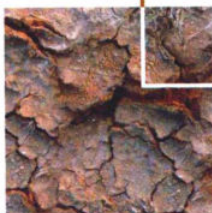


The Control Principles and Methods
of Heavy Metal Pollution in Vegetables

蔬菜重金属控制 原理与方法

徐卫红 / 著



科学出版社

蔬菜重金属控制原理与方法

徐卫红 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

我国菜田土壤因长期大量使用磷肥以及受城市垃圾、污泥和污灌等影响导致重金属污染问题日趋严重。蔬菜为高重金属蓄积类作物。本书在作者大量研究和实践基础上,详细介绍我国蔬菜重金属污染现状、污染来源分析、蔬菜重金属蓄积的内外影响因素,总结作者和课题组近十五年在蔬菜重金属污染控制方面的阶段性研究成果,系统介绍蔬菜重金属污染控制的方法,阐述低重金属蓄积蔬菜种类及品种选育、生物炭、沸石、植物-微生物修复、外源物质调控等对蔬菜重金属蓄积的影响及生理生化和分子机理。

本书可供植物营养与生态环境、土壤重金属污染修复及蔬菜抗性育种的专家学者、科技工作者、政府部门管理人员和相关领域研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

蔬菜重金属控制原理与方法 / 徐卫红著. — 北京:科学出版社, 2019.10
ISBN 978-7-03-061888-7

I. ①蔬… II. ①徐… III. ①蔬菜-土壤污染-重金属污染-污染防治-研究 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 150785 号

责任编辑:莫永国 刘莉莉 / 责任校对:彭 映

责任印制:罗 科 / 封面设计:墨创文化

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2019年10月第一版 开本:B5(720×1000)

2019年10月第一次印刷 印张:13.75

字数:270 000

定价:99.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序

重金属是一类典型的高毒性和持久性物质，一旦污染环境，将对生态系统产生长期危害，并通过食物链损害人类健康。在我国工农业现代化发展过程中，由于工业“三废”的排放、农用化学品的不合理使用、畜禽粪便农用、污泥农用、污水灌溉及大气沉降等，出现了广泛的农田土壤重金属污染。这使得我国包括蔬菜在内的农作物遭受重金属污染问题日益严峻。据国家生态环境部和自然资源部联合发布的全国土壤污染状况调查公报，我国耕地土壤重金属点位超标率近20%，其中大部分为中轻度污染。常见的农田土壤重金属污染物包括镉、汞、铅、砷、铬、铜等。农田土壤重金属通过作物的吸收和转运，蓄积于其可食部分。近年来，镉米、铅米、砷米、镉麦和蔬菜重金属超标的事件时有发生。超量重金属通常会导致作物减产，并可以通过食物链进入动物和人体，引起急性中毒和慢性中毒，甚至致突变、致癌和致畸。鉴于此，为了削减和控制重金属污染，保护农田生态系统和人类健康，近年来对重金属污染农田土壤修复和农作物重金属阻隔技术的研究成为国内外环境保护工作的紧迫任务和热点研究课题。近十五年来，徐卫红教授及其课题组结合国家大宗蔬菜现代农业产业技术体系栽培与营养研究，在蔬菜重金属污染控制方面进行了大量的研究工作，取得了系列研究成果。《蔬菜重金属控制原理与方法》这本书是作者对其研究和实践成果的阶段性总结，值得庆贺。

该书将研究重点聚焦在菜田重金属污染修复和蔬菜重金属含量的控制，是建立在对我国当前农作物重金属污染现状的精准分析之上的。虽然目前菜田土壤重金属污染的健康风险相对低于稻田，但蔬菜亦是我国居民膳食中的主要食品之一，而且对菜田重金属污染的研究相对落后于稻田。因此适时总结出版关于修复菜田重金属污染和控制蔬菜作物重金属蓄积技术的专著十分必要，对广大工作在蔬菜安全生产一线的农业从业人员具有重要的指导作用。该书的另一特色是将土壤改良剂和钝化剂施用、植物营养元素和生物活性物质调控、植物-微生物联合修复、重金属低积累品种选用等农艺调控措施作为修复菜田重金属污染和控制蔬菜作物重金属蓄积的主要技术措施。这些技术特别适用于中轻度重金属污染菜田的安全利用和蔬菜作物重金属含量的达标控制，对从事农田生态系统重金属污染修复和保护的农艺师和环境工程师具有重要的参考价值。此外，该书在重点介绍修复菜田重金属污染和控制蔬菜作物重金属蓄积技术措施的同时，以大量的具体

