

国家自然科学基金资助项目  
千人计划资助项目

# 设施农田土壤重金属 污染控制原理与技术

乔玉辉 商建英 李花粉 芮玉奎 等编著



中國農業大學出版社

CHINA AGRICULTURAL UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金资助项目

千人计划资助项目

# 设施农田土壤重金属污染 控制原理与技术

乔玉辉 商建英 李花粉 芮玉奎 等编著

中国农业大学出版社

· 北京 ·

## 内 容 简 介

设施栽培与普通农田相比其处于相对封闭的环境,是一类相对较特殊的现代农业生产系统。在该系统中,设施菜地土壤的酸化、盐渍化、养分过度累积等问题,均可能导致土壤重金属化学行为的特异性。本书在作者们大量研究和实践基础上,针对设施农田系统中重金属的污染现状、污染来源分析、重金属迁移累积特性及如何更加全面、高效地通过农艺措施调控、寻找新的方法、材料新技术等合理高效地控制重金属在蔬菜中的累积等方面进行了详细的阐述,并基于社会—生态框架的区域土壤重金属风险评价与分区等方法提出了相应的调控对策,为解决设施农业产地环境健康及人们关注度日益提高的农产品安全生产问题提供了理论和技术上的指导。

### 图书在版编目(CIP)数据

设施农田土壤重金属污染控制原理与技术/乔玉辉等编著. —北京:中国农业大学出版社, 2016. 10

ISBN 978-7-5655-1718-1

I. ①设… II. ①乔… III. ①设施农业—土壤污染—重金属污染—污染防治  
IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 255615 号

书 名 设施农田土壤重金属污染控制原理与技术

作 者 乔玉辉 商建英 李花粉 芮玉奎 等编著

策 划 丛晓红 潘晓丽

责任编辑 潘晓丽

封面设计 郑 川

责任校对 王晓凤

出版发行 中国农业大学出版社

社 址 北京市海淀区圆明园西路 2 号

邮政编码 100193

电 话 发行部 010-62818525,8625

读者服务部 010-62732336

编辑部 010-62732617,2618

出 版 部 010-62733440

网 址 <http://www.cau.edu.cn/caup>

E-mail [cbsszs@cau.edu.cn](mailto:cbsszs@cau.edu.cn)

经 销 新华书店

印 刷 涿州市星河印刷有限公司

版 次 2016 年 10 月第 1 版 2016 年 10 月第 1 次印刷

规 格 787×1 092 16 开本 19 印张 350 千字

定 价 58.00 元

图书如有质量问题本社发行部负责调换

# 编委会

编著者名单(按姓氏拼音排序)

陈国炜 陈雪娇 李花粉 李 杨 林启美 乔玉辉  
芮玉奎 商建英 苏德纯 孙丹峰 田彦芳 王彬武  
王 钢 王 坤 王 婷 王 燕 郑晓丽

# 前 言

随着工业化进程和科技的进步,设施蔬菜已经成为现代农业产业化中的主导产业,而设施蔬菜生产过程中肥料、农药以及水份的高投入,使设施蔬菜生产过程中污染物的累积越来越严重,并且蔬菜是比较容易吸收重金属元素的农作物,当土壤被重金属污染后,蔬菜会富集多种重金属,造成蔬菜品质下降。目前,我国菜地土壤重金属污染形势非常严峻,特别是城市郊区地带,同时也是设施栽培比较集中的区域,作为蔬菜生产并供给城市的重要基地,成为重金属污染的重要区域。

虽然土壤重金属污染的危害人尽皆知,但是很多人对土壤重金属的污染种类、污染程度、污染区域以及今后的趋势和相关治理修复技术等相关知识的认识还不系统、不全面。设施农田的土壤污染和安全关系到蔬菜的生长和安全,长期食用重金属超标农产品可能严重危害人体健康。2011年我国第一个“十二五”国家级专项规划聚焦在重金属污染防治这一领域,显示了我国政府对重金属污染问题的高度重视。近年来,随着农田生态系统重金属调控、污染评价及预测、土壤修复等研究领域的发展,国家相关部门对农业环境和食品安全研究的支持力度和投入也逐年增长。

