pH 值增幅分别为 2.1% ~ 5.8% 和 0.3% ~ 7.2%。其中,接种丛枝菌根的处理增加最高,其次是“Cd + 丛枝菌根 + 黑麦草”处理。比较两个品种番茄,根际土壤 pH 值均以“德福 mm-8” > “洛贝琪”。

表 6 不同处理对根际土壤酶活性和 pH 的影响

Table 6 Influence of different treatments on activities of soil enzymes and soil pH

处理	土壤酶活性								土壤 pH	
	脲酶 /mg·(g·d) ⁻¹		转化酶 /mg·(g·d) ⁻¹		酸性磷酸酶 /mg·(g·d) ⁻¹		过氧化氢酶 /mL·g ⁻¹			
	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	0.824	0.761	2.02	2.11	0.288	0.223	3.24	3.31	6.32	6.13
Cd + 黑麦草	0.972	0.911	2.14	3.06	0.344	0.380	3.28	3.24	6.45	6.15
Cd + 丛枝菌根	0.955	0.884	2.19	2.65	0.295	0.272	3.32	3.25	6.69	6.57
Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根	0.885	0.861	2.63	2.37	0.440	0.292	3.31	3.29	6.57	6.39
LSD _{0.05}										
品种	0.022		0.09		0.003		0.01		0.08	
处理	0.010		0.05		0.018		0.05		0.05	
品种 × 处理	0.009		0.04		0.007		0.02		0.04	

3 讨论

本试验条件下,在 Cd 污染土壤上,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”处理提高了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干重(见表 1),且 2 个番茄品种果实、根、茎、叶及总干重均以“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理最高,这与江玲土培试验(模拟 Cd 污染为 20 mg·kg⁻¹)的研究结果一致^[24]。说明黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复无论在低 Cd 浓度下还是高 Cd 浓度下均能缓解 Cd 对番茄生长的抑制,同时相对于较高 Cd 浓度,在低 Cd 浓度下,黑麦草和丛枝菌根联合修复效果更好。这为轻度 Cd 污染土壤的利用提供了一定的理论依据。

供试 2 个番茄品种 Cd 主要累积于叶、根和茎中,积累较少的是果实。周坤^[25]对番茄的研究结果也表明 Cd 主要集中于叶片中。但此结果与朱芳等^[16]研究显示的番茄 Cd 主要集中在根部有所不同。Cd + 黑麦草或丛枝菌根处理均降低了 2 个番茄

品种果实、根、茎、叶中 Cd 含量;“Cd + 丛枝菌根”处理和“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理还减少了 2 个品种果实、叶、茎、根 Cd 的积累量。原因可能是黑麦草根部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,丛枝菌根真菌可能改变了 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^[12]。也可能是因为丛枝菌根真菌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,而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^[26]。试验也发现“Cd + 黑麦草”处理降低了“洛贝琪”根、茎、叶 Cd 积累量,但却增加了“德福 mm-8”果实、根、茎、叶 Cd 积累量和“洛贝琪”果实的 Cd 积累量。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