研究实例予以实证，并且注重对相关基本原理的阐述。这对有志于从事重金属污染农田安全利用和绿色农产品生产的莘莘学子无疑是一本不可多得的学习、考研和科研参考书。

该书是作者的蔬菜重金属污染控制研究工作的阶段性总结，也将是作者更广泛而深入研究工作的起点。同时可以预期，随着该书的出版发行，我国将产生更多、更深入和更系统的有关农田重金属污染修复和农作物重金属控制的创造性研究工作，将人们餐桌上的食品安全推向更高水准。

熊治廷

武汉大学资源与环境科学学院

2019年7月

前 言

随着我国大规模的工业城市化进程，污水灌溉、固体废弃物堆积、大气沉降以及农药和肥料的施用，我国农田重金属污染日益严重。各类土壤重金属污染中，以土壤镉(cadmium, Cd)污染最为严重、危害最大。镉在土壤系统中的污染过程具有隐蔽性、潜伏性、积累性和长期性，能通过食物链进入人体，产生致癌、致畸、致突变性作用。1984年联合国环境规划署将Cd列为12种危害全球环境的化学物质和化学过程清单的首位。据美国地质调查局(USGS)2014年公布的数据显示，2013年中国Cd的产量为7300吨，位居全球首位，约占全球总产量的33%。随着矿山的不断开发和尾矿的日积月累，加上交通和工业的快速发展、农药化肥的滥用等因素，土壤重金属镉污染问题不容乐观。

本书在国家现代产业技术体系专项、国家重点研发计划项目、国家科技支撑计划项目、国际合作项目等课题支持下，开展了近15年的蔬菜重金属污染控制相关研究，发表了33篇SCI论文。本书主要针对菜园土壤重金属污染问题，运用最前沿最新的植物营养学、环境科学、生物学、分子学等科学研究方法，详细论述菜园土重金属污染控制的研究方法和阶段性研究成果，为低中度重金属污染菜园土蔬菜安全生产提供理论参考和实际可操作的修复方案、方法。

全书共分八章。第一章，重金属镉在蔬菜中的吸收、运输和累积机制；第二章，生物炭在蔬菜重金属镉污染控制中的作用；第三章，沸石在蔬菜重金属镉污染控制中的作用；第四章，畜禽粪便在蔬菜重金属污染控制中的作用；第五章，菜田重金属镉污染与植物修复；第六章，菜田重金属镉污染与植物-微生物联合修复；第七章，菜田重金属镉污染与外源物质调控；第八章，低重金属镉蓄积蔬菜种类及品种选育。

本书的写作由作者一人完成，书中内容主要来自作者及课题组在相关领域的学术成果，特别感谢王宏信、李文一、刘吉振、韩桂琪、张海波、陈贵青、张晓璟、刘俊、周坤、江玲、熊仕娟、陈蓉、王卫中、陈永勤、迟荪琳、秦余丽、李桃、张春来等多位研究生为本书中数据的获取付出的辛勤劳动，同时感谢彭秋、贺章咪、邓继宝、焦璐琛等研究生在参考文献整理方面和数据核对工作给予的帮助。特别感谢中国科学院生态环境研究中心焦文涛副研究员对本书的大力支持。作者的博士导师武汉大学熊治廷教授还在百忙之中欣然提笔为本书作序，科学出版社刘莉莉等编辑为本书的出版付出了辛苦的工作，在此一并

表示衷心的感谢！

本书以作者和课题组的科研工作为重点撰写而成，难免有疏漏或不妥之处，一些观点也是一家之言，尚祈读者和相关领域专家惠予批评指正。

徐卫红

2019年5月

目 录

绪论	1
第一章 重金属镉在蔬菜中的吸收、运输和累积机制	11
第一节 重金属镉主要形态和在蔬菜体内的分布	11
一、菜田重金属镉主要形态	11
二、重金属镉在蔬菜体内的分布与形态	16
第二节 重金属镉在蔬菜中的吸收特点	18
一、蔬菜吸收重金属镉的主要形态	19
二、不同种类蔬菜对重金属镉的吸收差异	20
三、不同品种蔬菜对重金属镉的吸收差异	21
第三节 重金属镉在蔬菜体内的运移、分配规律	23
一、重金属镉在蔬菜体内的运移规律	23
二、重金属镉在蔬菜体内的分配规律	24
第四节 重金属镉在蔬菜体内的蓄积机制	27
一、重金属镉在不同种类蔬菜体内的富集特点	27
二、重金属镉在不同品种蔬菜体内的蓄积机制	28
主要参考文献	31
第二章 生物炭在蔬菜重金属镉污染控制中的作用	38
第一节 生物炭的基本特性	38
一、生物炭的基本性质	38
二、生物炭场发射扫描电镜和能谱分析	38
三、生物炭对镉的吸附特性	40
第二节 生物炭对蔬菜重金属镉的影响	41
一、生物炭对菜田重金属镉生物有效性的影响及其原理	41
二、生物炭对蔬菜吸收蓄积重金属镉的影响与机制	44
三、生物炭在蔬菜重金属镉污染控制方面的潜力	46
四、生物炭应用存在的问题及研究展望	47
主要参考文献	48
第三章 沸石在蔬菜重金属镉污染控制中的作用	50
第一节 沸石的基本特性	50

