

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性

张丽娟, 徐杉, 赵峥, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年2月

第42卷 第2期
Vol.42 No.2

目次

2013~2017年中国PM _{2.5} 污染防治的健康效益评估	张梦娇, 苏方成, 徐起翔, 张瑞芹, 魏煜, 谢刘震 (513)
区域气象条件和减排对空气质量改善的贡献评估	武文琪, 张凯山 (523)
2016年1月京津冀地区大气污染特征与多尺度传输量化评估	姚森, 张哈宇, 王晓琦, 杨书申 (534)
广州市2020年春节期间烟花爆竹燃放对空气质量的影响	裴成磊, 王宇骏, 毕燕茹, 廉秀峰, 周倩妮, 王在华, 马理, 李梅 (546)
长三角地区一次区域污染过程中细颗粒物的来源解析及其光学特性	夏丽, 朱彬, 王红磊, 康汉青 (556)
南京市不同天气过程下颗粒物中水溶性离子分布特征及其来源解析	张杨, 王红磊, 刘安康, 陈魁, 张艺馨, 刘思晗 (564)
天津市冬季气溶胶吸湿因子的粒径分布特征	丁净, 张裕芬, 郑乃源, 张会涛, 余卓君, 李立伟, 元洁, 唐森, 冯银厂 (574)
输送、滞留叠加海上回流的长时间沙尘天气影响判断及贡献分析	张哲, 乔利平, 周敏, 黄丹丹, 安静宇, 郭会琴, 王红丽, 黄成, 董赵鑫, 王书肖 (584)
洛阳市秋冬季PM _{2.5} 中多环芳烃的污染特征、来源解析及健康风险评价	齐静文, 张瑞芹, 姜楠, 李利萍, 苗青青 (595)
郑州市臭氧污染变化特征、气象影响及输送源分析	王旭东, 尹沙沙, 杨健, 袁明浩, 张瑞芹, 李亚松, 卢轩 (604)
基于正交试验的臭氧及其前体物的非线性响应及控制方案	李光耀, 陈强, 郭文凯, 张瑞欣, 夏佳琦 (616)
汽车工业区大气挥发性有机物(VOCs)变化特征及来源解析	叶露, 邵菁菁, 俞华明 (624)
兰州市高分辨率人为源排放清单建立及在WRF-Chem中应用评估	郭文凯, 李光耀, 陈冰, 夏佳琦, 张瑞欣, 刘晓, 朱玉凡, 陈强 (634)
2010~2017年四川省机动车污染物排放趋势分析	李媛, 石嘉诚, 陈军辉, 潘玉瑾, 周虹辉, 范武波, 叶宏, 钱骏, 刘政 (643)
珠江三角洲海陆交互沉积物中镉生物有效性及生态风险评价	王芳婷, 包科, 陈植华, 黄长生, 张彩香, 赵信文, 刘学浩 (653)
乌梁素海流域地表水中全氟化合物分布、来源及其生态风险	史锐, 毛若愚, 张梦, 吕永龙, 宋帅, 赵纪新 (663)
乌梁素海冰盖中微塑料的分布特征及其与盐度、叶绿素a的响应关系	王志超, 杨建林, 杨帆, 杨文焕, 李卫平, 李兴 (673)
张家口清水河拦沙坝对磷输移、滞留的影响	王维, 李叙勇 (681)
三峡水库典型支流磷素赋存形态特征及其成因	杨凡, 王丽婧, 纪道斌, 李虹, 李莹杰, 李鑫, 许杨, 田盼, 吴雅婷 (688)
巢湖沉积物氮磷分布及污染评价	王艳平, 徐伟伟, 韩超, 胡维平 (699)
巢湖南淝河河口底泥污染特征及疏浚决策	杨盼, 杨春晖, 马鑫雨, 尹洪斌 (712)
氧化强化对氢氧化钙原位固磷效果的影响	徐楚天, 李大鹏, 岳薇, 吴宇涵, 孙培荣, 汤尧禹, 黄勇 (723)
降雨径流事件对三峡水库香溪河库湾甲烷释放的影响	陈敏, 许浩震, 王雪竹, 肖尚斌 (732)
典型喀斯特河流-水-气界面二氧化碳交换特性及其营养调控因素	刘睿, 张静, 陈祖胜, 倪茂飞, 刘文胜 (740)
江苏省代表性水源地抗生素及抗性基因赋存现状	王飞龙, 程逸群, 胡晓东, 朱金鑫, 李轶 (749)
尾矿库水体环境抗生素抗性基因的分布特征	黄福义, 朱永官, 苏建强 (761)
涡河流域中部地区地下水化学特征及其成因分析	郑涛, 焦团理, 胡波, 龚建师, 侯香梦, 王赫生 (766)
天津七里海湿地水化学组成及主要离子来源分析	何明霞, 张兵, 夏文雪, 崔旭, 王中良 (776)
秸秆覆盖与氮减施对土壤氮分布及地下水氮污染影响	张万锋, 杨树青, 孙多强, 靳亚红, 姜帅, 刘鹏 (786)
环境DNA宏条形码监测湖泊真核浮游植物的精准性	张丽娟, 徐杉, 赵峰, 周小华, 冯庆, 杨江华, 李飞龙, 王志浩, 张效伟 (796)
浮游植物群落及粒径结构对光吸收特性的影响	黄新, 施坤, 张运林, 朱广伟, 周永强 (808)
松花江干流2014~2019年夏季着生藻类群落结构特征及其对环境因子的响应	于宗灵, 陈威, 赵然, 李中宇, 董英莉, 张蕊, 王业耀, 金小伟 (819)
汛期前后老鹳河干流人类干扰下浮游细菌多样性及功能预测	韩雪梅, 龚子乐, 杨晓明, 李玉英, 陈兆进, 朱会会, 王凡梅 (831)
两种典型PPCPs在潜流人工湿地中的季节性去除效果及降解产物	李超予, 杨怡潇, 张宁, 谢慧君, 胡振, 张建 (842)
人工生态系统对城市河流中抗生素和ARGs的去除	周海东, 黄丽萍, 陈晓萌, 李丹妍, 李昕, 崔锦裕 (850)
紫外氯胺组消毒供水系统中病毒微生物的分布特征	韩雪, 孙坚伟, 张力, 王哲明, 白晓慧 (860)
高炉水渣负载硫化纳米零价铁对水中土霉素去除	孙秋楠, 张荣斌, 邓曼君, 李远, 王学江 (867)
胺硫改性生物炭对水溶液中不同重金属离子的吸附特性及吸附稳定性	汪存石, 何敏霞, 周峰, 陈靛, 祝建中 (874)
电凝聚氧化耦合工艺的有机物处理特性及去除机制解析	谢新月, 许建军, 张少华, 刘雨果, 金鑫, 金鹏康 (883)
微米零价铁对剩余活性污泥和餐厨垃圾厌氧联合消化的加强效果及机制	陈圣杰, 姚福兵, 皮洲洁, 侯坤杰, 何丽, 李小明, 王东波, 杨麒 (891)
河南省典型工业区周边农田土壤重金属分布特征及风险评价	孟晓飞, 郭俊梅, 杨俊兴, 杨军, 郑国砥, 乔鹏炜, 卞建林, 陈同斌 (900)
南京市绿地土壤重金属分布特征及其污染评价	陈佳林, 李仁英, 谢晓金, 王红, 徐静, 邵京, 简静, 阿克居里·乌尔曼, 沈嘉, 央宗 (909)
复合改良剂FZB对砷污染土壤的修复效果	丁萍, 贺玉龙, 何欢, 余江 (917)
石灰配施有机物料修复酸性Cd污染稻田	李光辉, 成晴, 陈宏 (925)
叶面喷施纳米MnO ₂ 对水稻富集镉的影响机制	周一敏, 黄雅媛, 刘晓月, 李冰玉, 刘羽翼, 李卓晴, 王薪琪, 雷鸣 (932)
典型喀斯特地区土壤-作物系统镉的富集特征与污染评价	王锐, 邓海, 贾中民, 严明书, 周蛟, 董金秀, 王佳彬, 余飞 (941)
辣椒果实高中低镉累积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较	邵晓庆, 贺章味, 徐卫红 (952)
4种草本植物对镉的富集特征	陈迪, 李伯群, 杨永平, 和兆荣, 李雄 (960)
不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征	熊子怡, 郑杰炳, 王丹, 王富华, 王鑫燕, 王子芳, 高明 (967)
降雨变化对荒漠草原植物群落多样性与土壤C:N:P生态化学计量特征的影响	高江平, 赵锐锋, 张丽华, 王军锋, 谢忠奎 (977)
水分管理对水稻生长与根际激发效应的影响特征	林森, 肖谋良, 江家彬, 魏亮, 李科林, 刘守龙, 祝贞科, 葛体达, 吴金水 (988)
铜胁迫对小麦根系微域微生物群落的影响	葛艺, 徐民氏, 徐绍辉, 徐艳 (996)
臭氧污染、氮沉降和干旱胁迫交互作用对杨树叶和细根非结构性碳水化合物的影响	李品, 周慧敏, 冯兆忠 (1004)
颗粒物有机源示踪物的筛选与应用综述	李源速, 吴爱华, 童梦雪, 栾胜基, 李鸢 (1013)
《环境科学》征订启事 (522) 《环境科学》征稿简则 (722) 信息 (748, 899, 924)	