差异达到显著性水平,进一步印证了番茄对 Cd 耐受性和吸收富集存在基因型差异^[16]。

本试验条件下,根际土壤中 Cd 形态含量的大小顺序为残留态 (RES-Cd) > 铁锰氧化态 (Fe-Mn-Cd) > 碳酸盐态 (CAB-Cd) > 可交换态 (EXC-Cd) > 有机态 (OM-Cd)。与王友保等^[27]的研究基本一致,在土壤 Cd 含量小于 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤中 Cd 形态含量大小顺序为 RES > EXC > Fe-Mn > CAB > OM。但与早前报道的土壤中 Cd 形态在根际土壤中以交换态 (EXC-Cd) > 碳酸盐结合态 (CAB-Cd) > 铁锰结合态 (Fe-Mn-Cd) > 残渣态 (RES-Cd) > 有机结合态 (OM-Cd) 不一致^[28],其原因可能与土壤性质、植物种类等造成土壤微生态环境、pH 等的改变,从而影响 Cd 的存在形式^[29]。本试验条件下,黑麦草降低了根际土壤中各形态 Cd 和 Cd 总提取量以及土壤中 Cd 含量,可能是由于黑麦草对 Cd 的富集能力很强,根际土壤中部分 Cd 被黑麦草吸收从而降低了土壤中 Cd。丛枝菌根降低了根际土壤中 EXC-Cd、CAB-Cd 和 Fe-Mn-Cd 的含量却增加了种植 2 个番茄品种土壤中 RES-Cd 的含量,说明丛枝菌根可将土壤中活性较高的 EXC-Cd 和 CAB-Cd 转化成活性低的 RES-Cd。这可能是由于丛枝菌根改变了土壤 pH 等原因,与根际土壤 pH 升高相符合。与番茄套种黑麦草并接种丛枝菌根均降低了根际土壤中 Cd 形态的总提取量,相比较下,黑麦草和丛枝菌根联合不但可使根际土壤中 Cd 向活性较低的形态转化并能有效降低根际土壤中 Cd 含量,这与黑麦草和丛枝菌根显著降低了番茄中 Cd 含量相符合。

番茄叶、根、茎之间 Cd 含量的相关性达到极显著水平,说明番茄叶和茎中 Cd 主要来源于根中。而果实中 Cd 与茎中 Cd 之间存在显著相关性,说明果实中 Cd 主要来源于茎中。根际土壤中全 Cd、Fe-Mn-Cd、CAB-Cd、EXC-Cd 之间相关性均达到极显著水平,说明根际土壤中全 Cd 与活性较高的 Fe-Mn-Cd、CAB-Cd、EXC-Cd 之间相互转化;而活性较低的有机态和残留态与土壤全 Cd 及其它形态间均无显著相关性。说明根际土壤中有机态和残留态相对稳定。番茄各部位的 Cd 含量与根际土壤全 Cd 及 Fe-Mn-Cd、CAB-Cd、EXC-Cd 之间均达到显著相关性,说明番茄各部位中的 Cd 主要来源于土壤全 Cd 和活性较高的 Fe-Mn-Cd、CAB-Cd、EXC-Cd。该结果与徐卫红等^[8]的研究结果相似。

微生物群落数表征土壤生态结构的多样性,一定程度上可表征土壤肥力^[23]。有研究发现在 AM

真菌的菌体(孢子、菌丝等)上及细胞内部也发现有大量的细菌、放线菌和少量的真菌类微生物存在^[30]。本试验发现,与 Cd 处理(对照)比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度地增加了根际土壤中细菌、真菌、放线菌数量。与王曙光等^[30]和杜小刚^[31]的报道一致;但与接种 AM 真菌后,A 层和 B 层土中细菌、真菌和放线菌数量低于不接种。其不一致的原因可能是接种的 AM 真菌不一样或是宿主植物不一样,或也与土壤本身基本性质以及土壤污染物质不一样有关^[32]。滕少娜^[33]的研究显示黑麦草根际分泌的大量代谢物可为土壤微生物提供良好的生存环境,从而可使土壤微生物数量增加。其原因可能是因为 AM 的外生菌丝能够延伸数厘米以上,并能分泌有机物质,而这些物质可促进土壤微生物数量和活性^[30]。土壤中菌落数增加说明黑麦草或丛枝菌根真菌均能在一定程度上降低 Cd 对土壤微生态结构的影响,减轻对土壤肥力的破坏程度^[34]。