在此背景下,需要相关的专著阐述蔬菜吸收重金属的土壤因素以及探讨不同蔬菜对重金属吸收的差异,对于调控重金属向食物链的迁移非常重要。中国农业大学“重金属污染农田修复与安全利用工程技术”研发团队长期从事土壤环境安全和农产品安全研究,在十几项国家自然科学基金和科技部项目的支持下,常年从事土壤重金属的研究,积累了大量的一手资料和数据。本书在作者们大量研究和实践基础上,针对设施农田系统中重金属的污染现状、污染来源分析、重金属迁移累积特性及如何更加全面、高效地通过农艺措施调控、寻找新的方法、材料、新技术等合理高效地控制重金属在蔬菜中的累积等方面进行了详细的阐述,并基于社会—生态框架的区域土壤重金属风险评价与分区等方法,提出了相应的调控对策,为解决设施农业产地环境健康及人们关注度日益提高的农产品安全生产问题提供了理论和技术上的指导。

本书适合大专院校及相关科研院所的专家学者、研究生、本科生的教学教材和课外学习所用,也适合地方农技及推广部门和设施农业种植大户学习借鉴。我们殷切希望广大读者和相关专家对本书提出批评和进一步改进的意见建议,为继续深入开展我国的设施农田土壤污染控制和治理做出应有贡献。让我们为了我国的

农业环境安全、农产品安全和人民的身体健康做出共同努力。

本书的出版得到了中组部“青年千人计划”项目(21985001、D1201040)的大力支持和帮助,得到了农业部公益性行业专项“农产品产地重金属污染源头控制技术与示范”(200903015)、国家自然科学基金重点项目“高集约化农区土地利用系统过程模拟及其环境风险控制”(41130526)、国家自然科学基金面上项目“不同投入模式下的农田土壤重金属累积效应及其风险控制”(41371471)、“长期土壤污染条件下蚯蚓对重金属镉毒性的整体防御体系”(41471410)、“畜禽粪便有机肥中重金属在农田土壤中的形态归趋及生物有效性演变机理”(41271488)、“硒缓解水稻累积镉的根际调控机制研究”(41471271)、“土壤微观环境对胶体协同核素污染物运移的影响机理及模拟”(41501232)、国家自然科学基金青年项目“基于微观水文—物理模型的土壤微生物多样性影响机制研究”(41401265)和中国农业大学优秀人才项目“土壤和地下水的污染与修复”(2015RC002)的支持,在此一并感谢。

本书共分10章,按农田中重金属的来源、污染现状到相关技术解决方案的顺序编写。第一、二章概括了设施农田生态系统中重金属来源及污染现状;第三、四章的内容着重讨论了农田中土壤重金属污染的源头控制阈值以及金属在包气带系统中的分布与运移情况;第五、六章主要介绍了重金属在土壤—蔬菜系统中的迁移累积规律以及相关农田修复、利用的农艺措施;第七、八、九章主要介绍了微生物、生物炭和蚯蚓粪对土壤重金属修复治理的作用、影响机制等应用技术;第十章基于社会—生态框架,对土壤重金属区域进行风险评价与调控对策的研究和建议。

本书采取文责自负的方式,由各中国农业大学的各位教师和专家共同完成。本书各章的编写分工如下:第一章,乔玉辉、林启美、田彦芳;第二章,乔玉辉、王婷、苏德纯、李花粉;第三章,乔玉辉、王婷、李花粉、苏德纯;第四章,商建英、郑晓丽;第五章,李花粉、苏德纯;第六章,苏德纯、芮玉奎、李花粉;第七章,王钢、陈国炜、王燕;第八章,陈雪娇、林启美;第九章,乔玉辉、李杨、王坤;第十章,孙丹峰、王彬武。