一、沸石的概念	50
二、沸石对土壤肥力的影响	50
三、沸石对土壤微生物的影响	51
第二节 沸石对蔬菜重金属镉的影响	51
一、沸石对菜田重金属镉生物有效性的影响及其作用原理	51
二、沸石对蔬菜吸收蓄积重金属镉的影响	57
三、沸石在蔬菜重金属镉污染控制方面的潜力	60
四、沸石应用存在的问题及研究展望	60
主要参考文献	61
第四章 畜禽粪便在蔬菜重金属污染控制中的作用	63
第一节 我国畜禽粪便中重金属污染现状及形态特征	63
一、我国畜禽粪便中重金属污染现状	63
二、畜禽粪便中重金属形态特征	64
第二节 畜禽粪便对蔬菜重金属的影响	64
一、湖南衡阳长期施用猪粪有机肥试验点	64
二、浙江温州长期施用鸡粪有机肥试验点	65
三、重庆北碚长期施用鸡粪有机肥试验点	66
第三节 畜禽粪便对菜田中重金属含量的影响	67
一、禽畜粪便钝化菜田重金属作用的原理	67
二、畜禽粪便对菜田中重金属含量的影响	68
三、畜禽粪便在蔬菜重金属污染控制中存在的问题与研究展望	70
主要参考文献	71
第五章 菜田重金属镉污染与植物修复	74
第一节 植物修复原理与方法	74
一、植物修复种类及原理、方法	74
二、植物修复研究与应用进展	75
第二节 植物修复影响蔬菜吸收重金属的生理机理	76
一、植物修复对蔬菜吸收重金属镉的影响及作用机制	76
二、植物修复对菜田重金属形态转化与生物有效性的影响及机制	80
第三节 植物修复影响蔬菜吸收重金属镉的分子机理	82
一、植物修复的分子机理	82
二、植物修复应用在蔬菜重金属镉污染控制中存在的问题与研究展望	99
主要参考文献	99
第六章 菜田重金属镉污染与植物-微生物联合修复	105
第一节 植物-微生物联合修复的原理与方法	105
一、植物-微生物联合修复的种类及原理、方法	105

二、植物-微生物联合修复研究进展	106
第二节 植物-菌根真菌联合修复	107
一、植物-菌根真菌联合修复对蔬菜重金属镉吸收的影响和作用机制	107
二、植物-菌根真菌联合修复对菜田重金属镉形态转化与生物有效性的影响	114
三、植物-菌根真菌联合修复在蔬菜重金属镉污染控制方面的潜力	119
四、植物-菌根真菌联合修复存在的问题与研究展望	121
主要参考文献	122
第七章 菜田重金属镉污染与外源物质调控	125
第一节 菜田重金属镉污染与锌、铁、镁	125
一、镉与锌	125
二、镉与铁	133
三、镉与镁	138
第二节 菜田重金属镉污染与硅、磷	142
一、镉与硅	142
二、镉与磷	148
第三节 菜田重金属镉污染与硒、镧及其他外源物质	154
一、镉与硒	154
二、镉与镧	162
三、镉与其他外源物质	169
主要参考文献	169
第八章 低重金属镉蓄积蔬菜种类及品种选育	172
第一节 概述	172
一、概念	172
二、低重金属镉蓄积蔬菜种类及品种选育研究进展	173
第二节 不同种类与品种蔬菜重金属镉污染评价及蓄积特征	174
一、不同种类蔬菜重金属镉污染评价及蓄积特征	174
二、不同品种蔬菜重金属镉蓄积特征	174
第三节 不同种类及品种蔬菜吸收、转运、蓄积重金属差异及分子机制	178
一、不同种类及品种蔬菜吸收、转运、蓄积重金属差异	178
二、蔬菜低重金属镉蓄积的分子机制	184
三、低重金属镉蓄积蔬菜种类及品种选育研究展望	206
主要参考文献	207