土壤酶在土壤物质循环和能量转化过程中起着重要作用,其活性反映了土壤中各种生物化学过程的强度和方向,可以表征土壤肥力状况,也是土壤质量评价的重要生物活性指标^[35]。植物根系分泌物、土壤微生物活性及其之间的相互作用都会影响土壤中酶的活性^[24]。土壤脲酶、土壤蔗糖酶、土壤磷酸酶和土壤过氧化氢酶是土壤系统中最重要酶之一,其活性大小是重金属污染时研究的重要指标之一^[36~38]。有研究发现,Cd 对土壤酶活性的影响表现为低促高抑,低浓度的 Cd ($\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 对土壤脲酶、蔗糖酶有激活作用,均高于对照组,而高浓度 Cd ($> 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 则对土壤脲酶和蔗糖酶表现出抑制作用^[37]。本试验条件下,与 Cd 处理(对照)比较,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”均不同程度地增加了种植 2 个番茄品种根际土壤中脲酶、转化酶、酸性磷酸酶活性,但却降低了种植“洛贝琪”番茄根际土壤中过氧化氢酶的活性。这与文献^[36, 39~41]的研究结果类似。但也有相反报道,王曙光等^[30]的研究显示,接种 AM 真菌后,土层中各种酶活性均比不接种低。其原因与根际土壤中微生物数量有关。本试验条件下,与番茄套作黑麦草和接种 AM 真菌均能使根际土壤中酶活性增强,这说明在 Cd 污染土壤上与番茄套作黑麦草并接种丛枝菌根可使土壤中部分酶活性增强,从而减轻 Cd 对土壤肥力的破坏程度,可改善 Cd 污染土壤的质量。土壤酶主要来源于植物根系分泌物、微生物生命活动和土壤中动植物

残体的分解,土壤酶活性增加可能是黑麦草根系可分泌大量代谢物微生物生存提供条件,从而增加微生物数量,进而提高酶活性^[33];而 AM 真菌则是能促进植物通过根外菌丝分泌土壤酶,或是 AM 真菌可促进植物和其他微生物分泌更多的土壤酶^[36, 38]。套作黑麦草和接种 AM 真菌增加了土壤脲酶活性,可以促进番茄对有效 N 的吸收利用;土壤酸性磷酸酶活性增加,能够提高番茄和黑麦草对土壤有机磷的利用。本试验条件下,根际土壤脲酶和过氧化氢酶活性在各处理间差异性显著,表明土壤中这两种酶对土壤环境的响应相对敏感;土壤脲酶活性最为敏感,这与王学峰等^[37]的研究结果基本一致。而根际酸性磷酸酶相对较弱,根际转化酶最弱,这之前一些学者报道的蔗糖酶保护容量大,相对较稳定类似^[42~44]。根际土壤 pH 会影响土壤中重金属的存在形态,重金属溶解度随着土壤 pH 值降低而升高,重金属会由活性较低的残渣态向活性高的弱酸溶解态、铁锰结合态和有机结合态等转化^[45]。本试验条件下,接种丛枝菌根均不同程度地提高了根际土壤 pH,这与陈保冬^[46]和申鸿^[47]的研究接种丛枝菌根可提高土壤 pH 一致。

4 结论

(1)在 Cd 污染土壤上,“Cd + 黑麦草或丛枝菌根”处理提高了 2 个番茄品种的果实、根、茎、叶及总干重。黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复降低了 2 个番茄品种各部位 Cd 含量,以“Cd + 黑麦草 + 丛枝菌根”处理效果最好,其次是“Cd + 丛枝菌根”处理。2 个番茄品种果实 Cd 含量及积累量均以“德福 mm-8” > “洛贝琪”。

(2)根际土壤中 Cd 形态含量的大小顺序为残留态 (RES-Cd) > 铁锰氧化态 (Fe-Mn-Cd) > 碳酸盐态 (CAB-Cd) > 可交换态 (EXC-Cd) > 有机态 (OM-Cd)。与番茄套种黑麦草或接种丛枝菌根均降低了根际土壤中可交换态 (EXC-Cd)、碳酸盐态 (CAB-Cd) 和铁锰氧化态 (Fe-Mn-Cd)。黑麦草和丛枝菌根联合修复降低了种植 2 个番茄品种根际土壤中 RES-Cd。黑麦草和丛枝菌根单一或联合修复 Cd 污染土壤均降低了根际土壤中 Cd 总量。

