

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.7

第40卷 第7期

目次

《大气污染防治行动计划》实施的环境健康效果评估	武卫玲, 薛文博, 王燕丽, 雷宇, 冯涛, 蔡泽林 (2961)
基于达标约束的南京市环境空气质量情景模拟	谢放尖, 史之浩, 李婧祎, 郑新梅, 胡建林, 刘春蕾, 杨峰 (2967)
郑州市 PM _{2.5} 中水溶性离子特征及来源分析	杨留明, 王申博, 郝祺, 韩士杰, 李晨, 赵庆炎, 燕启社, 张瑞芹 (2977)
能见度与 PM _{2.5} 浓度关系及其分布特征	王继康, 张恒德, 桂海林, 饶晓琴, 张碧辉 (2985)
基于扩散模式反演的橡胶轮胎制造行业 VOCs 排放特征	白红祥, 魏巍, 王雅婷, 任云婷, 臧佳欣, 程水源 (2994)
太原市环境空气中挥发性芳香烃碳同位素组成及来源	李颖慧, 闫雨龙, 李志生, 郝爱胜, 李如梅, 杨帆, 彭林 (3001)
办公楼聚集区空气中 PBDEs 谱分布与污染特征	王琳, 邓雅佳, 廖晓勇, 曹红英, 焦杏春 (3008)
南北水调东线中游枢纽湖泊有色可溶性有机物来源组成特征	张柳青, 彭凯, 周蕾, 石玉, 李元鹏, 周永强, 龚志军, 张运林, 杨艳 (3018)
黄土丘陵沟壑区小流域不同水体氢氧同位素特征	张荷惠子, 于坤霞, 李占斌, 李鹏, 赵宾华, 柯浩成, 蒋凯鑫 (3030)
基于碳氮同位素的澜沧江水库 TOC 来源差异性分析	王从锋, 胡子龙, 杨正健, 丹勇, 赵萍, 郝文超, 聂小芬, 聂睿, 徐刘得, 刘德富 (3039)
李家河水库污染物来源及水体分层对水质的影响	徐进, 黄廷林, 李凯, 杨尚业, 温成成, 林子深, 李衍庆, 刘雪晴 (3049)
水库淹没带土壤有机氯农药分布特征及风险评价	王霞, 张青琢, 赵高峰, 王晓燕 (3058)
银川市湿地表层水中多环芳烃的分布、来源及生态风险评价	田大年, 党丽慧, 丁润梅, 蔡倩, 张鹏举, 汪岭, 杨慧芳 (3068)
人类活动影响下的垂直气候带岩溶泉地球化学特征对比: 以重庆金佛山水房泉、碧潭泉为例	谢国文, 杨平恒, 盛婷, 邓书金, 洪爱花 (3078)
漓江冲洪积扇地下水化学特征及控制因素分析	唐金平, 张强, 胡漾, 张宇, 聂保伟 (3089)
三峡库区蓄水期和非蓄水期附石藻类群落变化及其影响因子分析	付君珂, 刘黎, 贺新宇, 张红波, 董聪聪, 杨燕君, 施军琼, 吴忠兴 (3099)
降雨对香溪河库湾主要藻种原位生长的影响	翁传松, 刘德富, 张佳磊, 龚川, 沈旭舟 (3108)
绿狐尾藻分解及其氮磷释放特征	童雄, 罗沛, 刘锋, 黄敏, 陈哲, 肖润林, 吴金水 (3118)
微藻固定化条件优化及其污水氨氮去除潜力分析	刘祥, 王婧瑶, 吴娟娟, 彭飞, 王凯军 (3126)
钛酸盐纳米管对水中氨氮的吸附特性	张政, 冯长生, 张晓瑞, 郑建奎, 蒋彩云, 李攀杰, 王玉萍 (3135)
基于缺陷重构的类芬顿光催化剂在降解染料废水中的应用	唐清文, 安晓强, 兰华春, 刘会娟, 李海翔 (3146)
N 原子杂化石墨烯高效活化过一硫酸盐降解 RBK5 染料废水	于永波, 黄湾, 董正玉, 吴丽颖, 张倩, 洪俊明 (3154)
Cu ²⁺ 对以 NO ₃ ⁻ 为电子受体反硝化过程的影响	买文可, 彭永臻, 吉建涛 (3162)
CANON 中试反应器启动及性能优化	孙庆花, 吴迪, 周家中, 郑志佳 (3169)
好氧段碳源浓度对同步去除和富集磷酸盐生物膜的影响	徐林建, 潘杨, 章豪, 冯鑫, 魏攀龙, 尤星怡 (3179)
有机物特性对 AAO 系统污泥沉降性能的影响	刘小博, 袁林江, 陈希, 薛欢婷 (3186)
不同污泥浓度下缺氧 FNA 对硝化菌活性的影响	吕心涛, 周桐, 田夏迪, 谷鹏超, 杨岸明, 王佳伟, 张树军 (3195)
ANAMMOX 菌铁自养反硝化工艺的稳定性	张文静, 黄勇, 毕贞, 胡羽婷, 董石语 (3201)
在线 NaClO 反洗对倒置 A ² O-MBR 系统微生物群落的影响	王旭东, 高森, 王莹莹, 杨永哲, 刚家斌, 符国力, 王磊 (3208)
基于有机物释放和经济性的污泥预处理方法评价	袁悦, 谭学军, 郑舍予 (3216)
北京市清水与再生水协同利用优化模型	张田媛, 谭倩, 王淑萍 (3223)
N-亚硝胺在不同处理工艺污水处理厂中的分布及其去除	柳王荣, 赵建亮, 杨愿愿, 姚理, 刘有胜, 应光国 (3233)
北京市生活污水中曲马多和芬太尼的赋存	周子雷, 杜鹏, 白雅, 韩胜, 黄红梅, 徐泽琼, 李喜青 (3242)
贵阳市污水处理厂中典型抗生素的污染水平及生态风险	杨钊, 李江, 张圣虎, 向福亮, 唐涛涛, 杨娅红 (3249)
紫色土丘陵区畜禽养殖场土壤中抗生素抗性基因分布特征	程建华, 唐翔宇, 刘琛 (3257)
四环素对污泥蚯蚓粪中微生物种群和抗性基因的影响	陈景阳, 夏慧, 黄魁, 吴颖 (3263)
热水解污泥厌氧消化过程中肠球菌抗生素抗性基因与毒力基因的转归	李慧莉, 裴媛玫, 李姗, 何芙蓉, 杨月婷, 魏源送, 佟娟 (3270)
鸡粪与中药渣共堆肥对抗生素抗性基因的影响	武晋萍, 陈建文, 刘勇, 张红, 李君剑 (3276)
宁武亚高山湖泊细菌群落的时空格局及驱动机制	王雪, 刘晋仙, 柴宝峰, 罗正明, 赵鹏宇, 暴家兵 (3285)
石家庄市春季景观水体 nirS 型反硝化细菌群落特征分析	张艺冉, 李再兴, 孙悦, 霍然, 孟文茹, 王凌霄, 申邵恒, 杨子程, 周石磊 (3295)
磷差异性调控水稻根际 nirK/nirS 型反硝化菌组成与丰度	湛钰, 高丹丹, 盛荣, 魏文学, 秦红灵, 张文钊, 侯海军, 汤亚芳 (3304)
会仙岩溶湿地、稻田与旱地土壤细菌群落结构特征比较	贾远航, 靳振江, 袁武, 程跃扬, 邱江梅, 梁锦桃, 潘复静, 刘德深 (3313)
湘中典型稻田系统 Cd 平衡分析	蒋凯, 邓潇, 周航, 龙坚, 李欣阳, 董霞, 王树兵, 刘文辉, 侯红波, 彭佩钦, 廖柏寒 (3324)
改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响	李义纯, 王艳红, 唐明灯, 巫彬芳, 李林峰, 艾绍英, 凌志祥 (3331)
重金属固定植物促生细菌的筛选及其阻控小麦富集重金属效应	韩辉, 王晓宇, 蔡红, 姚伦广, 蔡倩迪, 王逸雪, 陈兆进 (3339)
不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异	彭秋, 李桃, 徐卫红, 焦璐琛, 邓继宝 (3347)
添加磷对水稻-油菜轮作土壤 N ₂ O 排放影响	孙正, 苏荣琳, 徐鹏, 吴宏涛, 胡金丽, 赵劲松, 胡荣桂 (3355)
渭北旱原土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳的影响	刘杰, 马艳婷, 王宪玲, Sompouviset Thongsouk, 李利敏, 秦亚旭, 赵志远, 郑伟, 翟丙年 (3361)
不同土地利用类型的土壤中多环芳烃的纵向迁移特征	鲁垠涛, 向鑫鑫, 张士超, 刘明丽, 王静, 李爽, 姚宏, 孙绍斌 (3369)
西湖景区土壤中邻苯二甲酸酯污染水平、来源分析和空间分布特征	廖健, 邓超, 陈怡, 周文钊, 林春绵, 张辉 (3378)
生物炭对壤土土壤容重和团聚体的影响	李倩倩, 许晨阳, 耿增超, 张久成, 陈树兰, 王慧玲, 张妍, 负方悦, 杨林, 董胜虎 (3388)
《环境科学》征订启事 (3194)	《环境科学》征稿简则 (3222)
信息 (3256, 3284, 3323)	