绪 论

在重金属污染物中，镉(Cadmium, Cd)由于其迁移性较强、生物毒害性高、污染面积大等原因，被列为主要土壤重金属污染物(Satarug et al., 2003)。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(周健, 2013)。土壤是生态环境系统的重要组成部分，也是人类赖以生存和发展的重要自然资源之一。土壤环境质量对于农业生产十分重要。近年来，我国由于采矿、电镀、冶金等工业活动产生的废水、废气、固体废弃物的排放，污水灌溉，磷肥及有机肥施用等，使大面积农田土壤被 Cd 污染(Hawrylak-Nowak et al., 2014; Wong et al., 2014; Li et al., 2009; Huang et al., 2009)。土壤中的 Cd 通过土壤-植物系统迁移到农作物中，影响食品安全生产，并可通过食物链转移到人体内，引起 Cd 的急性或慢性中毒(Page et al., 1986)。人体摄入过量的 Cd 易引起前列腺癌、肾癌和痛痛病等多种疾病(Chaney et al., 1999)。当人体尿液中 Cd 含量 $>5 \mu\text{g/g}$ 时，19.9%的人将会患肾功能障碍疾病。全球“八大公害”之一的日本“骨痛病”就是长期食用镉米所引发的一种疾病。因此，土壤 Cd 污染问题亟待解决，并且已经成为全球的研究热点。

一、土壤中镉的来源及全球农田镉污染现状

(一) 土壤中镉的来源

土壤中 Cd 的背景值取值范围为 $0.01 \sim 2.00 \text{ mg/kg}$ ，平均值为 0.35 mg/kg ，其主要取决于成土母质(Hong et al., 2014)。近年来，在全球范围内，化肥和农药的不合理施用、不合标准的污水灌溉和含有重金属的污泥肥田使大面积的农田遭到了不同程度的 Cd 污染(Hawrylak-Nowak et al., 2014; Wong et al., 2014; Huang et al., 2009)。

我国工业废水处理技术不够完善导致废水处理不彻底，致使水中重金属含量超标。如电池制造厂所产生的废水里就含有大量镉(Page et al., 1986)。如果用这种处理不完善的污水进行长期灌溉会导致土壤重金属污染。欧洲每年约 12.35 吨含 Cd 污水直接排入自然水体中和约 1.68 吨含 Cd 污水间接排入自然水体中，而对 Cd 的限制仅为 0.005 吨/年(Herrero et al., 2008)。截至 2010 年底，我国因

污水灌溉而污染的耕地有 216.67 万 hm^2 。我国沈阳市西郊污灌区农田土壤的 Cd 含量达 1.42~2.89 mg/kg ，均为重度 Cd 污染。

污泥、有机肥的施用也可能会导致土壤 Cd 污染。污泥、有机肥的施用可供土壤养分，提高土壤有机质含量，改善土壤理化性质，并因此提高作物产量。但污泥和有机肥中常含有各种重金属，长期施用会导致土壤重金属的积累。研究表明，污泥施用后，就 Pb、Cu、Zn、Cd 含量增幅比较而言，Cd 元素的增加幅度较大，超过了我国土壤环境质量(GB15618—2018)二级标准。相关研究表明，污泥的添加使土壤中有效态 Cd 和 Zn 含量显著增加了。施用有机肥也会增加土壤重金属含量，从而增加作物特别是蔬菜对重金属吸收积累的风险，如长期施用有机肥会增加全 Cd 和有效态 Cd 的含量。但污泥和有机肥如果使用合理不仅可以提高土壤肥力，促进作物生长，还可以抑制作物对重金属的积累，目前已有学者在进行这方面的研究。

(二) 全球农田镉污染现状

农田重金属污染已成为全球问题，其中 Cd 污染较为严重。除了一些地区没有文献报道外，大部分地区都存在着 Cd 污染问题。在西欧，1 400 000 个测试点受到重金属影响。在美国，有 60 万 hm^2 遭受重金属污染的区域需要修复(Gabrielsen et al., 2011)。Hong 等调查，2014 年尼日利亚北部灌溉区的 Cd 含量平均值达到 9.83 mg/kg (Hong et al., 2014)。在新西兰的一些牧场调查发现，土壤中的 Cd 含量在其背景值之上(René et al., 2014)。我国环境保护部和国土资源部公布的 2014 年全国土壤污染状况调查公报显示，我国土壤 Cd 的点位超标率达到 7%，居各种重金属污染之首，其中轻微、轻度、中度和重度污染点位超标率分别为 5.2%、0.8%、0.5%和 0.5%。刘意章等调查表明，三峡库区巫山建平地区土壤存在严重的 Cd 污染问题，表层耕作土壤中的 Cd 含量范围为 0.42~42 mg/kg ，超过我国土壤环境质量二级标准值(0.3 mg/kg)1.4~140 倍(刘意章等，2013)。曾希柏等调查了吉林四平、山东寿光、河南商丘和甘肃武威四个地方的农田重金属含量，表明镉污染超标最为严重，且 Cd 累积趋势明显(曾希柏等，2013)。