(3)黑麦草和丛枝菌根单一或复合处理 Cd 污染土壤增加了种植 2 个番茄品种根际土壤中细菌、真菌、放线菌数量和土壤 pH 值,同时也增加了根际土壤中脲酶、转化酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性。

参考文献:

- [1] 周健. 硫和硒对镉胁迫下水稻幼苗生理生化特性及镉的吸收分配影响研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2013.
- [2] 许嘉林, 杨居荣. 陆地生态系统中的重金属[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1995.
- [3] 索炎炎, 吴士文, 朱骏杰, 等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, **38**(4): 449-458.
- [4] Hawrylak-Nowak B, Dresler S, Wójcik M. Selenium affects physiological parameters and phytochelatin accumulation in cucumber (*Cucumis sativus* L.) plants grown under cadmium exposure[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, **172**: 10-18.
- [5] Reiser S, Simmler M, Portmann D, et al. Cadmium concentrations in New Zealand Pastures: relationships to soil and climate variables[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2014, **43**(3): 917-925.
- [6] Wong C W, Barford J P, Chen G H, et al. Kinetics and equilibrium studies for the removal of cadmium ions by ion exchange resin [J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2014, **2**(1): 698-707.
- [7] 王守经, 胡鹏, 杜方岭. 我国城郊地区农用地重金属污染与农产品质量安全[J]. *中国食物与营养*, 2010, (7): 8-10.
- [8] 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.
- [9] 李晓林, 冯固. 丛枝菌根生态生理[M]. 北京: 华文出版社, 2001.
- [10] 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.
- [11] 刘茵, 孔凡美, 冯固, 等. 丛枝菌根真菌对紫羊茅镉吸收与分配的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, **24**(6): 1122-1127.
- [12] 冯海艳, 刘茵, 冯固, 等. 接种 AM 真菌对黑麦草吸收和分配 Cd 的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, **24**(3): 426-431.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals [J]. *Analytical Chemistry*, 1979, **51**(7): 844-850.