编写组

2016年9月5日于北京

## 目 录

第一章 绪 论 .....	1
一、我国设施农业发展现状及存在的土壤环境问题 .....	1
二、设施农田系统重金属污染与控制 .....	5
三、设施农田系统重金属污染控制研究展望 .....	11
第二章 设施农田中重金属来源及污染现状 .....	17
一、设施农田中重金属来源概述 .....	17
二、我国畜禽粪便及商品有机肥中重金属含量特征 .....	21
三、磷肥中重金属含量及污染现状 .....	33
四、设施农田污泥的施用及其重金属含量特征 .....	38
五、设施农田灌溉水中重金属含量特征 .....	44
六、研究不足和未来研究发展方向 .....	46
第三章 设施农田生态系统中土壤重金属污染源头控制阈值 .....	52
一、农田重金属流平衡分析方法 .....	52
二、蔬菜种植体系土壤重金属流平衡分析 .....	61
三、土壤蔬菜系统土壤重金属年度累积速率 .....	65
四、设施农田生态系统中土壤重金属污染源头控制阈值控制 .....	68
五、土壤重金属污染源头控制存在的问题和发展方向 .....	70
第四章 重金属在土壤系统中的分布与运移 .....	75
一、土壤重金属污染和运移特征 .....	75
二、重金属在土壤中吸附和运移的机制模型 .....	83
三、微观环境和尺度效应对重金属在土壤中迁移的影响机制 .....	86
四、存在的问题和研究展望 .....	89
第五章 重金属在土壤—蔬菜系统中的迁移累积规律 .....	95
一、重金属的根际过程与植物效应 .....	95
二、重金属在蔬菜体内的运移分配 .....	105
三、重金属在蔬菜体内的富集规律 .....	110
四、存在的问题和研究展望 .....	117

第六章 重金属污染设施农田修复与利用的农艺措施 .....	125
一、作物品种选择与农产品质量安全 .....	125
二、作物互作修复利用重金属污染农田土壤 .....	129
三、重金属污染农田上农田废弃物管理 .....	137
四、施肥与作物对重金属的吸收 .....	142
五、农艺措施修复利用重金属污染农田存在的问题和研究展望 .....	157
第七章 微生物在土壤重金属污染修复中的作用和影响机制 .....	163
一、土壤微生物分布特性与重金属污染土壤生物修复 .....	163
二、微生物对土壤重金属生物有效性的影响和作用机制 .....	167
三、微生物对土壤重金属形态转化与运移的影响和作用机制 .....	171
四、土壤重金属污染微生物修复存在的问题与研究展望 .....	173
第八章 生物质炭在土壤重金属污染治理中的应用 .....	183
一、生物质炭基本特性 .....	183
二、生物质炭对土壤重金属生物有效性的影响及其原理 .....	197
三、生物质炭对作物吸收富集重金属的影响与机制 .....	206
四、存在的问题及研究展望 .....	213
第九章 蚯蚓粪在土壤重金属污染治理中的作用 .....	225
一、蚯蚓粪的基本性质及其在设施农田中的应用 .....	225
二、蚯蚓粪应用于修复土壤重金属污染方面的潜能 .....	227
三、蚯蚓粪对土壤中重金属赋存形态的影响 .....	230
四、蚯蚓粪中可能起钝化土壤重金属镉作用的主要因素 .....	235
五、蚯蚓粪对白菜吸收重金属镉的影响 .....	242
第十章 基于社会-生态框架的区域土壤重金属风险评价与分区调控对策 .....	253
一、区域土壤重金属社会-生态系统框架 .....	253
二、土壤重金属物质流风险评价模型以及时空风险制图技术 .....	256
三、社会-生态管理分区技术研究 .....	272
四、调控的社会经济、技术工程与立法政策等相关研究 .....	285
五、存在的问题及研究展望 .....	289



# 第一章 绪 论

## 一、我国设施农业发展现状及存在的土壤环境问题

世界人口的日益增加,食物需求的增加成为未来世界面临的巨大挑战之一,为解决这一问题,需要依靠集约化农业来增加食物供应量。随着生物技术、工程技术和计算机等高新技术在农业上的广泛应用,设施农业也因此成为全球最重要的农业生产方式之一(FAO,2002)。

设施农业是运用现代科技成果和方法,现代农业工程和机械技术,为农产品生产提供可以人为控制和调节的环境条件,甚至最适宜的环境资源条件,使作物处于最佳生长状态,保证和提高农产品产量,一定程度上摆脱了对自然环境的依赖而进行有效生产的农业。它具有高投入、高技术含量、高品质、高产量和高效益等特点,设施栽培基本脱离自然条件,可全年生产,反季节种植,从而可以获得最大的经济效益,是最有活力的农业新型产业(安国民等,2004)。