二、土壤镉污染治理和修复方法的研究现状

(一) 工程法(物理修复)

土壤中的 Cd 主要分布在表层。在我国沈阳张士污灌区土壤剖面中，Cd 较多集中于 0~30 cm 的土壤表层，占 Cd 积累总量的 77.0%~86.6%(Li et al., 2009)。工程法是指利用工程的或物理的措施对 Cd 污染土壤进行治理的方法，

主要包括客土法、换土法、翻耕法和固化法等。客土法是指在 Cd 污染土壤上覆盖一层新土,以降低表层土壤 Cd 含量的方法。换土法是指把受污染的表层土壤换入同等厚度的新土的方法。翻耕法是指通过深耕,使污染较重的表层土翻入下层,而污染较轻的土壤翻到上层,以降低土壤表层 Cd 含量的方法。客土、换土和翻耕这三种工程方法是治理土壤 Cd 污染比较有效和实用的方法。但这些方法和措施的成本较高,且会破坏土壤结构,影响土壤肥力。所以,目前这些方法仅适用于 Cd 污染严重且面积较小的地区。固化法是指向土壤中添加黏合剂或固化剂以固定土壤中的 Cd,使其不再向环境中迁移的方法。将污染土壤和固化剂以一定的比例混合,经熟化后形成渗透性很低的混合物。常用的固化剂有水泥、硅酸盐、高炉渣、沥青等。该方法也主要适用于小面积污染土壤。

(二) 化学法

土壤 Cd 污染的化学修复法是指通过向土壤中添加各种化学物质,如土壤改良剂、有机肥和重金属螯合剂等,来改变土壤的有机质含量、pH(酸碱度)、Eh(氧化还原电位)、CEC(阳离子交换量)等理化性质,以改变 Cd 的形态和生物有效性,从而达到污染土壤修复的目的。所施入的化学物质包括两类,一类是土壤改良剂、有机肥等,主要目的是降低 Cd 等生物有效性,从而减少作物对 Cd 的吸收。目前研究和应用比较多的土壤改良剂主要包括石灰性物质、磷酸盐、硅肥和硅酸盐、蛭石、粉煤灰、氮肥、硫化物以及铁氧化物等。另一类是包括小分子有机酸和螯合剂,如 EDTA、聚天冬氨酸(PASP)和柠檬酸在内的重金属螯合剂,以提高 Cd 的溶解度和生物有效性。小分子有机酸和螯合剂对 Cd 生物有效性的影响可能因植物种类和土壤类型的不同而异。化学修复操作相对比较简单,适用于污染程度不甚严重的地区,比较适合大面积操作。但添加的化学物质易引起二次污染,而且处理效果可能不太理想。

(三) 生物修复

生物修复是指利用生物的代谢活动来降解、固定或转移重金属的方法。它通过两种途径达到修复重金属污染土壤的目的:一是通过生物作用改变重金属在土壤中的化学形态,降低其在土壤中的移动性和生物有效性;二是通过生物的吸收和代谢来达到固定或转移重金属的目的。目前研究和应用比较多的是植物修复技术和微生物修复技术。

植物修复根据其修复机理可分为植物提取、植物固定、植物挥发和根际降解过滤 4 种(Chen et al., 2000)。目前研究较多的是超积累植物。对 Cd 来说,叶片或地上部分 Cd 的累积量达到 100 mg/kg 以上的植物就是超积累植物。目前已发

现的 Cd 超积累或富集植物有龙葵 (*Solanum nigrum* L.)、黑麦草 (*Lolium perenne* L.)、烟草 (*Nicotiana tabacum* L.)、川蔓藻属 (*Ruppia*)、骆驼蹄瓣 (*Zygophyllum fabago* L.)、拟南芥 (*Arabidopsis thaliana*, *Arabidopsis*)、白三叶 (*Trifolium repens*)、路易斯安娜鸢尾 (*Iris hex agona*) 等。但目前发现的 Cd 超积累植物大多生长缓慢、生物量低, 因此修复周期长, 且其生长环境要求比较严格, 这些都限制了植物提取技术的大规模应用。因此, 有待进一步研究, 寻找更好的超积累植物。