辣椒果实高中低镉积型对镉的富集、转运特性及在亚细胞分布特点比较

邵晓庆, 贺章咪, 徐卫红*

(西南大学资源与环境学院, 重庆 400715)

摘要: 基于前期试验对 91 个辣椒品种资源筛选并开展了 26 个辣椒品种全生育期土壤试验基础上, 挑选出 1 个辣椒果实高积 Cd 品种(X15)、1 个果实中积 Cd 品种(X39)和 2 个果实低积 Cd 品种(X45 和 X55), 采用盆栽试验结合室内分析研究了在 0、5 和 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫下辣椒果实不同积 Cd 型对 Cd 的富集、转运及积累特性, 以及镉在辣椒体内的化学形态和在亚细胞的分布特点。5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫对辣椒地上部生长有抑制作用, 但促进了品种 X15、X45 和 X55 根系生长。Cd 在辣椒果实的主要形态为活性较低的氯化钠提取态和醋酸提取态。辣椒根、叶和果实中亚细胞组分 Cd 含量大小顺序为细胞质 > 细胞壁 > 细胞器。在茎中亚细胞 Cd 含量大小顺序为细胞壁 > 细胞质 > 细胞器。Cd 在亚细胞的区隔化对镉胁迫下辣椒抗性起着重要作用。在 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫下, 茎和叶 Cd 含量在品种间大小顺序为 X39 > X15 > X55 > X45, 果实 Cd 含量大小顺序为 X15 > X39 > X55 > X45; 品种 X15 根系 Cd 含量在供试 4 个辣椒品种中最小, 但其果实 Cd 含量最大; 品种 X39 根、茎和叶 Cd 含量为供试 4 个辣椒品种中最高, 但其果实 Cd 含量低于品种 X15。果实中 Cd 含量取决于 Cd 向地上部转运能力和 Cd 在地上部再分配能力共同作用。

关键词: 镉; 辣椒; 化学形态; 转运和分配; 亚细胞分布

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)02-0952-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202007003

Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells

SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong*

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

Abstract: Peppers are a high Cd-enriched vegetable. On the basis of a preliminary screening experiment of 91 pepper varieties and soil culture experiments during the entire growth period of 26 varieties, a high Cd variety (X15), medium Cd variety (X39), and two low varieties (X45 and X55) were selected to study the effect of different cadmium levels (0, 5, and 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd) on enrichment, transport, and accumulation as well as its subcellular distribution and chemical form. Based on the results, 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of Cd inhibited shoot dry weights of four pepper varieties but increased the root dry weights of X15, X45, and X55 varieties. Sodium chloride-bound cadmium and acetate-bound cadmium are the main forms of cadmium in the pepper fruits. Subcellular cadmium concentrations in the roots, leaves, and fruits of pepper plants were ranked in order cytoplasm > cell wall > organelle, and in the stems the order was cell wall > cytoplasm > organelle. Cd compartmentalization plays an important role in pepper resistance to cadmium stress. Under dosages of 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd and 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd, Cd concentrations in stems and leaves were ranked in order X39 > X15 > X55 > X45, with fruit Cd concentrations ranked in order X15 > X39 > X55 > X45. The Cd concentration was lowest in the roots of X15 whereas this variety has the highest concentrations in its fruit. The Cd concentrations in the roots, stems, and leaves of X39 were the highest among the four varieties whereas the concentration in the fruit was lower than in the X15 variety. The concentration of Cd in pepper fruits depends on the Cd transport capacity redistribution ability to the shoots.

Key words: cadmium; pepper; chemical form; transport and distribution; subcellular distribution

镉(Cd)是一种具有很强的生物毒性和积累性的重金属^[1]。据文献[2]的报道, 土壤重金属镉(Cd)点位超标率占调查点位的 7%, 为无机污染物中点位超标率之最。郭畔等^[3]对沈阳新民菜地不同种植年限土壤重金属含量调查发现 26.8% 的土壤存在 Cd 超标现象。辣椒属于 Cd 高富集蔬菜类^[4]。近年来有报道指出辣椒果实以及辣椒制品也出现了 Cd 超标问题^[5,6]。李桃^[7]对重庆市 9 个主城区的市售辣椒果实进行了 Cd 含量分析, 发现辣椒果实中 Cd 含量范围在 0.22 ~ 1.89 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 超过了国家 Cd 食品卫生限量标准($\leq 0.05 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), Cd 超标

率达 57.3%。

植物根系能通过整合、区隔化作用或富集在细胞代谢不活跃区域, 或使 Cd 固持在植株根部, 阻止 Cd 向地上部的转运, 来降低重金属的毒性和在地上部积累^[8]。Mwamba 等^[9]比较了 Cd 在两个油菜品种的亚细胞分布, 发现大部分 Cd 都主要积累在可

收稿日期: 2020-07-01; 修订日期: 2020-07-30

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: 邵晓庆(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为植物营养与环境生态, E-mail: 1517703579@qq.com

* 通信作者, E-mail: xuwei_hong@163.com

溶性部分,在细胞壁中滞留较少,且与耐 Cd 性品种相比,Cd 敏感性品种表现出有更高比率的重金属进入代谢敏感部位. Xin 等^[10]的研究发现,与低积 Cd 辣椒品种相比,高 Cd 品种根系对 Cd 的吸收能力不强,但高 Cd 品种的根系对地上部分的 Cd 转运能力更强,果实中 Cd 含量与 Cd 向地上部分的迁移之间呈显著正相关. 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,Cd 主要分布在根系亚细胞的细胞壁内,从而减少了重金属对植物细胞的伤害.

重金属的植物毒性在一定程度上还取决于其在植物中的生物活性^[12]. 水溶性 Cd (80% 乙醇提取和去离子水提取) 的迁移能力较强,对植株毒害能力最大. Cd 与果胶结合或蛋白质结合态的 Cd ($1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 提取) 移动性较水溶性、有机酸 Cd 小,毒性较次;难溶性的镉-磷酸结合物 (2% HAc 提取态 Cd)、草酸镉 ($0.6 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 提取) 和残渣态 Cd 的迁移能力最小,对植物毒性最小^[13]. 早前陈贵青等^[14]的研究报道 Cd 在辣椒体内的化学形态一般以氯化钠提取态为主.

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^[15, 16]. 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研究很少. 笔者前期试验对 91 个辣椒品种资源进行筛选,并以辣椒植株高积 Cd 型品种 (X55)、中积 Cd 型品种 (27) 和低积 Cd 型品种 (17) 等品种开展了土培试验,发现辣椒植株镉积累特征与果实镉积累特征并不一致,即植株高积 Cd 型品种 X55 的果实 Cd 积累量为最低,而辣椒植株中积 Cd 型品种 27 (大果 99) 的果实 Cd 积累量为最高^[7]. 为了进一步探明辣椒果实不同 Cd 积累型 Cd 积累机制,为此,在 26 个辣椒品种全生育期盆栽试验基础上,挑选出 1 个辣椒果实高积 Cd 品种 (X15)、1 个果实中积 Cd 品种 (X39) 和 2 个果实低积 Cd 品种 (X45 和 X55),采用盆栽试验结合室内分析研究 0、5 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 胁迫下果实不同积 Cd 型辣椒对 Cd 的富集、转运及积累特性,以及镉在辣椒体内的化学形态和在亚细胞的分布特点,以期对辣椒品种选育积累资料.