设施农业包括塑料大棚、温室、植物工厂化 3 种不同的技术层次,广义的设施农业主要包括设施栽培和设施养殖 2 个方面(李萍萍,2002;朱德文等,2007)。其中设施栽培主要是指蔬菜、花卉及果类的设施栽培,其主要设备有各类温室、塑料棚和人工气候室(箱)及其配套设备;设施养殖主要是指畜禽、水产品及特种动物的设施养殖,本书中涉及的设施农田主要是指设施栽培的内容。

### (一)设施农业发展现状与趋势

设施农业技术在 20 世纪 60 年代得到飞速发展,在荷兰、以色列、美国、日本等一些发达国家,主要是利用各种现代化的温室,进行工厂化农业生产,并开发出包括品种培育、环境调控、水肥管理及栽培等在内的一整套设施栽培技术和配套的设备。

我国设施农业的发展始于 20 世纪 30 年代,在 70 年代末至 80 年代初温室产业得到了大规模的发展,主要是从日本引进的日光温室栽培技术。“九五”期间,我国在设施农业方面的投资达 20 亿元,设施面积达 140 万  $\text{hm}^2$ (王焕然,2006)。具体来看,20 世纪 70 年代,地膜覆盖技术引入中国,对保温、保墒起到了很大的作用。80 年代,以日光温室、塑料大棚和遮阳网覆盖栽培为代表的设施园艺取得长足进步,形成以塑料棚为主的与风障、地膜覆盖、阳畦与温室等相

配套的保护地蔬菜生产体系。90年代,我国大规模地引进国外大型连栋温室及配套栽培技术,设施农业也以超时令、反季节的设施园艺作物生产为主得到迅猛发展。

20世纪末至21世纪初,我国设施农业迅猛发展(图1-1),2010年我国设施园艺面积已达363万 $\text{hm}^2$ ,其中设施蔬菜面积达344万 $\text{hm}^2$ ,占我国设施栽培总面积的95%以上,占全球设施栽培总面积的80%以上,成为世界上设施蔬菜面积最大的国家,并且还以每年10%左右的速度增长,设施蔬菜总产量超过1.7亿t,占蔬菜总产量的25%,产值占65%以上,年人均供应量达200kg,在解决我国蔬菜均衡供应方面发挥了巨大的作用(魏晓明等,2010;郭世荣等,2012;初江等,2004;杨其长,2001)。

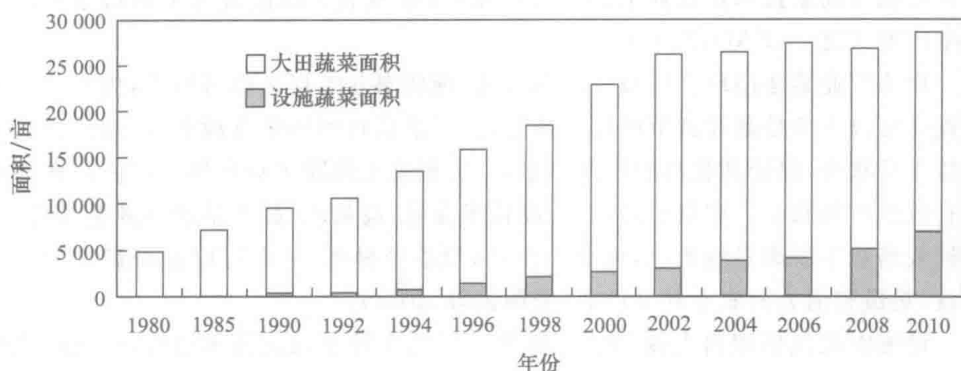


图 1-1 我国历年设施蔬菜播种面积

注:亩为非法定单位,1亩=666.7 $\text{m}^2$ 。

设施蔬菜生产优势区域主要集中在环渤海及黄淮地区,包括辽宁、北京、天津、河北、山东、河南及安徽中北部、江苏北部等冬春光热资源相对丰富、适宜发展设施蔬菜生产的地区(表1-1),面积约占全国设施蔬菜总面积的50%以上,其中山东省设施蔬菜面积约占全国的1/5以上(华小梅等,2013)。