- [20] 许光辉, 郑洪元. 土壤微生物分析方法手册[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [21] Grant C A, Clarke J M, Duguid S, *et al.* Selection and breeding of plant cultivars to minimize cadmium accumulation[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, **390**(2-3): 301-310.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [23] 杨文浩. 镉污染/镉-锌-铅复合污染土壤植物提取修复的根际微生态效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [24] 江玲, 杨芸, 徐卫红, 等. 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[J]. *环境科学*, 2014, **35**(6): 2349-2357.
- [25] 周坤. 外源锌、铁对番茄镉积累的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- [26] 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.
- [27] 王友保, 燕傲蕾, 张旭情, 等. 吊兰生长对土壤镉形态分布与含量的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, **24**(6): 163-172.
- [28] 王宏信. 重金属富集植物黑麦草对锌、镉的响应及其根际效应[D]. 重庆: 西南大学, 2006.
- [29] Yang H, Wong J W C, Yang Z M, *et al.* Ability of *Agrocyron elongatum* to accumulate the single metal of cadmium, copper, nickel and lead and root exudation of organic acids[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2001, **13**(3): 368-375.
- [30] 王曙光, 林先贵, 尹睿, 等. 接种 AM 真菌对 PAEs 污染土壤中微生物和酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2004, **23**(1): 48-51.
- [31] 杜小刚. 丛枝菌根真菌对刺槐根际微生态的作用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [32] 陈廷速, 张金莲, 李松, 等. 广西南部沿海蔗区根际土壤 AM 真菌多样性研究[J]. *南方农业学报*, 2012, **43**(1): 57-61.
- [33] 滕少娜. 黑麦草种植对烟田土壤微生物群落结构的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2010.
- [34] Aghababaei F, Raiesi F, Hosseinpour A. The combined effects of earthworms and arbuscular mycorrhizal fungi on microbial biomass and enzyme activities in a calcareous soil spiked with cadmium[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, **75**: 33-42.
- [35] 张雪艳, 田蕾, 王冠, 等. 秸秆反应堆与生物菌剂对番茄土壤碳氮比与酶活性的影响[J]. *北方园艺*, 2015, (4): 165-169.
- [36] 付淑清. 施氮和接种 AM 真菌对刺槐生长和根际土壤酶活性的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [37] 王学锋, 尚菲, 刘修和, 等. Cd、Ni 单一及复合污染对土壤酶活性的影响[J]. *环境工程学报*, 2014, **8**(9): 4027-4034.
- [38] 贺学礼, 郭辉娟, 王银银. 土壤水分和 AM 真菌对沙打旺根际土壤理化性质的影响[J]. *河北大学学报(自然科学版)*, 2013, **33**(5): 508-513, 519.
- [39] 徐辉. 砒砂岩区主要树种 AMF 接种效应和 AMF 与土壤的相互影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [40] 李守萍. 菌根促生荧光假单胞菌与菌根真菌对宿主植物的接种效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009.
- [41] Huang H L, Zhang S Z, Wu N Y, *et al.* Influence of *Glomus etunicatum*/*Zea mays* mycorrhiza on atrazine degradation, soil phosphatase and dehydrogenase activities, and soil microbial community structure[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, **41**(4): 726-734.
- [42] 和文祥, 陈会明, 冯贵颖, 等. 汞铬砷元素污染土壤的酶监测研究[J]. *环境科学学报*, 2000, **20**(3): 338-343.
- [43] 滕应, 黄昌勇, 龙健, 等. 铅锌银尾矿污染区土壤酶活性研究[J]. *中国环境科学*, 2002, **22**(6): 551-555.
- [44] 黄云凤, 高扬, 毛亮, 等. Cd、Pb 单一及复合污染下土壤酶生态抑制效应及生态修复基准研究[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(11): 2258-2264.
- [45] 李江遐, 张军, 曹海生, 等. 模拟酸雨与 Cd 复合污染对黑麦草镉积累及土壤镉形态的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, **41**(1): 169-172.
- [46] 陈保冬. 丛枝菌根减轻宿主植物锌、镉毒害机理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- [47] 申鸿. 丛枝菌根(AM)对重金属污染耐受性机理研究[D]. 重庆: 西南农业大学, 2004.