微生物修复重金属污染的主要机理是生物吸附和生物转化。微生物可通过带电荷的细胞表面吸附重金属离子或通过摄取必要的营养元素主动吸收重金属离子, 即通过对重金属的胞外络合、胞内积累、沉淀和氧化还原反应等作用, 将重金属离子富集在微生物细胞表面或内部, 降低土壤中重金属的生物可利用率, 进而降低农作物和农产品中镉的含量。土壤微生物包括与植物根部相关的自由微生物、共生根际细菌和菌根真菌, 它们是根际生态区的完整组成部分。微生物种类繁多, 数量极大, 分布广泛, 而且繁殖迅速, 个体微小, 比表面积大, 对环境适应能力强, 因而成为人类最宝贵、最具开发潜力的资源库之一 (徐良将 等, 2011)。微生物在修复重金属污染土壤方面具有独特的作用。但微生物可以从多方面影响植物对镉的吸收和积累, 这可能与微生物种类和植物品种以及土壤性质有关, 其影响机理也比较复杂, 有待进一步研究。

(四) 叶面喷施或向土壤施加外源物质

主要是指叶面喷施或土壤施加的外源物质, 限制作物对 Cd 的吸收或阻碍 Cd 向作物可食部分的转移, 并缓解 Cd 胁迫对作物的毒害, 促进作物生长, 提高作物产量。所施用的外源物质主要包括两类: 一类是 Zn、Fe、Si、P、Ca、Se 等中微量营养元素或有益元素, 以利用它们与 Cd 的竞争拮抗作用来抑制 Cd 的吸收和积累; 另一类是谷胱甘肽 (GSH)、抗坏血酸 (AsA)、水杨酸 (SA)、酶类等有机物。

(五) 筛选低镉累积品种

不同种类作物以及同种作物不同品种间 Cd 积累存在较大的差异, 因此可考虑选择低 Cd 累积品种种植, 以降低作物对 Cd 的吸收和积累。选育低重金属蓄积品种是降低作物镉吸收最有效的策略之一, 并已对此开展了研究。部分粮食作物, 如水稻、向日葵和硬粒小麦, 通过育种途径降低籽粒镉含量的研究也已取得了进展。2017 年 9 月, “杂交水稻之父”袁隆平院士宣布成功使用 CRISPR/Cas9 技术敲除了与水稻镉吸收和积累相关的基因。目前已知在水稻中

OsNRAMP1 显示对镉和铁的运输活性；OsNRAMP5 是定位于质膜的转运蛋白，分布在外皮层和内皮层，是主要的镉转运体之一。由于作物低镉吸收积累机理的复杂性，现有研究存在着许多还未澄清的问题，镉向可食部位(果实或籽粒)转运的调控机制仍然难以捉摸，镉蓄积关键基因及其分子机理仍不清楚，这极大地限制了利用现代分子生物学技术来培育耐镉、低镉作物新品种的进程。此外，低 Cd 累积品种与其他品种相比，其产量、品质、抗病性以及其它特性可能会发生改变(Grant et al., 2008)，限制了此种方法的应用。综合前文所述，各种方法的原理和优缺点见表 1。