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自西南大学农场. 土壤有机质为 $21.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮为 $0.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮为 60.2

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷 $0.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $26.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾 $15.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全镉 $0.12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效镉 $<0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 为 6.85.

供试辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 品种为 X15 (果实高积 Cd 品种)、X39 (果实中积 Cd 品种)、X45 和 X55 (果实低积 Cd 品种),辣椒种子由重庆市农科院蔬菜花卉研究所提供.

1.2 试验设计

模拟土壤 Cd 污染水平为 0、5 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 这 3 个处理. 称取 5 kg 风干后过 5 mm 筛的土壤装入避光塑料盆中 (直径 $\times$ 高 = $30 \text{ cm} \times 25 \text{ cm}$,不漏底),按试验设计加入不同水平 Cd 溶液 ($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$),充分混匀后,置于室温下平衡 2 周. 选取长势良好、大小一致和五叶一心的辣椒幼苗移栽,每盆移栽 2 株. 每个处理 3 次重复,随机排列. 每盆土壤施入氮 (N)、磷 (P_2O_5) 和钾 (K_2O) 肥用量分别为 180、100 和 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中磷、钾肥以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和 KCl 的形式加入,氮肥以 $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ 和尿素的形式加入,N 肥 60% 作基施,剩余 40% 分别在开花坐果期和结果期各追施 20%. 在辣椒结果期,取新鲜植株根、茎、叶和果测定 Cd 形态和亚细胞中 Cd 含量;剩余样品分根、茎、叶和果置于烘箱中 105°C 杀青 15 min ,再于 75°C 下烘至恒重.

1.3 测定方法

1.3.1 植株镉含量测定

将根、茎、叶和果实样品采用 $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4 = 4:1$ 的混合酸消煮,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的植株标准物质 (GBW # 08513) 及土壤标准物质 (GBW # 08303) 对测定结果进行质量监控. 所有测定植株样品的 Cd 回收率都要保证高于 95%,并且标准偏差 (RSD) 精度保证在 10% 以内.

转运系数 (TF) = 果实 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 根系 (茎、叶) Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[17]; 富集系数 (BCF) = 果实 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) / 土壤 Cd 含量 ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[17].

1.3.2 辣椒果实镉形态分级测定

采用连续浸取法浸取辣椒果实中 Cd 的化学形态^[8],原子吸收分光光度计 (Perkin Elmer SIMMA 6000, Norwalk, USA) 测定果实各形态 Cd 含量.

1.3.3 亚细胞 Cd 含量测定

采用差速离心法对辣椒各部位进行细胞亚组分分离^[18],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 辣椒生物量

由表 1 所示,在 5 mg·kg⁻¹和 10 mg·kg⁻¹ Cd 水平胁迫下,辣椒茎、叶和果实干重减少,分别较对照降低了 6.64% ~ 35.92%、0.50% ~ 29.71% 和 16.40% ~ 49.44%. 相同 Cd 处理水平下,辣椒地上部干重大小顺序为 X45 > X55 > X15 > X39. Cd 胁迫

对辣椒果实干重降低幅度最大,4 个辣椒品种果实干重降低幅度大小顺序为 X45 > X55 > X15 > X39.

在 5 mg·kg⁻¹和 10 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下,X15 和 X55 品种的根系干重分别较对照增加了 8.14% ~ 33.37% 和 19.60% ~ 63.64%. 在 5 mg·kg⁻¹和 10 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下,X39 品种的根系干重分别较对照减少了 22.59% ~ 32.70%. 在 5 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下,X45 品种根系干重较对照减少了 8.24%,但在 10 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下,X45 品种根系干重较对照增加了 18.44%.

表 1 镉胁迫对辣椒生物量的影响¹⁾

Table 1 Effects of Cd stress on the dry weight of pepper cultivars

品种	Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	生物量(干重)/g·pot ⁻¹				
		根	茎	叶	果	地上部
X15	0	1.291 ± 0.11c	33.19 ± 6.47a	5.55 ± 0.32a	9.11 ± 1.74a	47.85 ± 5.64a
	5	1.396 ± 0.17b	29.05 ± 2.11b	5.38 ± 0.37a	6.35 ± 1.32b	40.78 ± 2.90b
	10	1.722 ± 0.25a	29.47 ± 2.63b	5.16 ± 0.57b	6.17 ± 1.79b	40.79 ± 1.89b
X39	0	1.11 ± 0.24a	28.36 ± 4.74a	5.14 ± 0.57a	12.53 ± 3.51a	46.02 ± 5.72a
	5	0.86 ± 0.07b	19.12 ± 1.68b	3.92 ± 0.46b	10.48 ± 1.76b	33.51 ± 3.69b
	10	0.75 ± 0.07b	18.17 ± 3.56c	3.61 ± 0.17b	8.83 ± 1.31c	30.61 ± 3.87c
X45	0	1.28 ± 0.10b	41.62 ± 5.63a	6.64 ± 1.09a	9.93 ± 1.12a	58.19 ± 6.55a
	5	1.17 ± 0.13c	35.72 ± 3.02c	6.61 ± 0.69a	5.02 ± 1.14b	47.34 ± 3.25c
	10	1.52 ± 0.13a	38.86 ± 4.56b	6.45 ± 0.82a	5.50 ± 1.09b	50.81 ± 5.98ab
X55	0	1.00 ± 0.11c	37.91 ± 6.80a	6.94 ± 0.51a	10.28 ± 1.62a	55.12 ± 6.88a
	5	1.64 ± 0.16a	29.70 ± 2.63b	6.19 ± 1.03ab	6.49 ± 1.89c	42.37 ± 2.64b
	10	1.20 ± 0.16b	29.18 ± 3.16b	5.27 ± 0.44b	7.27 ± 0.61b	41.72 ± 3.06c

1) 所列结果为平均值 ± 标准偏差;不同小写字母表示同一品种不同处理之间差异达 0.05% 的显著水平 ($P < 0.05$),下同

2.2 辣椒镉含量

如表 2 所示,Cd 处理水平为 10 mg·kg⁻¹时,品种 X15、X39、X45 和 X55 根系中 Cd 含量分别较 5 mg·kg⁻¹时增加了 12.02%、13.68%、30.62% 和 1.3%;茎中 Cd 含量较 5 mg·kg⁻¹时增加了 40.36%、20.22%、26.74% 和 27.33%;品种 X15、X39、X45 和 X55 叶中 Cd 含量较 5 mg·kg⁻¹时增加了 28.21%、18.15%、12.27% 和 8.48%;品种 X15、

X39、X45 和 X55 果实中 Cd 含量较 5 mg·kg⁻¹时增加了 8.52%、16.35%、23.82% 和 17.39%. 相同 Cd 水平处理下,辣椒品种间茎及叶中 Cd 含量大小顺序为 X39 > X15 > X55 > X45,果实中 Cd 含量大小顺序为 X15 > X39 > X55 > X45. Cd 处理水平为 5 mg·kg⁻¹时,根系中 Cd 含量大小顺序为 X39 > X55 > X45 > X15,Cd 处理水平为 10 mg·kg⁻¹时,根系中 Cd 含量大小顺序为 X39 > X45 > X55 > X15.