不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异

彭秋, 李桃, 徐卫红*, 焦璐琛, 邓继宝

(西南大学资源与环境学院, 重庆 400715)

摘要: 前期试验对 91 个辣椒品种资源进行筛选, 以高积 Cd 型品种 (X55)、中积 Cd 型品种 (27) 和低积 Cd 型品种 (17) 各一份, 采用盆栽试验研究不同镉水平 (0、5 和 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Cd}$) 下 3 个品种辣椒 Cd 转移和富集能力差异以及镉在果实中亚细胞分布和形态特征。结果表明, Cd 胁迫下, 辣椒地上部干重在种间表现为品种 X55 > 17 > 27。果实 Cd 转移系数在同一 Cd 水平下均表现为品种 17 > 27 或 X55。辣椒果实各亚细胞组分中 Cd 含量在种间表现为品种 27 > 17 > X55。辣椒根、茎、叶和果各亚细胞组分中 Cd 含量均表现为细胞壁 (F1) > 细胞器 (F2) > 细胞可溶性组分 (F3), Cd 被限制在细胞壁中, 在辣椒 Cd 解毒机制和抗性中起重要作用。3 个品种辣椒果实各 Cd 化学形态含量随 Cd 处理水平的增加而增加, 且大小均表现为 $\text{Cd}_{\text{NaCl}} > \text{Cd}_{\text{HAC}} > \text{Cd}_{\text{R}} > \text{Cd}_{\text{HCl}} > \text{Cd}_{\text{W}} > \text{Cd}_{\text{E}}$ 。辣椒果实中的 Cd_{NaCl} 和 Cd_{HAC} 占比例较大可能是辣椒降低 Cd 生物毒性的一种防御机制。

关键词: 镉; 辣椒; 亚细胞分布; 转移系数; Cd 化学形态

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)07-3347-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201901112

Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper

PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong*, JIAO Lu-chen, DENG Ji-bao

(College of Resources and Environmental Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China)

Abstract: In a preliminary experiment, 91 pepper varieties were screened, and one variety each with high Cd accumulation (X55), medium Cd accumulation (Daguo 99), and low Cd accumulation (Luojiang 318) were selected to study the effect of different cadmium levels (0, 5, and 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Cd}$) on cadmium migration and enrichment ability, and its subcellular distribution and chemical form. The results showed that under the stress of Cd, shoot dry weight of pepper plants was in the order X55 > 17 > 27. At the same level of Cd, the Cd transfer coefficient of fruit was 17 > 27 and X55. Cadmium concentrations in each subcellular component of the pepper fruits were 27 > 17 > X55. Cadmium concentration in subcellular component of the roots, stems, leaves, and fruits of the pepper plants was in order of cell wall (F1) > organelle (F2) > cell soluble component (F3). Cadmium was limited in cell wall and plays an important role in detoxification mechanism and resistance of Cd in pepper plants. The morphological content of various Cd forms in the pepper fruits of the three varieties increased with the increase of Cd treatment level, in the order $\text{Cd}_{\text{NaCl}} > \text{Cd}_{\text{HAC}} > \text{Cd}_{\text{R}} > \text{Cd}_{\text{HCl}} > \text{Cd}_{\text{W}} > \text{Cd}_{\text{E}}$. Cd_{NaCl} and Cd_{HAC} account for a large proportion of Cd in pepper fruits, which may be an important defense mechanism for reducing the biological toxicity of Cd.

Key words: cadmium; pepper; subcellular distribution; migration coefficient; Cd chemical form

中国农田由于长期大量使用磷肥、城市垃圾、污泥及污灌等导致土壤 Cd 污染问题日趋严重。中国污灌农田已达到 140 万 hm^2 , 其中 1.4 万 hm^2 耕地受到 Cd 污染, 涉及 11 个省市的 25 个地区^[1]。中国土壤 Cd 污染居于点位超标率首位, 超标率达 7.0%^[2]。这些污染土壤绝大多数仍然在从事农业生产活动, 镉超标农产品报道日益增多, 镉污染问题严重影响了农产品的食用安全和人类健康^[3]。

中国是世界上辣椒种植和消费量最大的国家。近年来, 由于工业污染源的排放、农业生产中施用高 Cd 化肥等多种原因, 北京、上海和贵州等地的设施大棚和露天辣椒基地土壤 Cd 污染问题日趋严重^[4-6], 而辣椒又是 Cd 高积累蔬菜类, 导致辣椒 Cd 超标现象日益加剧。根据 2009 ~ 2018 年课题组对重庆市 9 个主城区市售 1 000 余个辣椒样品的分析检测, 辣椒果实中 Cd 含量范围在 0.22 ~ 1.89

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [国家 Cd 食品卫生限量标准 (GB 2526-2005) $\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$], Cd 超标率达 57.3%。

植物的 Cd 耐受机制主要分为两大类: 规避机制和耐受机制。规避机制是限制 Cd 的吸收, 并将其从植物组织中排出, 包括根际 pH 值的改变、有机酸的渗出和根尖黏液屏障的形成或细胞壁的固持作用等。耐受机制是植物能通过氨基酸、蛋白质或多肽与 Cd 结合, 积累、储存并固定。重金属被植物吸收以后, 会在植物的各个细胞、组织和器官中呈现出选择性分布, 减轻重金属的毒害作用, 如通过与金属结合并固持在植物细胞壁内和细胞内有机分

收稿日期: 2019-01-13; 修订日期: 2019-01-28

基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项 (CARS-23); 国家科技支撑计划项目 (2007BAD87B10); 国家重点研发计划项目 (2018YFD0201200)

作者简介: 彭秋 (1996 ~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与环境生态, E-mail: 970273474@qq.com

* 通信作者, E-mail: xuwei_hong@163.com

子螯合或区隔在液泡内等来克服重金属胁迫,在劣势条件下生存^[7].桉树根系对Cd的滞留和吸收限制作用、细胞壁内Cd的固持作用、可溶性组分中Cd的区隔化作用等都是其耐Cd的主要机制^[8].在美洲商陆的根和叶中,大部分Cd位于细胞壁和可溶性组分中^[9].Wu等^[10]对水培大麦根和叶的研究表明,亚细胞Cd同样主要分布在细胞壁中,并且各细胞组分中Cd含量均随营养液中Cd处理水平增加而显著升高.Wang等^[11]对大豆幼苗亚细胞Cd分布的研究表明,在大豆幼苗根系中,亚细胞Cd主要分布在根系细胞壁内,从而减少了重金属对植物细胞的伤害.细胞内镉的区隔作用能极大地影响了细胞内游离镉的水平,从而影响镉在植物体内的运动^[12].因此,Cd在植物中的亚细胞分布规律被认为是影响植物体内Cd迁移、积累特性和植物毒性的的重要因素,重金属毒性与其在植物细胞中的亚细胞分布有关.另一方面,重金属的植物毒性在一定程度上取决于其在植物中的生物活性.水溶性Cd分为无机和有机形式(分别由80%乙醇和去离子水提取),具有较高的迁移能力,对植物细胞毒性最大,其次是果胶和蛋白质结合Cd(用1 mol·L⁻¹ NaCl提取),氯化钠态、醋酸盐态及盐酸盐态等非活性态重金属对植物细胞毒性较小.早前陈贵青等^[13]报道Cd在植物体内的化学形态一般以氯化钠态为主,但王友保等^[14]报道三叶草和结缕草茎叶中Cu的主要形态为残渣态.