CONTENTS

Characterization of Water-soluble Ions in PM _{2.5} of Beijing During 2014 APEC	YANG Dong-yan, LIU Bao-xian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4325)
PM _{2.5} Background Concentration at Different Directions in Beijing in 2013	LI Yun-ting, CHENG Nian-liang, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (4331)
Comparative Analysis on the Improvement of Air Quality in Beijing During APEC	LI Wen-tao, GAO Qing-xian, LIU Jun-rong, <i>et al.</i> (4340)
Weekend Effect in Distributions of Particulate Matters, Main Gas Pollutants and Aerosol Size in Spring of Jiaxing	SHEN Li-juan, WANG Hong-lei, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (4348)
Influence of Burning Fireworks on Air Quality During the Spring Festival in the Pearl River Delta	ZHAO Wei, FAN Shao-jia, XIE Wen-zhang, <i>et al.</i> (4358)
Characteristic of Mercury Emissions and Mass Balance of the Typical Iron and Steel Industry	ZHANG Ya-hui, ZHANG Cheng, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (4366)
Magnetic Response of Dust-loaded Leaves in Parks of Shanghai to Atmospheric Heavy Metal Pollution	LIU Fei, CHU Hui-min, ZHENG Xiang-min (4374)
Characteristics and Resources of Fly Ash Particles in the Snowpack of Jinfo Mountain, Chongqing	YU Zheng-liang, YANG Ping-heng, JING Wei-li, <i>et al.</i> (4381)
Removal of Mixed Waste Gases by a Biotrickling Filter Packed with a Novel Combined Packing Material	MEI Yu, CHENG Zhuo-wei, WANG Jia-de, <i>et al.</i> (4389)
Low-Concentration CO ₂ Adsorption on Polyaniline/Zelite Y Composites	LIU Feng-ling, LU Xia, ZHANG Hui, <i>et al.</i> (4396)
Chemical Characteristics of Atmospheric Wet Deposition in Winter and Its Forestry Canopy Interception Mechanism in Red Soil Hilly Area	HAO Zhuo, GAO Yang, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (4403)
Dynamic Characteristics of Base Cations During Wet Deposition in Evergreen Broad-leaf Forest Ecosystem	AN Si-wei, SUN Tao, MA Ming, <i>et al.</i> (4414)
Estimation of Diffuse Attenuation Coefficient of Photosynthetically Active Radiation in Xin'anjiang Reservoir Based on Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (4420)
Spatial Distribution of Stable Isotopes in Particle Organic Matters and Sediments from Baishi Reservoirs	GUO Kai, ZHAO Wen, WANG Shan, <i>et al.</i> (4430)
Response of Phytoplankton Functional Groups to Eutrophication in Summer at Xiaoguan Reservoir	LI Lei, LI Qiu-hua, JIAO Shu-lin, <i>et al.</i> (4436)
Environmental Effect of Substrate Amelioration on Lake; Effects on <i>Phragmites communis</i> Growth and Photosynthetic Fluorescence Characteristics	YU Ju-hua, ZHONG Ji-cheng, FAN Cheng-xin, <i>et al.</i> (4444)
Variation Characteristics of Cave Water Hydrogeochemistry in Naduo Cave of Guizhou and Its Implications for Environment Research	SHEN Wei, WANG Jian-li, WANG Jia-lu, <i>et al.</i> (4455)
Response Mechanism of Trace Metals in the Bishuiyan Subterranean River to the Rainfall and Their Source Analysis	ZOU Yan-e, JIANG Ping-ping, ZHANG Qiang, <i>et al.</i> (4464)
Residue Concentration and Distribution Characteristics of Perfluorinated Compounds in Surface Water from Qiantang River in Hangzhou Section	ZHANG Ming, TANG Fang-liang, YU Ya-yun, <i>et al.</i> (4471)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Surface Sediments from Middle Reaches of the Yangtze River	TIAN Qi-chang, TANG Hong-bo, XIA Dan, <i>et al.</i> (4479)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Urban Surface Water Sediments from Yongkang	QI Peng, YU Shu-quan, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (4486)
Effects of Citric Acid on Activation and Methylation of Mercury in the Soils of Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	QIN Cai-qing, LIANG Li, YOU Rui, <i>et al.</i> (4494)
Impacts of Microorganisms on Degradation and Release Characteristics of Organic Phosphorus in Lake Sediments During Freezing Season	ZUO Le, LÜ Chang-wei, HE Jiang, <i>et al.</i> (4501)