表 2 不同 Cd 水平对辣椒 Cd 含量的影响/mg·kg⁻¹

Table 2 Effects of different Cd levels on Cd concentrations in pepper/mg·kg⁻¹

Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	品种	植株 Cd 含量			
		根	茎	叶	果
0	X15	—	—	—	—
	X39	—	—	—	—
	X45	—	—	—	—
	X55	—	—	—	—
5	X15	124.26 ± 24.31c	13.29 ± 1.052b	26.13 ± 0.81b	4.58 ± 0.39a
	X39	199.18 ± 2.85a	16.44 ± 1.146a	29.11 ± 0.08a	3.78 ± 0.34b
	X45	125.07 ± 5.869c	10.23 ± 0.297d	15.39 ± 1.07d	2.50 ± 0.16d
	X55	152.35 ± 7.036b	11.28 ± 0.242c	17.08 ± 0.31c	2.99 ± 0.04c
10	X15	145.31 ± 18.52d	18.42 ± 0.703b	36.10 ± 1.60ab	4.97 ± 0.01a
	X39	236.46 ± 13.051a	19.45 ± 1.017a	37.62 ± 1.37a	4.51 ± 0.04b
	X45	180.56 ± 8.922b	12.08 ± 0.029d	16.74 ± 0.47c	3.19 ± 0.32c
	X55	158.83 ± 4.506c	15.29 ± 0.876c	19.22 ± 0.84b	3.51 ± 0.14c

2.3 辣椒镉积累量

如表3所示,辣椒Cd积累能力大小顺序为茎>根>叶>果。当Cd处理为5 mg·kg⁻¹时,品种X55根系Cd积累量最高,是其余品种的1.44~1.7倍,品种间Cd积累量大小顺序为X55>X15>X39>X45。当Cd处理水平增大为10 mg·kg⁻¹时,X55根系Cd积累量有所降低,降幅达到23.8%;品种X15、X39和X45根系Cd积累量增幅分别为45.00%、3.21%和86.34%,辣椒根系Cd积累能力大小顺序为X45>X15>X55>X39。

在同一Cd水平处理下,不同辣椒品种茎中Cd积累能力大小顺序为X15>X45>X55>X39。随着Cd处理水平的增大,X15、X39、X45和X55在茎中Cd积累量增幅分别为40.59%、9.21%、28.45%和33.19%。在叶中不同品种Cd积累量大小顺序为X15>X39>X45>X55。当Cd水平为5 mg·kg⁻¹时,X39果实Cd积累量分别是X15、X45和X55的1.36、3.15和2.04倍。当Cd处理水平为10 mg·kg⁻¹时,X39果实Cd积累量分别是X15、X45和X55的1.3、2.27和1.56倍。

表3 不同Cd水平对辣椒各部位Cd积累量的影响
Table 3 Effects of different Cd levels on Cd accumulation in different parts of pepper

Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	品种	Cd 积累量(干样)/μg·pot ⁻¹				
		根	茎	叶	果	地上部
0	X15	—	—	—	—	—
	X39	—	—	—	—	—
	X45	—	—	—	—	—
	X55	—	—	—	—	—
5	X15	173.46±33.94b	385.98±30.55a	140.62±4.34a	29.06±2.45b	555.66±23.75a
	X39	171.41±2.45b	314.38±21.92d	114.16±0.29b	39.58±3.56a	468.11±18.65c
	X45	146.90±6.89c	365.38±10.61b	101.66±7.04d	12.53±0.82d	479.58±18.47b
	X55	249.94±11.54a	335.02±7.18c	105.67±1.91c	19.37±0.23c	460.06±9.32d
10	X15	250.18±31.89b	542.67±20.70a	186.23±8.25a	30.64±0.07b	759.54±28.88a
	X39	176.90±9.76d	353.33±18.48d	135.85±4.95b	39.84±0.34a	529.02±23.77d
	X45	273.73±13.53a	469.34±1.13b	107.97±3.01c	17.57±1.73d	594.88±0.15b
	X55	190.45±5.40c	446.22±25.56c	101.38±4.45d	25.49±1.03c	573.08±31.04c

2.4 辣椒果实转运系数和富集系数

如表4所示,Cd胁迫下,品种X15的BCF值最大,是其余的品种的1.21~1.83和1.10~1.56倍。同一Cd处理水平下,不同品种辣椒根系镉向果实部位转运能力不同。X15的TF_{根系-果实}值最大,且在Cd处理水平为5 mg·kg⁻¹和10 mg·kg⁻¹时,分别是其余品种的1.90~2.0和1.59~1.94倍。在Cd处理水平为5 mg·kg⁻¹和10 mg·kg⁻¹时,品种X39的TF_{茎-果实}值为供试4个辣椒品种中最小,分别为其他

的品种的24.61%~34.61%和15%~59.17%。在同一Cd处理水平下,品种X39的TF_{叶-果实}值为供试4个辣椒品种中最小,较其他品种降低了24.62%~34.62%和15%~59.17%。

2.5 辣椒果实镉形态比例

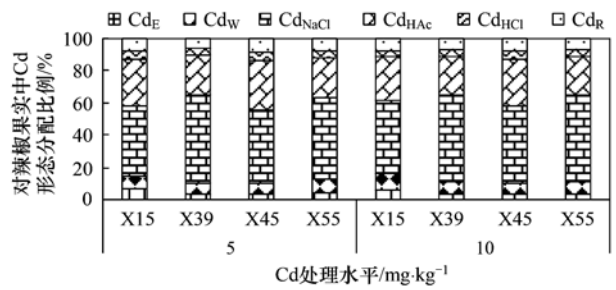
如表5和图1所示,在5 mg·kg⁻¹和10 mg·kg⁻¹ Cd胁迫下,辣椒果实中NaCl提取态Cd(Cd_{NaCl})所占比例最多,其次为HAc提取态Cd(Cd_{HAc})。品种X15果实Cd形态分配比例大小顺序为Cd_{NaCl}

表4 不同Cd处理水平下辣椒果实转运系数和生物富集比较
Table 4 Comparison of fruit transport coefficients and bio-enrichment at different Cd levels

Cd 处理水平 /mg·kg ⁻¹	品种	TF _{根系-果实}	TF _{茎-果实}	TF _{叶-果实}	BCF _{土壤-果实}
0	X15	—	—	—	—
	X39	—	—	—	—
	X45	—	—	—	—
	X55	—	—	—	—
5	X15	0.038±0.004a	0.349±0.057a	0.175±0.009a	0.915±0.077a
	X39	0.019±0.002b	0.232±0.037b	0.130±0.012c	0.756±0.068b
	X45	0.020±0.000b	0.244±0.009b	0.162±0.001b	0.499±0.033d
	X55	0.020±0.0001b	0.265±0.003b	0.175±0.001a	0.597±0.007c
10	X15	0.035±0.004a	0.27±0.011a	0.138±0.006bc	0.497±0.001a
	X39	0.019±0.001c	0.233±0.010b	0.120±0.003c	0.451±0.004b
	X45	0.018±0.001c	0.264±0.025a	0.191±0.024a	0.319±0.031d
	X55	0.022±0.000b	0.23±0.004b	0.182±0.001ab	0.351±0.014c

(43.04%~45.72%) > Cd_{HAc} (26.65%~29.65%) > Cd_W (8.31%~8.85%) > Cd_R (7.39%~7.98%) > Cd_E (6.29%~6.59%) > Cd_{HCl} (4.12%~4.42%), 品种 X39 果实 Cd 形态分配比例大小顺序为 Cd_{NaCl} (53.56%~54.86%) > Cd_{HAc} (24.64%~24.93%) > Cd_W (6.96%~7.41%) > Cd_R (6.39%~6.86%) > Cd_{HCl} (3.79%~3.92%) > Cd_E (3.07%~3.61%), 品种 X45 果实 Cd 形态分配比例大小顺序为 Cd_{NaCl} (45.8%~48.28%) > Cd_{HAc} (28.41%~30.45%) > Cd_R (7.72%~8.2%) > Cd_W (6.88%~7.24%) > Cd_{HCl} (5.36%~5.49%) > Cd_E (2.99%~3.18%), 品种 X55 果实 Cd 形态分配比例大小顺序为 Cd_{NaCl} (50.65%~53.42%) > Cd_{HAc} (23.87%~24.4%) >

Cd_W (7.74%~8.85%) > Cd_R (6.74%~7.88%) > Cd_{HCl} (4.24%~4.53%) > Cd_E (3.7%~4%) .