减少食物中的Cd含量最经济、最有效的方法就是通过选育Cd低积累作物品种来降低作物可食部位的Cd含量,目前通过选育镉低积累型水稻和小麦可以降低籽实镉含量,通过选育镉低积累型白菜可以降低白菜地上部镉含量等^[15].但由于作物Cd吸收积累机制的复杂性,目前Cd对植物的毒害及植物耐Cd机制尚存在分歧和争议,Cd低积累型作物在镉吸收转运过程及影响作物器官中镉含量的关键基因研究很少.本研究在前期筛选试验基础上,挑选出高积Cd型品种(X55)、中积Cd型品种(27)和低积Cd型品种(17)各一份,采用盆栽试验结合室内分析研究了在0、5和10 mg·kg⁻¹ Cd胁迫下3个品种辣椒Cd迁移富集、镉在辣椒亚细胞的分布和镉形态特征差异,通过探明不同Cd积累型辣椒耐Cd和低积Cd机制,以期对辣椒品种改良积累资料.

1 材料与方法

1.1 供试材料

前期试验对91个辣椒品种资源进行筛选,挑

选出高积Cd型品种(X55)、中积Cd型品种(27)和低积Cd型品种(17)各一份(X55由重庆市农科院蔬菜花卉研究所提供,品种27为大果99,购于湖南湘研种业有限公司,品种17为洛椒318,购于洛阳市诚研种业有限公司).供试土壤采自重庆市北碚区西南大学紫色土地.土壤pH 6.80;有机质13.880 g·kg⁻¹;CEC 30.700 cmol·kg⁻¹;全氮0.780 g·kg⁻¹;碱解氮53.330 mg·kg⁻¹;全磷0.550 g·kg⁻¹;速效磷17.070 mg·kg⁻¹;全钾21.310 g·kg⁻¹;有效钾含量84.810 mg·kg⁻¹;全镉0.102 mg·kg⁻¹,土壤有效镉<0.005 mg·kg⁻¹.

1.2 试验设计

模拟土壤Cd污染水平设0(CK)、5和10 mg·kg⁻¹这3个处理.将过40目筛风干土用Cd处理,以CdCl₂·2.5H₂O形式加入,且每盆土壤施入N、P和K肥(N为180 mg·kg⁻¹,以NH₄H₂PO₄和尿素的形式加入,P和K分别为100 mg·kg⁻¹和150 mg·kg⁻¹,以NH₄H₂PO₄和KCl加入)作底肥.将混合好的土壤装入塑料盆(直径×高=30 cm×25 cm,不漏底),每盆5 kg.加去离子水保持田间持水量的60%,置于室温平衡3周后,进行辣椒幼苗的移栽,每盆移栽2株幼苗.定植30 d开始开花坐果时追施尿素,定植40 d时追施KH₂PO₄.试验设5次重复,随机排列.在辣椒结果期,取新鲜植株根、茎、叶和果测定Cd亚细胞分布;剩余样品分根、茎、叶和果置于烘箱中105℃杀青15 min,再于75℃下烘至恒重.

1.3 测定方法

1.3.1 植株镉含量测定

将根、茎、叶和果实样品分别粉碎,称取1.000 g植物样品装入锥形瓶,采用HNO₃:HClO₄(4:1)混合酸消煮,采用原子吸收分光光度法(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定消煮液中Cd含量.检测限为0.005 mg·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.

$$\text{转运系数(TF)}^{[16]} = \frac{\text{果实 Cd 含量}(\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1})}{\text{根系 Cd 含量}(\mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1})}$$

$$\text{富集系数(BCF)}^{[17]} = \frac{\text{辣椒果实 Cd 含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}{\text{土壤 Cd 含量}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})}$$

1.3.2 土壤镉含量的测定

土壤全镉的测定采用HNO₃-HClO₄(体积比为5:1)消解,原子吸收分光光度法测定(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA).采用国家标准与技

术研究所提供土壤标准物质(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. 土壤有效态 Cd 含量采用 DTPA 浸提法提取(GBT 23739-2009), 原子吸收分光光度法测定(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)^[18].

1.3.3 植株亚细胞镉分布

植株亚细胞 Cd 含量测定参照 Weigel 等^[19]的方法. 分别将 1.0 g 的根、茎、叶和果的鲜样置于 50 mL 离心管中, 加入 15 mL 预冷的提取缓冲液[50 mmol·L⁻¹ Tris-HCl(pH 7.5), 250 mmol·L⁻¹ 蔗糖和 1 mmol·L⁻¹的二硫赤鲜醇]匀浆. 各器官不同细胞组分采用差速分级离心技术分离. 匀浆液于 4℃, 3 000 r·min⁻¹离心 15 min, 沉淀为细胞壁组分(F1), 上清液用缓冲液补充至同一体积于 4℃, 15 000 r·min⁻¹离心 30 min, 沉淀为细胞器组分(F2), 上清液为细胞液组分(F3). 将 F1、F2、F3 分别置于烘箱中 60℃ 烘干, 用于 Cd 含量的测定. Cd 含量采用 HNO₃:HClO₄(5:1)混合酸消煮, 消煮后所得 Cd²⁺ 溶液采用原子吸收分光光度法测定(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA). 检测限为 0.005 mg·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.

1.3.4 果实镉化学形态测定

新鲜果实 Cd 化学形态采用化学试剂逐步提取法^[9], 提取剂及提取顺序依次为:①80% 乙醇(E-F, 提取硝酸盐、氯化物等无机 Cd); ②去离子水[W-F, 提取水溶性 Cd、Cd-有机酸络合物和 Cd(H₂PO₄)₂]; ③1 mol·L⁻¹ 氯化钠溶液(NaCl-F, 提取果胶盐、蛋白质结合态或呈吸着态的 Cd); ④2% 醋酸(HAC-F, 提取难溶性的 Cd 磷酸盐); ⑤0.6 mol·L⁻¹盐酸(HCl-F, 提取草酸 Cd); ⑥最后

剩余为残留态 Cd. 具体操作步骤为:准确称取 2.000 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, 经蒸干后, 用体积比为 5:1 的 HNO₃:HClO₄混合液消解, 后转移定容, 采用原子吸收分光光度计(Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA)测定 Cd 含量.

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 23.0 进行统计分析.