Sedimentary Phosphorus Forms Under Disturbances and Algae in Taihu Lake	CHEN Jun, LI Da-peng, ZHU Pei-ying, <i>et al.</i> (4509)
Interception Effect of Vegetated Drainage Ditch on Nitrogen and Phosphorus from Drainage Ditches	ZHANG Shu-nan, XIAO Run-lin, LIU Feng, <i>et al.</i> (4516)
Removal of Phosphate by Calcite in Open-System	LI Zhen-xuan, DIAO Jia-yong, HUANG Li-dong, <i>et al.</i> (4523)
Adsorption of Cu on Core-shell Structured Magnetic Particles: Relationship Between Adsorption Performance and Surface Properties	LI Qiu-mei, CHEN Jing, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4531)
Shortcut Nitrosation-Denitrifying Phosphorus Removal Based on High-quality Carbon Source in Combined Process of CAMBR	CHENG Ji-hui, WU Peng, CHENG Chao-yang, <i>et al.</i> (4539)
Simultaneous Biotransformation of Ammonium and Nitrate via Zero-Valent Iron on Anaerobic Conditions	ZHOU Jian, HUANG Yong, YUAN Yi, <i>et al.</i> (4546)
Health Risk Assessment of Drinking Water Quality in Tianjin Based on GIS	FU Gang, ZENG Qiang, ZHAO Liang, <i>et al.</i> (4553)
Endotoxin Contamination and Correlation with Other Water Quality Parameters of Groundwater from Self-Contained Wells in Beijing	ZHANG Can, LIU Wen-jun, AO Lu, <i>et al.</i> (4561)
Internal Exposure Levels of PAHs of Primary School Students in Guangzhou	SU Hui, ZHAO Bo, ZHANG Su-kun, <i>et al.</i> (4567)
Construction of Three-Dimensional Isobologram for Ternary Pollutant Mixtures	LIU Xue, LIU Shu-shen, LIU Hai-ling (4574)
Aging Law of PAHs in Contaminated Soil and Their Enrichment in Earthworms Characterized by Chemical Extraction Techniques	ZHANG Ya-nan, YANG Xing-lun, BIAN Yong-rong, <i>et al.</i> (4582)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in a Larch Plantation of North China at Different Sampling Scales	YAN Jun-xia, LIANG Ya-nan, LI Hong-jian, <i>et al.</i> (4591)
Mapping Critical Loads of Heavy Metals for Soil Based on Different Environmental Effects	SHI Ya-xing, WU Shao-hua, ZHOU Sheng-lu, <i>et al.</i> (4600)
Stabilization Treatment of Pb and Zn in Contaminated Soils and Mechanism Studies	XIE Wei-qiang, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (4609)
Effects of ZnO Nanoparticles, ZnSO ₄ and Arbuscular Mycorrhizal Fungus on the Growth of Maize	LI Shuai, LIU Xue-qin, WANG Fa-yuan, <i>et al.</i> (4615)
Occurrence Characteristics of Pyrene and Arsenate and Their Interaction in <i>Pteris vittata</i> L.	ZHANG Yu-xiu, MA Xu, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (4623)
Effect of Nano Zeolite on Chemical Fractions of Cd in Soil and Its Uptake by Cabbage	XIONG Shi-juan, XU Wei-hong, XIE Wen-wen, <i>et al.</i> (4630)
Effect of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhizal on Cd Absorption by Varieties of Tomatoes and Cadmium Forms in Soil	CHEN Yong-qin, JIANG Ling, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (4642)
Degradation of Steroidal Hormones by Salt-tolerant <i>Altererythrobacter</i> Strain MH-B5; Degradation Characteristics, Metabolites and Its Immobilization	MA Cong, QIN Dan, SUN Qian, <i>et al.</i> (4651)
Distribution and Diversity of Ammonium-oxidizing Archaea and Ammonium-oxidizing Bacteria in Surface Sediments of Oujiang River	LI Hu, HUANG Fu-yi, SU Jian-qiang, <i>et al.</i> (4659)
Effects of Different Altitudes on Soil Microbial PLFA and Enzyme Activity in Two Kinds of Forests	ZENG Qing-ping, HE Bing-hui, MAO Qiao-zhi, <i>et al.</i> (4667)
Effects of Cultivation Soil Properties on the Transport of Genetically Engineered Microorganism in Huabei Plain	ZHANG Jing, LIU Ping, LIU Chun, <i>et al.</i> (4676)
Assessment of Emission and Co-Reduction of PCDD/Fs and PCNs in the Secondary Copper Production Sector	TIAN Ya-jing, JIANG Chen, WU Guang-long, <i>et al.</i> (4682)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

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

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年12月15日 第36卷 第12期(卷终)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 12 Dec. 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