X15、X39、X45 和 X55 表示品种,下同
图 1 不同 Cd 处理水平对辣椒果实中 Cd 形态分配比例
Fig. 1 Cd morphology distribution ratio in pepper fruits under different Cd treatments

表 5 不同 Cd 处理水平对辣椒果实 Cd 形态的影响/mg·kg⁻¹

Table 5 Effects of different Cd treatments on the Cd morphology of pepper fruits/mg·kg⁻¹

Cd 处理水平	品种	Cd _E	Cd _W	Cd _{NaCl}	Cd _{HAc}	Cd _{HCl}	Cd _R
5	X15	0.145 ± 0.013a	0.182 ± 0.011b	0.944 ± 0.113b	0.650 ± 0.010a	0.097 ± 0.001ab	0.175 ± 0.010a
	X39	0.073 ± 0.011c	0.165 ± 0.007c	1.298 ± 0.105a	0.590 ± 0.060b	0.090 ± 0.006b	0.151 ± 0.008b
	X45	0.066 ± 0.006c	0.143 ± 0.001d	0.953 ± 0.050b	0.633 ± 0.050ab	0.114 ± 0.006a	0.171 ± 0.011a
	X55	0.091 ± 0.007b	0.203 ± 0.006a	1.16 ± 0.124ab	0.559 ± 0.030c	0.097 ± 0.009ab	0.180 ± 0.006a
10	X15	0.159 ± 0.010a	0.249 ± 0.009a	1.156 ± 0.028c	0.673 ± 0.020a	0.104 ± 0.007b	0.187 ± 0.007a
	X39	0.089 ± 0.006c	0.182 ± 0.063c	1.318 ± 0.043b	0.606 ± 0.022c	0.096 ± 0.013b	0.169 ± 0.002b
	X45	0.068 ± 0.006d	0.165 ± 0.004d	1.097 ± 0.059d	0.646 ± 0.038b	0.122 ± 0.001a	0.175 ± 0.015ab
	X55	0.103 ± 0.022b	0.216 ± 0.029b	1.470 ± 0.025a	0.666 ± 0.057ab	0.126 ± 0.002a	0.188 ± 0.004a

2.6 辣椒亚细胞镉分布比例

图 2 是辣椒各部位的各亚细胞组分中 Cd 含量的分配比例. 在 5 mg·kg⁻¹ 和 10 mg·kg⁻¹ Cd 胁迫下,品种 X15、X39、X45 和 X55 的根、茎、叶和果的亚细胞中,Cd 主要分布在可溶性组分中,分别占总量的 52.06%~52.46%、51.21%~55.78% 和

51.43%~53.76%, 70.35%~82.87%、59.48%~65.48% 和 56.26%~57.64%, 53.19%~68.83%、55.97%~61.09% 和 39.97%~53.41, 52.06%~70.62%、51.29%~53.62% 和 41.71%~42.76%. 其次为细胞壁,分别占总量的 26.81%~33.58%、37.47%~40.11% 和 35.57%~38.28%, 14.29%~

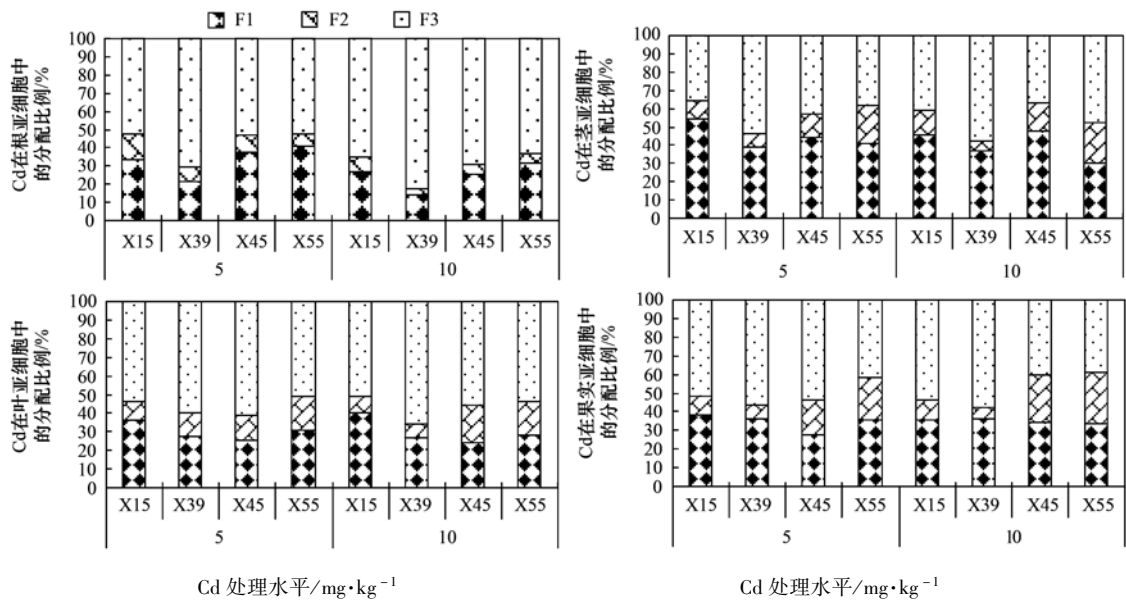


图 2 不同 Cd 处理下辣椒根、茎、叶和果实亚细胞组分 Cd 含量分配比例

Fig. 2 Distribution ratio of Cd content in subcellular components of pepper roots, stems, leaves, and fruits under different Cd treatments

21.25%、26.66% ~ 27.03% 和 35.53% ~ 36%, 25.32% ~ 37.65%、24.32% ~ 25.18% 和 27.76% ~ 34.39%, 35.12% ~ 40.64%、29.97% ~ 40.9% 和 35.57% ~ 36.85, 细胞器中 Cd 含量最少。总体而言供试 4 个辣椒品种根、叶和果的亚细胞组分中 Cd 含量比例均呈现出 F3(可溶性组分) > F1(细胞壁) > F2(细胞器)的特征。在品种 X15、X45 和 X55 辣椒茎中, Cd 主要聚集在细胞壁中, 分配比例分别为 45.56% ~ 54.51%、44.28% ~ 47.82% 和 29.97% ~ 40.9%, 辣椒茎亚细胞组分中 Cd 含量大小顺序为 F1 > F3 > F2。品种 X39 茎中亚细胞组分 Cd 分布比例规律与根、茎和叶表现一致。

3 讨论

有报道指出轻度 Cd 污染能够促进作物生长, 其可能原因为 Cd 离子在细胞分裂素的代谢过程中充当酶的激活剂, 从而加速植物生长^[19]。本试验中, Cd 胁迫下品种 X15、X45 和 X55 根系生物量有明显增加的趋势。但供试 4 个辣椒品种地上部生物量在 Cd 胁迫下生物量明显减少, 特别是对辣椒果实生物量影响较大, 与对照相比降低 16% 以上。同时, 辣椒品种间对镉胁迫的响应也表现出显著性差异, 相同 Cd 处理水平下, 辣椒地上部干重大小顺序为 X45 > X55 > X15 > X39。这进一步表明了植物种类、品种不同和土壤重金属含量差异会导致 Cd 对植物生长有不同的影响。

之前有报道显示 Cd 主要富集在植物根系, 可能是植物应对 Cd 胁迫的一种方式^[20]。在本研究中, Cd 胁迫下, 品种 X15、X39、X45 和 X55 体内 Cd 含量分布特征为根系 > 叶 > 茎 > 果, 与 Xin 等^[21]的研究结果一致, 说明辣椒根系能固定较多的 Cd 阻止 Cd 向地上部转运。在本研究中, 相较于其他品种, X15 根系 Cd 含量最低, 但在果实中 Cd 含量最高, 各器官向果实的转运能力较强。Xin 等^[10]的研究报道指出, 与低积 Cd 辣椒品种相比, 高 Cd 品种根系对 Cd 的吸收能力不强, 但高 Cd 品种的根系对地上部分的 Cd 转运能力更强, 果实中 Cd 含量与 Cd 向地上部分的迁移之间发现呈正相关。水稻籽粒中 Cd 含量与转运效率有关, 转运效率越大, Cd 在组织间的转运能力就越强, 对籽粒 Cd 积累的影响越大^[22]。因此, Cd 向地上部分的转运过程对于 Cd 在果实中的积累至关重要。而且果实 Cd 含量由茎、叶向果实的转运系数共同决定^[10]。本研究中不同 Cd 处理水平, 品种 X15 根系 Cd 含量在供试 4 个辣椒品种中最小, 但其果实 Cd 含量最大; 品种 X39 根、茎和叶 Cd 含量为供试 4 个辣椒品种中最高, 但其果