2 结果与分析

2.1 不同镉水平对辣椒生物量的影响

品种 17 和 X55 地上部生物量随 Cd 水平的增加呈先增加后减少的趋势(表 1), 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下达到最大值, 和 0 mg·kg⁻¹ Cd 处理相比, 品种 17 和 X55 地上部干重分别增加 1.79% 和 15.91%. 在 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下 3 个品种植株根系和地上部生物量均显著低于 0 mg·kg⁻¹ Cd 处理, 和 0 mg·kg⁻¹ Cd 处理相比较, 品种 17、27 和 X55 根系干重分别减少 68.06%、59.65% 和 23.26%, 地上部干重分别减少 30.22%、31.45% 和 22.15%, 对根系生长抑制作用大于地上部. 其中根系生物量在 0、5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下差异显著($P<0.05$), 且在种间均表现为品种 17>27>X55, 在 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下 3 个品种根系生物量差异不显著, 在品种间表现为 X55>17>27. 不同 Cd 处理下辣椒茎生物量在 3 个品种间差异不显著, 在品种间表现为 X55>17>27. 不同 Cd 处理下地上部生物量在品种间差异不显著, 3 个辣椒品种每盆地上部干重为 7.430~11.656 g·pot⁻¹, 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下, 品种 X55 和 17 的地上部干重分别为

表 1 不同镉水平处理辣椒生物量的影响¹⁾

Table 1 Effects of different Cd levels on the biomass of pepper varieties

Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	品种	根干重 /g·pot ⁻¹	茎干重 /g·pot ⁻¹	叶干重 /g·pot ⁻¹	果实干重 /g·pot ⁻¹	地上部干重 /g·pot ⁻¹
0	17	1.46±0.05a	3.12±0.37a	6.86±0.57a	1.14±0.09c	11.12±0.86a
	27	1.20±0.06b	3.20±0.65a	3.93±0.03b	3.71±0.16a	10.84±0.79a
	X55	0.65±0.05c	3.60±0.23a	4.88±0.17b	1.58±0.07b	10.06±0.47a
5	17	1.17±0.02a	3.31±0.33b	7.01±0.08a	1.00±0.04b	11.32±0.45a
	27	0.74±0.07b	3.28±0.41b	4.10±0.05c	2.70±0.42a	10.08±0.04b
	X55	0.52±0.01c	5.24±0.33a	5.47±0.23b	0.95±0.04b	11.66±0.07a
10	17	0.47±0.02a	2.14±0.32b	4.62±0.38a	0.99±0.00b	7.76±0.70a
	27	0.49±0.01a	1.58±0.02b	3.80±0.05ab	2.06±0.22a	7.43±0.29a
	X55	0.50±0.06a	3.95±0.29a	3.32±0.27b	0.56±0.01c	7.83±0.56a

1) 不同小写字母表示在相同镉处理下不同辣椒品种的显著性差异($P<0.05$), 下同

11.656 g·pot⁻¹和 11.318 g·pot⁻¹显著高于品种 27 地上部干重;在 10 mg·kg⁻¹Cd 处理下,3 个品种地上部干重差异不显著,在种间表现为品种 X55 > 17 > 27.

2.2 不同镉水平处理植株镉含量的影响

不同 Cd 处理下 3 个品种辣椒根、茎、叶、果的 Cd 含量如表 2 所示,辣椒各部位 Cd 含量和植株总 Cd 含量随 Cd 水平的增加而增加(品种 X55 茎除外),和 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理相比较,品种 17、27 和 X55 植株总 Cd 含量在 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下分别增加 65.04%、43.99% 和 9.18%. 同一 Cd 水平下根、茎、果和植株总 Cd 含量在品种间存在显著差异,且在种间表现为品种 X55 > 27 > 17,果实 Cd 含量在品种间差异不显著.

2.3 不同镉水平处理不同辣椒品种对镉吸收转运能力的影响

不同 Cd 处理下 3 个品种辣椒果实 Cd 富集系数变化情况如表 2 所示,3 个品种辣椒果实 Cd 富集系数随 Cd 水平增加呈先增加后减少趋势,在 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下达到最大值,10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下有所减少. 和 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理相比较,10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下品种 17 和 27 的 Cd 转移系数分别减少 53.2% 和 68.1%,X55 的 Cd 转移系数增加了 22.2%;品种 17、27 和 X55 的 Cd 富集系数分别减少 57.02%、40.71% 和 32.90%. 果实 Cd 转移系数在品种间差异显著,同一 Cd 水平下均表现为品种 17 > 27 或 X55,5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下品种 17 果实的 Cd 转移系数分别是品种 27 和 X55 的 2.290 倍

表 2 不同镉水平对辣椒镉含量、转移及富集系数的影响

Table 2 Effects of different Cd treatments on Cd concentrations, factor of transport coefficient and bioconcentration in pepper varieties							
Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	品种	植株镉含量/mg·kg ⁻¹				转移系数	富集系数
		根	茎	叶	果		
0	17	—	—	—	—	—	—
	27	—	—	—	—	—	—
	X55	—	—	—	—	—	—
5	17	14.47 ± 0.75c	0.50 ± 0.03c	0.83 ± 0.02c	2.28 ± 0.01a	0.14 ± 0.02b	0.46 ± 0.00a
	27	28.59 ± 1.51b	5.63 ± 0.21b	6.24 ± 0.26b	1.97 ± 0.25a	0.25 ± 0.04a	0.39 ± 0.05a
	X55	54.74 ± 2.04a	6.38 ± 0.06a	8.79 ± 0.05a	1.95 ± 0.07a	0.06 ± 0.00b	0.39 ± 0.01a
10	17	26.47 ± 0.55c	0.54 ± 0.03c	0.88 ± 0.01c	1.96 ± 0.00b	0.16 ± 0.00b	0.20 ± 0.00b
	27	45.52 ± 1.04b	6.81 ± 0.23a	6.44 ± 0.14b	2.33 ± 0.19ab	0.22 ± 0.01a	0.23 ± 0.02ab
	X55	58.86 ± 2.96a	5.79 ± 0.12b	11.19 ± 1.01a	2.61 ± 0.08a	0.05 ± 0.01c	0.26 ± 0.01a

和 4.389 倍;10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下品种 17 果实的 Cd 转移系数分别是品种 27 和 X55 的 3.364 倍和 1.681 倍. 同一 Cd 处理下果实 Cd 富集系数在品种间差异不大.

2.4 不同镉水平对辣椒亚细胞镉分布的影响

3 个品种辣椒根、茎、叶和果各亚细胞组分 Cd 含量如表 3 所示,不同 Cd 处理下 3 个品种辣椒根、茎、叶和果各亚细胞组分中 Cd 含量均表现为细胞壁(F1) > 细胞器(F2) > 细胞可溶性组分(F3). 根、茎、叶和果各亚细胞组分中 Cd 含量随 Cd 水平的增加而增加. 其中同一 Cd 水平下,辣椒根、茎、叶和果各亚细胞组分中 Cd 含量在品种间存在显著差异,其中果实各亚细胞组分中 Cd 含量在种间表现为品种 27 > 17 > X55. 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下,品种 27 的 F1 含量分别是品种 17 和 X55 的 2.859 倍和 5.693 倍,F2 含量分别是品种 17 和 X55 的 3.631 倍和 5.533 倍,F3 含量分别是品种 17 和 X55 的 1.634 倍和 2.111 倍. 在 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下,品种 27 的 F1 含量分别是品种 17 和 X55 的 1.802 倍和 2.115 倍,F2 含量分别是品种 17 和 X55 的

1.950 倍和 2.520 倍,F3 含量分别是品种 17 和 X55 的 1.512 倍和 1.794 倍.

2.5 不同镉水平对辣椒果实镉化学形态的影响

在不同 Cd 处理水平下,3 个品种辣椒果实 Cd 化学形态均以氯化钠提取态(Cd_{NaCl})为主(图 1 和表 4). 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下,品种 17 果实镉 FDC 大小以 Cd_{NaCl}(88.06%) > Cd_{HAC}(6.98%) > Cd_R(2.77%) > Cd_{HCl}(1.65%) > Cd_W(0.29%) > Cd_E(0.26%);品种 27 果实镉 FDC 大小以 Cd_{NaCl}(85.17%) > Cd_{HAC}(6.42%) > Cd_R(6.22%) > Cd_{HCl}(1.64%) > Cd_W(0.28%) = Cd_E(0.28%);品种 X55 果实镉 FDC 大小以 Cd_{NaCl}(86.81%) > Cd_{HAC}(8.00%) > Cd_R(2.80%) > Cd_{HCl}(2.00%) > Cd_W(0.22%) > Cd_E(0.17%). 在 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下,品种 17 果实镉 FDC 大小以 Cd_{NaCl}(86.89%) > Cd_{HAC}(7.12%) > Cd_R(3.04%) > Cd_{HCl}(1.96%) > Cd_W(0.72%) > Cd_E(0.28%);品种 27 果实镉 FDC 大小以 Cd_{NaCl}(84.44%) > Cd_{HAC}(6.41%) > Cd_R(6.00%) > Cd_{HCl}(2.00%) > Cd_W(0.81%) > Cd_E(0.34%);品种 X55 果实镉 FDC 大小以 Cd_{NaCl}