表 1 土壤镉污染修复各种方法的原理和优缺点比较

修复方法	原理	优缺点
工程法 (物理修复)	利用工程的或物理的措施对 Cd 污染土壤进行治理的方法，主要包括客土法、换土法、翻耕法和固化法等。以新土换掉或者覆盖镉污染土壤	适用于 Cd 污染严重且面积较小的地区，短期效果明显。但其成本较高，且会破坏土壤结构，影响土壤肥力
化学法	向土壤添加各种化学物质，如土壤改良剂、有机肥和重金属螯合剂等，改变土壤的有机质含量、pH、Eh、CEC 等理化性质，以改变 Cd 的形态和生物有效性，从而达到污染土壤修复的目的	化学修复操作相对比较简单，适用于污染程度不甚严重的地区。但添加的化学物质易引起二次污染，并且 Cd 仍存留在土壤中，容易再度活化、危害植物
植物修复	植物提取是用植物吸收重金属并将其转移至植物地上部分，通过收获地上部分以达到清除土壤中重金属的目的；植物固定是利用重金属耐性植物的根系吸收、沉淀或还原作用将重金属固定；根际降解过滤是指重金属元素被植物根系吸收后，通过体内代谢活动来沉淀、降解或集中重金属	植物修复方法是比较理想的方法，对土壤扰动小，可有效降低废弃矿场和重金属污染严重地区重金属的危害。但目前所找到的镉富集植物大多生长缓慢、生物量低，因此修复周期长，限制了植物提取技术的大规模应用
生物修复	主要机理是生物吸附和生物转化，微生物可通过带电荷的细胞表面吸附重金属离子或通过摄取必要的营养元素主动吸收重金属离子，即通过对重金属的胞外络合、胞内积累、沉淀和氧化还原反应等作用，将重金属离子富集在细胞表面或内部，降低土壤中重金属的生物可利用性，进而降低农作物和农产品中镉的含量。比如植物根际促生菌可提高重金属在土壤中的溶解态含量，促进植物根系对重金属的吸收和向地上部的转移	可降低农产品重金属污染的风险；与植物修复配合应用，可强化镉富集植物对土壤镉污染的修复能力。但目前微生物修复技术还局限于科研和实验室水平，实例研究尚少，未能大面积推广
叶面喷施或向土壤施加外源物质	Zn Zn 与植物吸收 Cd 形成竞争关系，Zn 能加快 PCs-Cd 和 MT-Cd 复合物的形成，使 Cd 固定在液泡中，从而减轻植物的毒害	适量的 Zn 可减少农作物对 Cd 的吸收。植物种类、品种、部位、锌镉相对浓度等都会影响锌镉相互作用的结果，因此，也可能会促进农作物对 Cd 的吸收
	Fe Cd 和 Fe 在土壤和植物体内也存在比较复杂的相互作用，其具体影响机理目前尚不明确	施加适量的 Fe 可以缓解 Cd 对植株的毒害，但目前存在不确定性
	Si 可溶性硅酸盐水解成呈凝胶状态的 H_2SiO_3 ，其能够吸附有毒物质，保护蛋白质的结构；硅酸盐可以影响土壤 pH 和阳离子含量；Si 在地下部沉积进而阻碍 Cd 向植株地上部转移	可在一定程度上缓解 Cd 对植物的毒害，但效果不太理想

续表

修复方法	原理	优缺点
叶面喷施 或向土壤 施加外源 物质	P	P 施入土壤后能够与 Cd 形成沉淀, 进而影响到 Cd 的生物有效性和作物对 Cd 的吸收 可在一定程度上缓解 Cd 对植物的毒害, 但目前还存在不确定性
	Ca、Se	钙盐会提高土壤 pH, 从而影响土壤中镉的形态; 硒提高了谷胱甘肽 (GSH) 过氧化物酶的活性, 抑制了含 Cd 复合物 PCs 的形成, 从而降低了 Cd 的吸收 适量的 Se 可在一定程度上缓解 Cd 对植物的毒害, 还会提高农作物的品质。但长期添加钙盐可能会导致土壤板结, 影响土壤肥力
	GSH、AsA、SA、酶类等有机物	是比较有效的抗氧化剂, 在 Cd 胁迫下可增加植物体内的抗氧化酶活性, 从而保护植株免受 Cd 的毒害 可有效保护植株免受镉的毒害, 但目前大都局限于实验室研究
筛选低镉累积品种	通过分子生物学研究, 筛选出低镉累积品种的农作物进行种植 可在一定程度上减少农产品受镉污染的风险。但低 Cd 累积品种与其他品种相比, 其产量、品质、抗病性以及其它特性可能会发生改变	

目前, 国内外土壤重金属镉污染修复的研究大多局限于实验室, 很多问题有待解决。譬如在植物修复技术方面, 虽然已从基因工程方面展开了研究 (Arifa et al., 2012; Kudo et al., 2007), 但尚未培育出理想的超富集植物。而且, 植物体内的镉怎样从环境中回收才能避免镉再次进入环境中需要进一步研究。近几年, 微生物修复已成为研究热点 (He et al., 2009; Sheng et al., 2008), 但是, 在微生物对重金属的富集机理方面也仍有许多问题有待于解决, 这些问题包括细胞壁中吸附或结合重金属的特有成分或基团、细胞质膜上起转运金属离子作用的重金属转运蛋白(酶)或载体、金属硫蛋白在菌体细胞内的定位以及对重金属解毒的作用程度如何、与菌体耐重金属有关的基因的表达与调控, 等等。国内外学者也有将不同修复方法结合起来修复土壤镉污染的研究 (Marijke et al., 2014), 但由于各种修复技术联合应用的过程中其各自反应机理比较复杂, 因此仍然存在着一些问题有待深入探讨, 如在微生物-植物联合修复过程中, 微生物和植物品种的筛选、各自的用量及配置等。目前, 国内外学者就土壤镉污染生物修复的机理, 已从亚细胞角度、生理生化角度、分子生物学角度开展了广泛的研究 (金山, 2013; Arifa et al., 2012; Shao et al., 2008)。此外, 土壤污染不仅仅是重金属镉污染, 通常情况还伴有其他重金属以及有机污染物的复合污染。现有的大多数研究只探讨了复合污染的结果, 如作物生物量、重金属吸收、土壤酶活性以及它们与土壤污染物含量等之间的相关性, 而对于其作用机理尚不明确。