实 Cd 含量低于品种 X15, 品种 X39 的茎和叶向果实的转运系数也低于其它品种。说明 Cd 在地上部分的再分配对果实中 Cd 的积累也起着重要的作用^[10]。

本研究中, 辣椒果实中 NaCl 提取态 Cd(Cd_{NaCl}) 所占比例最多, 其次为 HAc 提取态 Cd(Cd_{HAc}), 这表明 Cd 与果实中果胶和蛋白质结合比例较高, 其次为不溶性磷酸态 Cd, 与前人研究结果一致^[23]。同时, 随着 Cd 胁迫浓度的增大, 品种 X15、X45 和 X55 的 Cd_{NaCl} 在辣椒果实中所占比例增大, 这可能是因为高浓度($10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Cd}$)胁迫下, 辣椒产生了某些防御机制, 降低果实水溶性 Cd 和有机酸 Cd 盐类比例^[24]。Cd 胁迫下, Cd_{HCl} 所占比例变化不大, 说明难溶性磷酸盐和草酸盐类物质在辣椒果实细胞壁中含量稳定且有限。

重金属在植物体内亚细胞的分布是决定重金属离子在植株体内毒性程度的重要因素^[25,26]。Mwamba 等^[9]比较了 Cd 在两个油菜品种的亚细胞分布, 发现大部分 Cd 都主要积累在可溶性部分, 在细胞壁中滞留较少, 且与耐 Cd 性品种相比, Cd 敏感性品种表现出有更高比率的重金属离子进入代谢敏感部位。镉在马缨丹根和叶细胞可溶性组分中的分配比例最多, 其次为细胞壁, 最后为细胞器, 表明可溶型组分和细胞壁是 Cd 在马缨丹根和叶细胞中的主要分布位点, 液泡区镉化和细胞固持可能是马缨丹对 Cd 的重要解毒机制之一^[27]。细胞壁和液泡是金属离子最主要的储存部位^[28,29]。细胞壁主要由多聚糖和蛋白质组成, 其表面存在的负电荷位点可与 Cd 离子结合, 限制 Cd 离子进行跨膜运输, 是保护细胞原生质体的第一道屏障^[8]。同样地, 液泡是重金属被细胞质整合后储存的重要场所^[30]。液泡占细胞总体积的 90%^[31], 已有研究证实, 液泡中含有富硫肽和有机酸是液泡运输和储存金属离子两个重要的物质^[27]。这两种物质可通过配位络合作用与金属离子形成有机配合体, 并储存在液泡中, 从而降低金属离子的活性和毒性^[32]。在本试验中, 供试 4 个辣椒品种根、叶和果的亚细胞组分中 Cd 含量随 Cd 处理水平的增加而增加(除 X39 外), 且根、叶和果中各亚细胞组分 Cd 含量均表现为细胞质(F3) > 细胞壁(F1) > 细胞器(F2)。大多的 Cd 区隔和限制在辣椒的液泡和细胞壁中。这样可以保护辣椒细胞质免受 Cd 的毒害, 可见, Cd 的区隔化作用对辣椒的抗性中起着重要作用。在本试验中, 随着 Cd 处理水平的增大, 除个别品种的一些器官外, 剩余品种的各部位中 F1 和 F2 组分 Cd 含量减少, F3 组分 Cd 含量呈上升趋势。陈亚慧等^[33]报道了在 10 ~ 50

$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{Cd}$ 处理下,根系细胞壁分配比例呈上升趋势,与本研究结果不一致。这可能是因为不同基因型植株对 Cd 的贮存位点不同,辣椒根系可能主要是通过液泡的区隔化来减轻 Cd 对植株的伤害。植物细胞中 Cd 的亚细胞分布会影响 Cd 在植株体内的移动性,根系细胞中可溶性部分镉的相对含量较多的植株,其地上部积累的 Cd 也较多^[34]。在本试验中,相较于品种 X15、X45 和 X55,品种 X39 的根、茎和叶中 F3 组分分配比例最高,而茎和叶中 Cd 含量最高,验证了该结论。不同辣椒品种间,以品种 X15 根系中 Cd 含量最低,但其茎和叶 Cd 含量仅次于品种 X45 和 X55,且果实 Cd 含量高于其余品种,这可能是因为品种 X45 和 X55 细胞中含有较多的巯基化合物络合大量自由态 Cd,形成复合物区隔在液泡中,减小 Cd 离子向植株下一节点的运输^[35],同时 F1 组分 Cd 含量在品种 X45 茎、叶和果中随 Cd 处理水平的增大而增大,说明较其他品种,品种 X45 细胞壁可能结合了更多的 Cd,从而减轻了 Cd 毒害以及限制了 Cd 在植株体内的转运行为。

4 结论

Cd 在辣椒果实的主要形态为活性较低的氯化钠提取态和醋酸提取态。辣椒根、叶和果实中亚细胞组分 Cd 含量大小顺序为细胞质>细胞壁>细胞器。在茎中亚细胞 Cd 含量大小顺序为细胞壁>细胞质>细胞器。Cd 在亚细胞的区隔化对镉胁迫下辣椒抗性起着重要作用。果实中 Cd 含量取决于 Cd 向地上部转运能力和 Cd 在地上部再分配能力共同作用。品种 X15 果实镉含量及果实富集系数(BCF)最大、品种 X45 果实镉含量及果实富集系数(BCF)最小。在中低镉污染土壤上应避免选择果实高镉生物富集品种 X15,栽培果实低镉富积品种 X45 可降低辣椒可食部位镉污染风险。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Zhang C L, Chen Y Q, Xu W H, et al. Resistance of alfalfa and Indian mustard to Cd, and the correlation of plant Cd uptake and soil Cd form[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**:13804-13811.
- [3] 郭畔, 宋雪英, 刘伟健, 等. 沈阳市新民设施菜地土壤重金属污染特征分析[J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(4): 835-844.
- [4] Guo P, Song X Y, Liu W J, et al. Contamination characteristics of heavy metals in greenhouse vegetable fields of Xinmin, Shenyang City, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 835-844.
- [5] Wang C L, Xu W H, Li H, et al. Effects of zinc on physiologic characterization and cadmium accumulation and chemical forms in different varieties of pepper [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2013, **18**(6): 541-548.
- [6] 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估[J]. *地球与环境*, 2014, **42**(4): 546-549.
- [7] 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.
- [8] Wang C L, Xu W H, Li H, et al. Effects of zinc on physiologic characterization and cadmium accumulation and chemical forms in different varieties of pepper [J]. *Wuhan University Journal of Natural Sciences*, 2013, **18**(6): 541-548.
- [9] 李桃. 不同品种辣椒镉胁迫耐受机制研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019.
- [10] Li T. Tolerance mechanism of different hot pepper cultivars to cadmium stress[D]. Chongqing: Southwest University, 2019.
- [11] 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.
- [12] Mwamba T M, Li L, Gill R A, et al. Differential subcellular distribution and chemical forms of cadmium and copper in *Brassica napus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, **134**: 239-249.
- [13] Xin J L, Huang B F, Liu A Q, et al. Identification of hot pepper cultivars containing low Cd levels after growing on contaminated soil: uptake and redistribution to the edible plant parts[J]. *Plant and Soil*, 2013, **373**(1-2): 415-425.
- [14] 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.
- [15] Zhao Y F, Wu J F, Shang D R, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in the edible seaweed, *Porphyra yezoensis* [J]. *Food Chemistry*, 2015, **168**: 48-54.
- [16] Wang X, Liu Y G, Zeng G M, et al. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Beckhamia nivea* (L.) Gaud [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **62**(3): 389-395.
- [17] 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.
- [18] 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]. *Environmental Science*, 2010, **31**(7): 1657-1662.
- [19] Mani A, Sankaranarayanan K. In silico analysis of natural resistance-associated macrophage protein (NRAMP) family of transporters in rice [J]. *The Protein Journal*, 2018, **37**(3): 237-247.
- [20] 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.
- [21] Zhuang P, Li Z A, Zou B, et al. Heavy metal contamination in soil and soybean near the dabaoshan mine, South China [J]. *Pedosphere*, 2013, **23**(3): 298-304.
- [22] Weigel H J, Jäger H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plants [J]. *Plant Physiology*, 1980, **65**(3): 480-482.
- [23] Feng D Y, Huang C R, Xu W H, et al. Difference of cadmium bioaccumulation and transportation in two ryegrass varieties and the correlation between plant cadmium concentration and soil