表 3 不同 Cd 处理对辣椒根、茎、叶和果各亚细胞组分 Cd 含量的影响

Table 3 Effects of different Cd treatments on Cd content in the subcellular fraction of pepper roots, stems, leaves, and fruits					
部位	Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	品种	亚细胞组分镉含量/mg·kg ⁻¹		
			F1	F2	F3
根	5	17	15.04 ± 0.32c	3.72 ± 0.16c	1.88 ± 0.10c
		27	21.74 ± 2.37b	5.33 ± 0.07b	2.71 ± 0.11b
		X55	29.66 ± 2.12a	10.47 ± 0.11a	3.72 ± 0.05a
	10	17	31.97 ± 0.06c	6.82 ± 0.24c	2.72 ± 0.12c
		27	47.27 ± 1.91b	8.37 ± 0.10b	3.61 ± 0.19b
		X55	54.61 ± 3.26a	14.25 ± 0.74a	7.15 ± 0.01a
茎	5	17	5.73 ± 0.18c	4.74 ± 0.12c	0.36 ± 0.01c
		27	7.96 ± 0.24b	6.70 ± 0.18b	0.49 ± 0.04b
		X55	12.72 ± 0.36a	7.85 ± 0.12a	0.66 ± 0.03a
	10	17	14.53 ± 0.31b	6.28 ± 0.08c	0.52 ± 0.01b
		27	19.32 ± 0.69a	7.24 ± 0.07b	0.65 ± 0.02b
		X55	20.18 ± 0.40a	8.45 ± 0.39a	1.00 ± 0.14a
叶	5	17	3.07 ± 0.05c	1.35 ± 0.05b	0.21 ± 0.00c
		27	4.21 ± 0.11b	1.46 ± 0.01b	0.51 ± 0.01b
		X55	5.41 ± 0.16a	2.50 ± 0.04a	0.62 ± 0.02a
	10	17	6.86 ± 0.17b	2.01 ± 0.08c	0.22 ± 0.01c
		27	7.12 ± 0.08b	2.26 ± 0.03b	0.63 ± 0.03b
		X55	8.92 ± 0.09a	2.76 ± 0.01a	0.72 ± 0.01a
果	5	17	0.23 ± 0.03b	0.16 ± 0.00b	0.09 ± 0.00b
		27	0.65 ± 0.04a	0.58 ± 0.02a	0.15 ± 0.01a
		X55	0.11 ± 0.00c	0.11 ± 0.00c	0.07 ± 0.00b
	10	17	0.42 ± 0.01b	0.32 ± 0.01b	0.12 ± 0.00b
		27	0.76 ± 0.01a	0.62 ± 0.00a	0.18 ± 0.00a
		X55	0.36 ± 0.01c	0.25 ± 0.01c	0.10 ± 0.00c

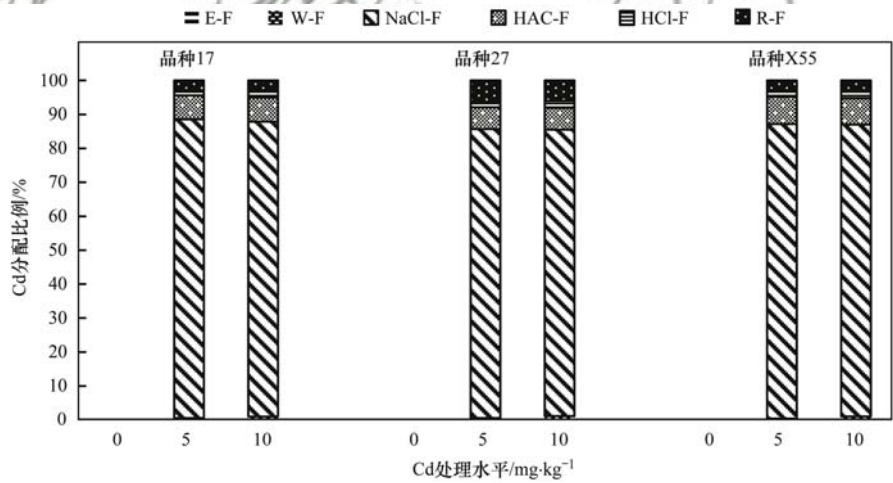


图 1 不同 Cd 处理下辣椒果实 Cd 化学形态分配比例

Fig. 1 Cd chemical fraction distribution coefficient(FDC) in pepper fruits under different Cd treatments

表 4 不同 Cd 处理对辣椒果实 Cd 化学形态的影响/mg·kg⁻¹

Table 4 Effects of different Cd treatments on Cd fractions of pepper fruits/mg·kg ⁻¹							
Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	品种	Cd _E	Cd _W	Cd _{NaCl}	Cd _{HAC}	Cd _{HCl}	Cd _R
0	17	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	27	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
	X55	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005	<0.005
5	17	0.02 ± 0.00a	0.03 ± 0.00b	7.58 ± 0.25b	0.60 ± 0.04a	0.14 ± 0.01ab	0.24 ± 0.05b
	27	0.03 ± 0.00a	0.03 ± 0.00a	8.64 ± 0.02a	0.65 ± 0.02a	0.17 ± 0.01a	0.63 ± 0.00a
	X55	0.01 ± 0.00b	0.01 ± 0.00c	5.24 ± 0.20c	0.48 ± 0.01b	0.12 ± 0.00b	0.17 ± 0.01b
10	17	0.03 ± 0.00b	0.07 ± 0.00ab	7.86 ± 0.06b	0.64 ± 0.02a	0.18 ± 0.01ab	0.28 ± 0.01b
	27	0.04 ± 0.00a	0.09 ± 0.00a	9.23 ± 0.28a	0.70 ± 0.04a	0.22 ± 0.02a	0.66 ± 0.01a
	X55	0.01 ± 0.00c	0.06 ± 0.00c	5.84 ± 0.06c	0.53 ± 0.01b	0.15 ± 0.01b	0.20 ± 0.00c

(86.02%) > Cd_{HAC} (7.76%) > Cd_R (2.96%) > Cd_{HCl} (2.22%) > Cd_W (0.83%) > Cd_E (0.21%)。3个品种辣椒各 Cd 化学形态 (Cd_{NaCl} 、 Cd_{HAC} 、 Cd_R 、 Cd_{HCl} 、 Cd_W 、 Cd_E) 含量随 Cd 处理水平的增加而增加, 且大小均表现为 $Cd_{NaCl} > Cd_{HAC} > Cd_R > Cd_{HCl} > Cd_W > Cd_E$ 。和 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理相比较, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下, 含量最多的 Cd_{NaCl} 在品种 17、27 和 X55 果实中分别增加 3.79%、6.80% 和 11.41%。在同一 Cd 处理下, 各 Cd 化学形态含量在品种间差异显著, 各 Cd 化学形态含量在种间表现为品种 27 > 17 > X55。在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下, 品种 27 的 Cd_{NaCl} 含量分别是品种 17 和 X55 的 1.140 倍和 1.648 倍; $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下, 品种 27 的 Cd_{NaCl} 含量分别是品种 17 和 X55 的 1.173 倍和 1.580 倍。