主要参考文献

陈贵青, 张晓璟, 徐卫红, 等. 2010. 不同锌水平下辣椒体内镉的积累、化学形态及生理特性[J]. 环境科学, 31(7): 247-252.

- 董静. 2009. 基于悬浮细胞培养的大麦耐镉性基因型差异及大小麦耐渗透胁迫差异的机理研究[D]. 杭州: 浙江大学.
- 黄志熊, 王飞娟, 蒋晗, 等. 2014. 两个水稻品种镉积累相关基因表达及其分子调控机制[J]. 作物学报, 40(4): 581-590.
- 江玲, 杨芸, 徐卫红, 等. 2014. 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, 35(6): 2349-2357.
- 金山. 2013. 白三叶对镉污染土壤的修复潜力研究[D]. 榆林: 西北农林科技大学.
- 刘吉振, 徐卫红, 王慧先, 等. 2011. 硅对不同辣椒品种生理特性、镉积累及化学形态的影响[J]. 中国蔬菜, 1(10): 69-75.
- 刘意章, 肖唐付, 宁增平, 等. 2013. 三峡库区巫山建坪地区土壤镉等重金属分布特征及来源研究[J]. 环境科学, 34: 2390-2398.
- 吕选忠, 宫象雷, 唐勇. 2006. 叶面喷施锌或硒对生菜吸收镉的拮抗作用研究[J]. 土壤学报, 43(5): 868-870.
- 熊世娟, 刘俊, 徐卫红, 等. 2015. 外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响[J]. 环境科学, (1): 286-294.
- 徐良将, 张明礼, 杨浩. 2011. 土壤重金属镉污染的生物修复技术研究进展[J]. 南京师大学报(自然科学版), 34(1): 102-106.
- 张海波, 李仰锐, 徐卫红, 等. 2011. 有机酸、EDTA 对不同水稻品种 Cd 吸收及土壤 Cd 形态的影响[J]. 环境科学, 32(9): 2625-2631.
- 周健. 2013. 硫和硒对镉胁迫下水稻幼苗生理生化特征及镉的吸收分配影响研究[D]. 上海: 华东理工大学.
- 曾希柏, 徐建明, 黄巧云, 等. 2013. 中国农田重金属问题的若干思考[J]. 土壤学报, 50: 186-194.
- Aravind P, Prasad M N V. 2003. Zinc alleviates cadmium-induced oxidative stress in *Ceratophyllum demersum* L.: a free floating freshwater macrophyte[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 41: 391-397.
- Arifa T, Humaira I. 2012. Development of a fungal consortium for the biosorption of cadmium from paddy rice field water in a bioreactor[J]. *Annals of Microbiology*, 62(3): 1243-1246.
- Arthur E, Crews H, Morgan C. 2000. Optimizing plant genetic strategies for minimizing environmental contamination in the food chain[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2(1): 1-21.
- Ayano H, Miyake M, Terasawa K, et al. 2014. Isolation of a selenite-reducing and cadmium-resistant bacterium *Pseudomonas* sp. strain RB for microbial synthesis of CdSe nanoparticles[J]. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 117(5): 576-581.
- Chaney R L, Ryan J A, Li Y M, et al. 1999. Soil cadmium as a threat to human health[J]. *Developments in Plant and Soil Sciences*, 85: 219-256.
- Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. 2000. Chemical methods and phytoremediation of soil contaminated with heavy metal[J]. *Chemosphere*, 41: 229-234.
- Dheri G S, Brar M S, Malhi S S. 2007. Influence of phosphorus application on growth and cadmium uptake of spinach in two cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 170(4): 495-499.
- Gabrielsen G W, Evensen A, Gwynn J, et al. 2011. Status report for environmental pollutants in 2011[M]. ProQuest, Umi