- cadmium chemical forms [J]. Wireless Personal Communications, 2020, **110**(1): 291-307.
- [20] 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, 2016, **62**(5): 633-647.
- [21] Xin J L, Huang B F, Dai H W, *et al.* Characterization of cadmium uptake, translocation, and distribution in young seedlings of two hot pepper cultivars that differ in fruit cadmium concentration [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, **21**(12): 7449-7456.
- [22] 张雯, 林匡飞, 周健, 等. 不同硫浓度下叶面施硒对水稻幼苗镉的亚细胞分布及化学形态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, **33**(5): 844-852.
- Zhang W, Lin K F, Zhou J, *et al.* Effects of selenium foliar spray on subcellular distribution and chemical forms of cadmium in rice seedlings in different sulfur concentrations[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, **33**(5): 844-852.
- [23] 彭秋, 李桃, 徐卫红, 等. 不同品种辣椒镉亚细胞分布和化学形态特征差异[J]. 环境科学, 2019, **40**(7): 3347-3354.
- Peng Q, Li T, Xu W H, *et al.* Differences in the cadmium-enrichment capacity and subcellular distribution and chemical form of cadmium in different varieties of pepper [J]. Environmental Science, 2019, **40**(7): 3347-3354.
- [24] 陆仲烟, 刘仲齐, 宋正国, 等. 大麦中镉的亚细胞分布和化学形态及 PCs 合成的基因型差异 [J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(11): 2125-2131.
- Lu Z Y, Liu Z Q, Song Z G, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of Cd and the synthesis of phytochelatins (PCs) in different barley genotypes [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, **32**(11): 2125-2131.
- [25] Yu Y, Fu P G, Huang Q Q, *et al.* Accumulation, subcellular distribution, and oxidative stress of cadmium in *Brassica chinensis* supplied with selenite and selenate at different growth stages[J]. Chemosphere, 2019, **216**: 331-340.
- [26] Zhang C L, Chen Y Q, Xu W H, *et al.* Resistance of alfalfa and Indian mustard to Cd and the correlation of plant Cd uptake and soil Cd form[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, **26**(14): 13804-13811.
- [27] 方继宇, 贾永霞, 张春梅, 等. 马缨丹对镉的生长响应及其富集、转运和亚细胞分布特点研究 [J]. 生态环境学报, 2014, **23**(10): 1677-1682.
- Fang J Y, Jia Y X, Zhang C M, *et al.* Effects of cadmium on growth response of *Lantana camara* L. and its accumulation, translocation and subcellular distribution of Cd[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, **23**(10): 1677-1682.
- [28] Ponton D E, Caron A, Hare L, *et al.* Hepatic oxidative stress and metal subcellular partitioning are affected by selenium exposure in wild yellow perch (*Perca flavescens*) [J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 608-617.
- [29] Weng B S, 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.
- [30] Lin Y F, Aarts M G M. The molecular mechanism of zinc and cadmium stress response in plants[J]. Cellular and Molecular Life Sciences, 2012, **69**(19): 3187-3206.
- [31] Pittman J K. Managing the manganese: molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis[J]. The New Phytologist, 2005, **167**(3): 733-742.
- [32] 李杉杉. 镉污染土壤高效钝化-植物阻控效果与机理研究 [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- Li S S. Effect and mechanism of Cd immobilization in Cd-contaminated farmland [D]. Beijing: China University of Geosciences (Beijing), 2019.
- [33] 陈亚慧, 刘晓宇, 王明新, 等. 蓖麻对镉的耐受性、积累及与镉亚细胞分布的关系 [J]. 环境科学学报, 2014, **34**(9): 2440-2446.
- Chen Y H, Liu X Y, Wang M X, *et al.* Cadmium tolerance, accumulation and relationship with Cd subcellular distribution in *Ricinus communis* L. [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, **34**(9): 2440-2446.
- [34] Xin J, Zhao X B, Tan Q L, *et al.* Comparison of cadmium absorption, translocation, subcellular distribution and chemical forms between two radish cultivars (*Raphanus sativus* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, **145**: 258-265.
- [35] 王芳, 丁杉, 张春华, 等. 不同镉耐受性水稻非蛋白巯基及镉的亚细胞和分子分布 [J]. 农业环境科学学报, 2010, **29**(4): 625-629.
- Wang F, Ding S, Zhang C H, *et al.* Non-protein thiols, subcellular and molecular distribution of cadmium in two rice cultivars with difference tolerance [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, **29**(4): 625-629.