3 讨论

在大部分植物种类中, Cd 大量被区隔在根系的细胞壁中, 根通过对 Cd 的固持限制了 Cd 往地上部的运输, 植物根系金属含量较高可能是植物应对重金属胁迫的一种方式^[20]。植物对重金属的耐受性可以通过两种基本策略来控制: 排除和积累。排除意味着植物避免或限制金属的吸收, 而积累则直接关系到植物在组织内隔离金属的能力。高等植物通过叶或根的吸收而积累镉, Cd 进入植物主要通过根部吸收, 而根对 Cd 的固持限制了 Cd 往地上部的运输。本研究中, 相同 Cd 处理水平下, Cd 积累量在植株各部位间表现为根 > 茎 > 叶 > 果, 与 Barzanti 等^[21]的研究结果相似。在本研究中, 根系 Cd 累积量在品种间存在显著差异, 且在种间表现为 X55 > 27 > 17, 说明品种 X55 根系对 Cd 的保留能力最强。Xin 等^[22]研究也表明较耐 Cd 辣椒品种 YCT 根系比品种 JFZ 保留了更多的 Cd, 与本研究结果相类似。本研究中, 辣椒各部位 Cd 积累量随 Cd 处理的增加呈先增加后降低的趋势, 较耐 Cd 品种 X55 地上部 Cd 积累量最高, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下 Cd 积累量分别是品种 17 和 27 的 8.551 倍和 1.692 倍, $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下分别是品种 17 和 27 的 8.574 倍和 1.537 倍, 但品种 X55 地上部生物量最大, 说明 Cd 的高积累能力可能部分归因于其较多的生物量, 辣椒品种在果实中积累 Cd 的能力不同, 品种 X55 的果实 Cd 积累量在品种间最低, 且 X55 的 Cd 转移系数最小, 能更好地防止 Cd 从根部向果实部分的转移, 与 Xu 等^[23]的研究结果相类似。

细胞壁的区隔作用是植物对重金属的耐受性表

现之一。污染土壤中的重金属会被植物吸收进入体内, 转移并积累到植物地上部, 储存在不同的组织和细胞之间。植物对重金属的耐受性表现在细胞壁区隔作用, 或以低毒、无毒的形式贮存在细胞内等多种解毒机制上^[24]。其具有大量的蛋白质和多糖, 并提供给许多金属阳离子交换位点, 可以束缚重金属离子并限制金属离子跨膜运输进入细胞内部^[25]。本研究中, 不同 Cd 处理下 3 个品种辣椒根、茎、叶、果各亚细胞组分中 Cd 含量随土壤 Cd 水平的增加而增加, 并且根、茎、叶、果各亚细胞组分中 Cd 含量均表现为细胞壁 (F1) > 细胞器 (F2) > 细胞可溶性组分 (F3), 大部分的 Cd 都被限制在细胞壁中, 这样的解毒机制可以保护原生质体免受 Cd 的毒害, 说明辣椒细胞壁在 Cd 的区隔和抗性中起重要作用。然而, 由于多糖 (包括纤维素、半纤维素和果胶) 和细胞壁内的蛋白质并没有足够多的功能碱基来与 Cd 离子结合, 因此细胞壁对 Cd 的区隔能力通常是有限的^[9], 当植物受到 Cd 胁迫时, 一部分 Cd 会穿过细胞膜进入原生质^[9, 26]。液泡中重金属的区隔作用也是重要的植物重金属解毒和耐受机制^[27]。在原生质体中, 金属转运体可以将金属离子泵入液泡内或螯合金属在液泡内^[27], 使重金属远离代谢过程, 降低重金属毒性。本研究中, 品种 X55 具有良好的 Cd 积累能力和耐受能力, 说明辣椒可能具有其独特的细胞内 Cd 解毒机制。本研究中, 不同 Cd 处理下 3 个品种辣椒根、茎、叶、果各亚细胞组分中 Cd 含量随土壤 Cd 水平的增加而增加, 并且根、茎、叶和果各亚细胞组分中 Cd 含量均表现为细胞壁 (F1) > 细胞器 (F2) > 细胞可溶性组分 (F3), 大部分的 Cd 都被限制在细胞壁中, 这样的解毒机制可以保护原生质体免受 Cd 的毒害, 说明辣椒细胞壁在 Cd 的区隔和抗性中起重要作用。显然, 细胞壁可以束缚 Cd 离子并限制其跨膜转运^[25]。

无机和有机形式的 Cd 以及果胶/蛋白质结合 Cd 通常比不溶性 Cd 磷酸盐和草酸 Cd 具有更高的活性, 也更容易迁移, 因此对植物细胞毒性更大。Cd 的生物学功能与其化学形态有关, 化学形态可以通过指定的溶液提取^[9]。一般来说, 水溶性 Cd 分为无机和有机形式 (分别由 80% 乙醇和去离子水提取), 具有较高的迁移能力, 对植物细胞毒性最大, 其次是果胶和蛋白质结合 Cd (用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 提取), 而不溶性磷酸镉 (用 2% HAC 提取) 和草酸镉 (用 $0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 提取) 在植物细胞内的迁移性和毒性最小^[28, 29]。本研究中, 不同 Cd 处理水平下, 辣椒果实中的 Cd 主要为氯化钠提取态 Cd

(Cd_{NaCl}), 其次为醋酸提取态 Cd(Cd_{HAC}), 而乙醇和去离子水提取态 Cd 所占比例最少, 这与 Cd 超富集植物龙葵相似^[30].

4 结论

同一 Cd 处理水平下, 辣椒地上部 Cd 积累量在品种间表现为品种 X55 > 27 > 17, 而辣椒果实 Cd 积累量在品种间则表现为品种 27 > 17 > X55, 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 处理下, X55 果实 Cd 积累量分别比品种 17 和 27 少 19.39% 和 65.07%, 在 10 mg·kg⁻¹ Cd 处理下分别少 25.74% 和 69.61%. 辣椒果实 Cd 转移系数在同一 Cd 水平下均表现为品种 17 > 27 或 X55, 果实 Cd 富集系数在品种间差异不大. 辣椒果实各亚细胞组分中 Cd 含量在种间表现为品种 27 > 17 > X55. 辣椒根、茎、叶、果各亚细胞组分中 Cd 含量均表现为细胞壁(F1) > 细胞器(F2) > 细胞可溶性组分(F3), Cd 被限制在细胞壁中, 在辣椒 Cd 解毒机制和抗性中起重要作用. 3 个品种辣椒果实各 Cd 化学形态含量随 Cd 处理水平的增加而增加, 且大小均表现为 Cd_{NaCl} > Cd_{HAC} > Cd_R > Cd_{HCl} > Cd_w > Cd_E. 辣椒果实中的 NaCl 和 HAC 提取态 Cd 所占比例较大可能是辣椒降低 Cd 生物毒性的一种重要防御机制.

参考文献:

- [1] 崔力拓, 耿世刚, 李志伟. 我国农田土壤镉污染现状及防治对策[J]. 现代农业科技, 2006, (11): 184-185.
- [2] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. Chemosphere, 2017, **168**: 1658-1668.
- [3] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. 农业环境科学学报, 2012, **31**(7): 1257-1263.
Zhan J, Wei S H, Niu R C. Advances of cadmium contaminated paddy soil research and new measure of its safe production in China: A Review[J]. Journal of Agro-Environment Sciences, 2012, **31**(7): 1257-1263.
- [4] 王大州, 林剑, 王大霞, 等. 根际土-辣椒系统中重金属的分布及食品安全风险评价[J]. 地球与环境, 2014, **42**(4): 546-549.
Wang D Z, Lin J, Wang D X, *et al.* Distribution of heavy metals in the rhizospheric soil-capsicum system and risk assessment[J]. Earth and Environment, 2014, **42**(4): 546-549.
- [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.
Song B, Gao D, Chen T B, *et al.* A survey of chromium concentrations in vegetables and soils in Beijing and the potential risks to human health[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2006, **26**(10): 1707-1715.
- [6] 姚春霞, 陈振楼, 张菊, 等. 上海市浦东新区土壤及蔬菜重金属现状调查及评价[J]. 土壤通报, 2005, **36**(6): 884-887.
- [7] Yao C X, Chen Z L, Zhang J, *et al.* Heavy metal contents and evaluation of vegetable and soil in Pudong, Shanghai City[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, **36**(6): 884-887.
- [8] Clemens S. Molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis[J]. Planta, 2001, **212**(4): 475-486.
- [9] 韦月越, 蒙敏, 黄雪芬, 等. 桉树对矿区污染土壤中 Cu 和 Cd 的耐受机制[J]. 基因组学与应用生物学, 2016, **35**(1): 227-234.
Wei Y Y, Meng M, Huang X F, *et al.* Tolerance mechanisms of Cu and Cd by eucalyptus in mine contaminated soil [J]. Genomics and Applied Biology, 2016, **35**(1): 227-234.
- [10] Fu X P, Dou C M, Chen Y X, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L. [J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **186**(1): 103-107.
- [11] 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.
- [12] Wang P, Deng X J, Huang Y, *et al.* Comparison of subcellular distribution and chemical forms of cadmium among four soybean cultivars at young seedlings [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(24): 19584-19595.
- [13] Rao N K S, Shivashankara K S, Laxman R H. Abiotic stress physiology of horticultural crops [M]. New Delhi: Springer, 2016. 85-102.
- [14] 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.
Chen G Q, Zhang X J, Xu W H, *et al.* Effect of different zinc levels on accumulation and chemical forms of cadmium, and physiological characterization in *Capsicum annuum* L. [J]. Environment Science, 2010, **31**(7): 1657-1662.
- [15] 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.
Wang Y B, Zhang L, Shen Z J, *et al.* Chemical forms of heavy metals in the soils and plants of copper tailings yard[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, **16**(12): 2418-2422.
- [16] 付玉辉. Cd、Pb 低积累蔬菜品种筛选与修复技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [17] 孙园园, 关萍, 何杉, 等. 镉胁迫对多花黑麦草镉积累特征、生理抗性及其超微结构的影响[J]. 草业科学, 2016, **33**(8): 1589-1597.
Sun Y Y, Guan P, He S, *et al.* Effects of Cd stress on Cd accumulation, physiological response and ultrastructure of lolium multiflorum[J]. Pratacultural Science, 2016, **33**(8): 1589-1597.
- [18] 冯鹏, 孙力, 申晓慧, 等. 多年生黑麦草对 Pb、Cd 胁迫的响应及富集能力研究[J]. 草业学报, 2016, **25**(1): 153-162.
Feng P, Sun L, Shen X H, *et al.* Response and enrichment ability of perennial ryegrass under lead and cadmium stress[J]. Acta Prataculturalae Sinica, 2016, **25**(1): 153-162.
- [19] 赵明柳, 唐守寅, 董海霞, 等. 硅酸钠对重金属污染土壤性质和水稻吸收 Cd Pb Zn 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, **35**(9): 1653-1659.
Zhao M L, Tang S Y, Dong H X, *et al.* Effects of sodium silicate on soil properties and Cd, Pb and Zn absorption by rice plant [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, **35**(9): 1653-1659.
- [20] Weigel H J, Jäger H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants[J]. Plant Physiology, 1980, **65**(3): 480-482.
- [21] Khaliq A, Ali S, Hameed A, *et al.* Silicon alleviates nickel

- toxicity in cotton seedlings through enhancing growth, photosynthesis, and suppressing Ni uptake and oxidative stress [J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, **62**(5): 633-647.
- [21] Barzanti R, Colzi I, Arnetoli M, *et al.* Cadmium phytoextraction potential of different *Alyssum* species[J]. Journal of Hazardous Materials, 2011, **196**: 66-72.
- [22] Xin J L, Huang B F, Dai H W, *et al.* Roles of rhizosphere and root-derived organic acids in Cd accumulation by two hot pepper cultivars[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, **22**(8): 6254-6261.
- [23] Xu Z M, Tan X Q, Mei X Q, *et al.* Low-Cd tomato cultivars (*Solanum lycopersicum* L.) screened in non-saline soils also accumulated low Cd, Zn, and Cu in heavy metal-polluted saline soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(27): 27439-27450.
- [24] Rea P A. Phytochelatin synthase: of a protease a peptide polymerase made[J]. Physiologia Plantarum, 2012, **145**(1): 154-164.
- [25] Clemens S. Evolution and function of phytochelatin synthases [J]. Journal of Plant Physiology, 2006, **163**(3): 319-332.
- [26] Xue M, Zhou Y H, Yang Z Y, *et al.* Comparisons in subcellular and biochemical behaviors of cadmium between low-Cd and high-Cd accumulation cultivars of pakchoi (*Brassica chinensis* L.) [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2014, **8**(2): 226-238.
- [27] Tong Y P, Kneer R, Zhu Y G. Vacuolar compartmentalization: a second-generation approach to engineering plants for phytoremediation[J]. Trends in Plant Science, 2004, **9**(1): 7-9.
- [28] Weng B, Xie X Y, Weiss D J, *et al.* *Kandelia obovata* (S., L.) Yong tolerance mechanisms to Cadmium: Subcellular distribution, chemical forms and thiol pools[J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, **64**(11): 2453-2460.
- [29] Xu P X, Wang Z L. Physiological mechanism of hypertolerance of cadmium in *Kentucky bluegrass* and *tall fescue*: Chemical forms and tissue distribution [J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, **96**: 35-42.
- [30] Wei S H, Zeng X F, Wang S H, *et al.* Hyperaccumulative property of *Solanum nigrum* L. to Cd explored from cell membrane permeability, subcellular distribution, and chemical form[J]. Journal of Soils and Sediments, 2014, **14**(3): 558-566.