CONTENTS

Health Impact Attributable to the Control of PM _{2.5} Pollution in China During 2013-2017	ZHANG Meng-jiao, SU Fang-cheng, XU Qi-xiang, <i>et al.</i> (513)
Contributions of Emissions Reduction and Regional Meteorological Conditions to Air Quality Improvement	WU Wen-qi, ZHANG Kai-shan (523)
Air Pollution Characteristics and Quantitative Evaluation of Multi-scale Transport in the Beijing-Tianjin-Hebei Region in January, 2016	YAO Sen, ZHANG Han-yu, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i> (534)
Influence of Burning Fireworks on the Atmosphere During the Spring Festival in Guangzhou in 2020	PEI Cheng-lei, WANG Yu-jun, BI Yan-ru, <i>et al.</i> (546)
Source Apportionment and Optical Properties of Fine Particles Associated with Regional Pollution in the Yangtze River Delta	XIA Li, ZHU Bin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (556)
Distribution Characteristics and Source Analysis of Water-soluble Ions in Particulate Matter Under Different Weather Processes in Nanjing	ZHANG Yang, WANG Hong-lei, LIU An-kang, <i>et al.</i> (564)
Size Distribution of Aerosol Hygroscopic Growth Factors in Winter in Tianjin	DING Jing, ZHANG Yu-fen, ZHENG Nai-yuan, <i>et al.</i> (574)
Time-Determination and Contribution Analysis of Transport, Retention, and Offshore Backflow to Long-Term Sand-Dust Coupling	ZHANG Zhe, QIAO Li-ping, ZHOU Min, <i>et al.</i> (584)
Characterization, Sources, and Health Risks of PM _{2.5} -bound PAHs During Autumn and Winter in Luoyang City	QI Jing-wen, ZHANG Rui-qin, JIANG Nan, <i>et al.</i> (595)
Characteristics, Meteorological Influences, and Transport Source of Ozone Pollution in Zhengzhou City	WANG Xu-dong, YIN Sha-sha, YANG Jian, <i>et al.</i> (604)
Nonlinear Response Characteristics and Control Scheme for Ozone and Its Precursors Based on Orthogonal Experimental Methods	LI Guang-yao, CHEN Qiang, GUO Wen-kai, <i>et al.</i> (616)
Characteristics and Source Apportionment of Volatile Organic Compounds (VOCs) in the Automobile Industrial Park of Shanghai	YE Lu, TAI Qing-qing, YU Hua-ming (624)
Establishment of a High-resolution Anthropogenic Emission Inventory and Its Evaluation Using the WRF-Chem Model for Lanzhou	GUO Wen-kai, LI Guang-yao, CHEN Bing, <i>et al.</i> (634)
Trends in Vehicle Emissions in Sichuan Province, 2010-2017	LI Yuan, SHI Jia-cheng, CHEN Jun-hui, <i>et al.</i> (643)
Bioavailability and Ecological Risk Assessment of Cadmium in the Sea-Land Interaction Sediments of the Pearl River Delta	WANG Fang-ting, BAO Ke, CHEN Zhi-hua, <i>et al.</i> (653)
Distribution, Sources, and Ecological Risks of Polyfluoroalkyl Substances in the Surface Water of the Wuliangsuhai Watershed	SHI Rui, MAO Ruo-yu, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (663)
Distribution Characteristics of Microplastics in Ice Sheets and Its Response to Salinity and Chlorophyll a in the Lake Wuliangsuhai	WANG Zhi-chao, YANG Jian-lin, YANG Fan, <i>et al.</i> (673)
Effect of Check Dam on Phosphorus Transport and Retention in the Qingshui River, in Zhangjiakou City	WANG Wei, LI Xu-yong (681)
Characteristics of Phosphorus Speciation and Genesis in Typical Tributaries of the Three Gorges Reservoir	YANG Fan, WANG Li-jing, JI Dao-bin, <i>et al.</i> (688)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in Lake Chaohu Sediments and Pollution Evaluation	WANG Yan-ping, XU Wei-wei, HAN Chao, <i>et al.</i> (699)
Sediment Pollution Characteristics and Dredging in the Nanfei River Estuary, Chaohu Lake	YANG Pan, YANG Chun-hui, MA Xin-yu, <i>et al.</i> (712)
Effect of Oxidation Strengthening on In-situ Phosphorus Immobilization of Calcium Hydroxide	XU Chu-tian, LI Da-peng, YUE Wei, <i>et al.</i> (723)
Impact of Rainfall-Runoff Events on Methane Emission from Xiangxi Bay of the Three Gorges Reservoir	CHEN Min, XU Hao-ting, WANG Xue-zhu, <i>et al.</i> (732)
Water-air Carbon Dioxide Exchange and Nutritional Controls in a Typical Karst River	LIU Rui, ZHANG Jin, CHEN Zu-sheng, <i>et al.</i> (740)
Occurrence of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes in Representative Drinking Water Resources in Jiangsu Province	WANG Long-fei, CHENG Yi-qun, HU Xiao-dong, <i>et al.</i> (749)
Diversity and Abundance of Antibiotic Resistance Genes in Tailings Ponds	HUANG Fu-yi, ZHU Yong-guan, SU Jian-qiang (761)
Hydrochemical Characteristics and Origin of Groundwater in the Central Guohe River Basin	ZHENG Tao, JIAO Tuan-li, HU Bo, <i>et al.</i> (766)
Hydrochemical Characteristics and Analysis of the Qilihai Wetland, Tianjin	HE Ming-xia, ZHANG Bing, XIA Wen-xue, <i>et al.</i> (776)
Effects of Straw Mulching and Nitrogen Reduction on the Distribution of Soil Nitrogen and Groundwater Nitrogen Pollution	ZHANG Wan-feng, YANG Shu-qing, SUN Duo-qiang, <i>et al.</i> (786)
Precision of eDNA Metabarcoding Technology for Biodiversity Monitoring of Eukaryotic Phytoplankton in Lakes	ZHANG Li-juan, XU Shan, ZHAO Zheng, <i>et al.</i> (796)
Effect of Phytoplankton Community Composition and Size Structure on Light Absorption Properties	HUANG Xin, SHI Kun, ZHANG Yun-lin, <i>et al.</i> (808)
Periphytic Algae Community Structure and Its Relation to Environment Factors in the Main Stream of the Songhua River from 2014 to 2019	YU Zong-ling, CHEN Wei, ZHAO Ran, <i>et al.</i> (819)
Diversity and Function Prediction of Bacterioplankton Under Human Disturbance in the Main Stream of the Laoguan River Before and After the Flood Season	HAN Xue-mei, GONG Zi-le, YANG Xiao-ming, <i>et al.</i> (831)
Seasonal Removal Efficiency and Degradation Products of Two Typical PPCPs in Subsurface Flow Constructed Wetlands	LI Chao-yu, YANG Yi-xiao, ZHANG Ning, <i>et al.</i> (842)
Removal of Antibiotics and Antibiotic Resistance Genes from Urban Rivers Using Artificial Ecosystems	ZHOU Hai-dong, HUANG Li-ping, CHEN Xiao-meng, <i>et al.</i> (850)
Distribution Characteristics of Viruses Microorganisms in a Water Supply System with Combined Ultraviolet Chloramine Disinfection	HAN Xue, SUN Jian-wei, ZHANG Li, <i>et al.</i> (860)
Removal of Oxytetracycline from Water Using Blast Furnace Slag Loaded Sulfide Nanoscale Zero-valent Iron	SUN Qiu-nan, ZHANG Rong-bin, DENG Man-jun, <i>et al.</i> (867)
Heavy Metal Ion Adsorption Properties and Stability of Amine-sulfur Modified Biochar in Aqueous Solution	WANG Cun-shi, HE Min-xia, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (874)
Characteristics and Removal Mechanism of an Electro-Hybrid Ozonation-Coagulation System in the Treatment of Organic Matters	XIE Xin-yue, XU Jian-jun, ZHANG Shao-hua, <i>et al.</i> (883)
Enhancement Effects and Mechanisms of Microscale Zero Valent Iron on the Performance of Anaerobic Co-digestion of Waste Activated Sludge and Food Waste	CHEN Sheng-jie, YAO Fu-bing, PI Zhou-jie, <i>et al.</i> (891)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Farmland Soils Surrounding a Typical Industrial Area of Henan Province	MENG Xiao-fei, GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, <i>et al.</i> (900)
Distribution Characteristics and Pollution Evaluation of Heavy Metals in Greenbelt Soils of Nanjing City	CHEN Jia-lin, LI Ren-ying, XIE Xiao-jin, <i>et al.</i> (909)
Remediation Effect of Compound Modifier FZB on Arsenic and Cadmium Contaminated Soil	DING Ping, HE Yu-long, HE Huan, <i>et al.</i> (917)
Remediation of Cd Contaminated Acidic Rice Fields Using the Combined Application of Lime and Organic Matter	LI Guang-hui, CHENG Qing, CHEN Hong (925)
Effect and Mechanism of Foliar Application Nano-MnO ₂ on Cadmium Enrichment of Rice	ZHOU Yi-min, HUANG Ya-yuan, LIU Xiao-yue, <i>et al.</i> (932)
Characteristics of Cadmium Enrichment and Pollution Evaluation of a Soil-Crop System in a Typical Karst Area	WANG Rui, DENG Hai, JIA Zhong-min, <i>et al.</i> (941)
Comparison of Enrichment and Transport of Cadmium in the Fruit of High and Low Enrichment Pepper Varieties and Its Distribution in Subcells	SHAO Xiao-qing, HE Zhang-mi, XU Wei-hong (952)
Cadmium Accumulation Characteristics of Four Herbs	CHEN Di, LI Bo-qun, YANG Yong-ping, <i>et al.</i> (960)
Characteristics of Dissolved Organic Carbon Loss in Purple Soil Sloping Fields with Different Fertilization Treatments	XIONG Zi-yi, ZHENG Jie-bing, WANG Dan, <i>et al.</i> (967)
Effects of Precipitation Changes on Plant Community Diversity and Soil C:N:P Ecological Stoichiometric Characteristics in a Desert Steppe of China	GAO Jiang-ping, ZHAO Rui-feng, ZHANG Li-hua, <i>et al.</i> (977)
Effect of Water Management on Rice Growth and Rhizosphere Priming Effect in Paddy Soils	LIN Sen, XIAO Mou-liang, JIANG Jia-bin, <i>et al.</i> (988)
Effects of Copper Pollution on Microbial Communities in Wheat Root Systems	GE Yi, XU Min-min, XU Shao-hui, <i>et al.</i> (996)
Ozone Pollution, Nitrogen Addition, and Drought Stress Interact to Affect Non-structural Carbohydrates in the Leaves and Fine Roots of Poplar	LI Pin, ZHOU Hui-min, FENG Zhao-zhong (1004)
Review of Screening and Applications of Organic Tracers in Fine Particulate Matter	LI Yuan-ju, WU Ai-hua, TONG Meng-xue, <i>et al.</i> (1013)