CONTENTS

Health Benefit Evaluation for Air Pollution Prevention and Control Action Plan in China	WU Wei-ling, XUE Wen-bo, WANG Yan-li, <i>et al.</i> (2961)
Scenario Simulation Study Constrained by the Ambient Air Quality Standards in Nanjing	XIE Fang-jian, SHI Zhi-hao, LI Jing-yi, <i>et al.</i> (2967)
Characteristics and Source Analysis of Water-Soluble Ions in PM _{2.5} in Zhengzhou	YANG Liu-ming, WANG Shen-bo, HAO Qi, <i>et al.</i> (2977)
Relationship Between Atmospheric Visibility and PM _{2.5} Concentrations and Distributions	WANG Ji-kang, ZHANG Heng-de, GUI Hai-lin, <i>et al.</i> (2985)
Characteristics of VOCs Emitted from the Rubber Tire Manufacturing Industry Based on the Inverse-Dispersion Calculation Method	BAI Hong-xiang, WEI Wei, WANG Ya-ting, <i>et al.</i> (2994)
Stable Carbon Isotope Compositions and Source Apportionments of Volatile Aromatic Compounds in the Urban Atmosphere of Taiyuan, China	LI Ying-hui, YAN Yu-long, LI Zhi-sheng, <i>et al.</i> (3001)
Spectral Distribution and Pollution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in the Air of an Office Building Clustered Area	WANG Lin, DENG Ya-jia, LIAO Xiao-yong, <i>et al.</i> (3008)
Characterizing Chromophoric Dissolved Organic Matter in Key Lakes in the Middle Reaches of the East Route of the South-North Water Diversion Project	ZHANG Liu-qing, PENG Kai, ZHOU Lei, <i>et al.</i> (3018)
Characteristics of Hydrogen and Oxygen Isotopes in Different Water Bodies in Hilly and Gully Regions of the Loess Plateau	ZHANG He-hui-zi, YU Kun-xia, LI Zhan-bin, <i>et al.</i> (3030)
Analysis of Total Organic Carbon Source Differences Between New and Old Cascade Reservoirs using Carbon and Nitrogen Isotopes	WANG Cong-feng, HU Zi-long, YANG Zheng-jian, <i>et al.</i> (3039)
Pollution Sources and the Stratification Effects on Water Quality in Lijiahe Reservoir	XU Jin, HUANG Ting-lin, LI Kai, <i>et al.</i> (3049)
Distribution and Potential Risk of Organochlorine Pesticides in the Soil of a Submerged Area Around Miyun Reservoir	WANG Xia, ZHANG Qing-zhuo, ZHAO Gao-feng, <i>et al.</i> (3058)
Distribution, Sources, and Ecological Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Waters of the Yinchuan Wetlands	TIAN Da-nian, DANG Li-hui, DING Run-mei, <i>et al.</i> (3068)
Comparison of the Geochemical Characteristics of Karst Springs of a Vertically Zoned Climate Region under Human Activity: A Case of Shuifang Spring and Bitan Spring in the Jinfo Mountain Area, Chongqing	XIE Guo-wen, YANG Ping-heng, SHENG Ting, <i>et al.</i> (3078)
Groundwater Chemical Characteristics and Analysis of Their Controlling Factors in an Alluvial Fan of Jianjiang River	TANG Jin-ping, ZHANG Qiang, HU Yang, <i>et al.</i> (3089)
Dynamics of Epilithic Algae Communities and Their Relationship with Environmental Factors During Storage and Non-storage Periods in the Three Gorges Reservoir	FU Jun-ke, LIU Li, HE Xin-yu, <i>et al.</i> (3099)
Influence of Rainfall on the <i>in situ</i> Growth of Dominant Algae Species in Xiangxi River	WENG Chuan-song, LIU De-fu, ZHANG Jia-lei, <i>et al.</i> (3108)
Decomposition of <i>Myriophyllum aquaticum</i> and the Associated Release of Nitrogen and Phosphorus	TONG Xiong, LUO Pei, LIU Feng, <i>et al.</i> (3118)
Optimization of the Parameters for Microalgae Immobilization and Analysis of Its Recovery Potential for Ammonia Nitrogen in Wastewater	LIU Xiang, WANG Jing-yao, WU Juan-juan, <i>et al.</i> (3126)
Ammonium Adsorption Characteristics in Aqueous Solution by Titanate Nanotubes	ZHANG Zheng, FENG Chang-sheng, ZHANG Xiao-nui, <i>et al.</i> (3135)
Application of Fenton-like Photocatalysts Based on Defect Reconstruction in Degradation of Dye Wastewater	TANG Qing-wen, AN Xiao-qiang, LAN Hua-chun, <i>et al.</i> (3146)
Degradation of RBK5 with Peroxymonosulfate Efficiently Activated by N-Doped Graphene	YU Yong-bo, HUANG Wan, DONG Zheng-yu, <i>et al.</i> (3154)
Effect of Cu ²⁺ on Denitrification Using NO ₂ ⁻ as an Electron Acceptor	MAI Wen-ke, PENG Yong-zhen, JI Jian-tao (3162)
Start-up and Performance Optimization of a CANON Pilot Reactor	SUN Qing-hua, WU Di, ZHOU Jia-zhong, <i>et al.</i> (3169)
Effects of Aerobic Carbon Sources on Biofilm with Simultaneous Phosphate Removal and Enrichment	XU Lin-jian, PAN Yang, ZHANG Hao, <i>et al.</i> (3179)
Effect of Organic Characteristics on Sludge Settability in an AAO System	LIU Xiao-bo, YUAN Lin-jiang, CHEN Xi, <i>et al.</i> (3186)
Effect of Free Nitrous Acid on the Activity of Nitrifying Bacteria in Different Sludge Concentrations Under Anoxic Conditions	LÜ Xin-tao, ZHOU Tong, TIAN Xia-di, <i>et al.</i> (3195)
Stability of ZVI-dependent Autotrophic Denitrification by ANAMMOX Bacteria	ZHANG Wen-jing, HUANG Yong, BI Zhen, <i>et al.</i> (3201)
Effect of On-line NaClO Backwashing on Microbial Communities in an Inverted A ² O-MBR System	WANG Xu-dong, GAO Miao, WANG Ying-ying, <i>et al.</i> (3208)
Evaluation of Organic Matter Release and Economy for Various Pretreatments of Sewage Sludge	YUAN Yue, TAN Xue-jun, ZHENG She-yu (3216)
Model-based Optimization for the Coordinated Supply of Clear and Reclaimed Water in the Central Districts of Beijing, China	ZHANG Tian-yuan, TAN Qian, WANG Shu-ping (3223)
Occurrence and Removal of N-nitrosamines in the Wastewater Treatment Plants Using Different Treatment Processes	LIU Wang-rong, ZHAO Jiang-liang, YANG Yuan-yuan, <i>et al.</i> (3233)
Occurrence of Tramadol and Fentanyl Use in Domestic Wastewater in Beijing	ZHOU Zi-lei, DU Peng, BAI Ya, <i>et al.</i> (3242)
Pollution Level and Ecological Risk of Typical Antibiotics in Guiyang Wastewater Treatment Plants	YANG Zhao, LI Jiang, ZHANG Sheng-hu, <i>et al.</i> (3249)
Characteristics of Antibiotic Resistance Genes in Various Livestock Feedlot Soils of the Hilly Purple Soil Region	CHENG Jian-hua, TANG Xiang-yu, LIU Chen (3257)
Effects of Tetracycline on Microbial Communities and Antibiotic Resistance Genes of Vermicompost from Dewatered Sludge	CHEN Jing-yang, XIA Hui, HUANG Kui, <i>et al.</i> (3263)
Fate of Antibiotic Resistance Genes and Virulence Genes in Enterococci During Anaerobic Digestion Process of Thermal Hydrolyzed Sludge	LI Hui-li, PEI Yuan-mei, LI Shan, <i>et al.</i> (3270)
Effect of Co-composting of Chicken Manure with Chinese Medicinal Herbal Residues on Antibiotic Resistance Genes	WU Jin-ping, CHEN Jian-wen, LIU Yong, <i>et al.</i> (3276)
Spatio-temporal Patterns of Microbial Communities and Their Driving Mechanisms in Subalpine Lakes, Ningwu, Shanxi	WANG Xue, LIU Jin-xian, CHAI Bao-feng, <i>et al.</i> (3285)
Community Structure Characteristics of <i>nirS</i> Denitrifying Bacteria of Spring Typical Parkland Waterbodies in Shijiazhuang City	ZHANG Yi-ran, LI Zai-xing, SUN Yue, <i>et al.</i> (3295)
Differential Responses of Rhizospheric <i>nirK</i> - and <i>nirS</i> -type Denitrifier Communities to Different Phosphorus Levels in Paddy Soil	ZHAN Yu, GAO Dan-dan, SHENG Rong, <i>et al.</i> (3304)
Comparison of Soil Bacterial Community Structure Between Paddy Fields and Dry Land in the Huixian Karst Wetland, China	JIA Yuan-hang, JIN Zhen-jiang, YUAN Wu, <i>et al.</i> (3313)
Cd Balance Analysis of a Typical Rice Paddy System in Central Hunan	JIANG Kai, DENG Xiao, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (3324)
Effects of an Amendment on Cadmium Transportation in the Rhizosphere Soil-Rice System	LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, <i>et al.</i> (3331)
Isolation of Heavy Metal Immobilizing and Plant Growth-Promoting Bacteria and Its Effects on Reducing Heavy Metal Accumulation in Wheat	HAN Hui, WANG Xiao-yu, CAI Hong, <i>et al.</i> (3339)
Differences in the Cadmium-Enrichment Capacity and Subcellular Distribution and Chemical Form of Cadmium in Different Varieties of Pepper	PENG Qiu, LI Tao, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (3347)
Effect of Phosphorus Addition on N ₂ O Emissions from Rice-Rapeseed Rotation Soils	SUN Zheng, SU Rong-lin, XU Peng, <i>et al.</i> (3355)
Impact of Land Use Type on the Stability and Organic Carbon Content of Soil Aggregates in the Weibei Dryland	LIU Jie, MA Yan-ting, WANG Xian-ling, <i>et al.</i> (3361)
Vertical Distribution Characteristics of PAHs in Soils with Different Land Use Types During Rapid Urbanization	LU Yin-tao, XIANG Xin-xin, ZHANG Shi-chao, <i>et al.</i> (3369)
Pollution Levels, Sources, and Spatial Distribution of Phthalate Esters in Soils of the West Lake Scenic Area	LIAO Jian, DENG Chao, CHEN Yi, <i>et al.</i> (3378)
Impact of Biochar on Soil Bulk Density and Aggregates of Lou Soil	LI Qian-qian, XU Chen-yang, GENG Zeng-chao, <i>et al.</i> (3388)