表 1-1 我国设施蔬菜主要类型、优势品种和优势区域

设施类型	优势蔬菜品种	主要优势区域
日光温室	茄果类、瓜类、豆类、西甜瓜等喜温瓜菜;芹菜、韭菜等喜凉蔬菜	东北、华北、西北等光能资源较充足的地区,如辽宁、北京、天津、河北、山东、河南等
大中棚	果类、瓜类、豆类和叶菜类	北京、天津、河北、山东、河南
小拱棚	果菜、根菜、叶菜、水生蔬菜等	长江中下游地区以及西南、华南地区

资料来源:华小梅等,2013。

## (二)我国设施农业存在的主要环境问题

与露地蔬菜生产相比,设施蔬菜生产复种指数高,农药、化肥、有机肥、农膜等投入量大,封闭或半封闭的设施环境温度高、湿度大、无雨水淋洗等特点,明显不同于露天蔬菜产地生态环境,易造成污染物在土壤中积累及有效性增加,设施土壤盐渍化、酸化、污染物累积等环境问题日益严重,从而对设施蔬菜产地土壤生态环境及人体健康造成一定的负面影响。我国设施农业存在的主要环境问题如下:

### 1. 设施蔬菜产地土壤投入高,导致环境污染风险高

由表 1-2 可见,从 2009 年的肥料投入来看,全国耕地平均化肥使用水平为  $444 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,而设施蔬菜的化肥使用水平为  $950 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,是全国耕地化肥使用水平的 2 倍多,从不同作物设施菜地与露地蔬菜的投入来看,化肥用量是露地的 1.1~1.6 倍;农膜用量为 3~8 倍;农药的用量从费用上来看也是露地的 1.2~1.6 倍。土壤是自然界各种污染物最终归属地,是污染物的源和汇,由于设施蔬菜产地土壤环境负荷高,设施土壤中各类污染物累积加剧,重金属、农药、酞酸酯等各类污染物的残留问题较为突出,污染风险较高。

表 1-2 2009 年主要设施蔬菜与露地蔬菜农用物质投入比较

化肥投入		番茄		黄瓜		茄子		菜椒	
		设施	露地	设施	露地	设施	露地	设施	露地
费用/元	化肥	413.16	271.78	329.98	277.46	386.95	249.89	301.55	340.01
	农家肥	228.47	198.11	249.11	184.73	147.48	133.77	76.75	145.04
	农药	183.60	148.85	183.17	128.15	145.55	82.68	129.09	106.29
	农膜	361.93	83.52	354.38	51.88	199.66	56.79	188.34	48.63
化肥用量/(kg/亩)		69.48	43.70	57.13	48.60	61.70	45.16	51.68	47.27
农膜用量/(kg/亩)		24.20	6.39	24.10	3.72	13.01	4.17	3.30	3.30

注:资料来源:《2010 年全国农产品成本收益资料汇编》,各类蔬菜均为大中城市统计数据。

我国设施农业平均灌溉量 50~60 mm/次,平均每季氮肥施用量(以氮计)超过  $1000 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ,农药用量达 179 万 t/年,远远超过作物的需要(樊兆博,2014)。这不仅降低经济效益,而且导致土壤退化,对农药、化肥的依赖性增强,甚至还降低农产品质量,重金属和农药含量超标。同时,设施土壤也存在较严重的盐渍化、养分过度富集化等并存的问题(刘德等,1998;姜勇等,2005),且这种变化一定程度上与施肥存在直接关系,会导致土壤质量和生产力的衰退(曾希柏等,2010)。

## 2. 设施农田土壤结构性能和质量下降

设施农田土壤由于经过长期耕作,其对土壤质量的影响主要表现在土壤结构性能下降、孔性变差等方面。例如,设施蔬菜地常处于半封闭状态,与露地生态环境条件相比有明显差异,同时由于有机肥和化肥(尤其是氮肥)的大量施用等不合理的施肥和耕作,导致设施土壤理化性状和生物学性状发生了重大变化(Riffaldi等,2003;Liu等,2006),主要表现为土壤酸化、盐渍化、养分不平衡。设施土壤已出现了明显的酸化趋势,且随着设施种植年限的延长,土壤酸化程度增加(Riffaldi等,2003;党菊香等,2004;曾希柏等,2010)。

设施栽培土壤常年处于薄膜覆盖状态,缺少雨水淋洗,而且农业生产资料的投入量较大,产生了一系列产地环境质量下降的问题,如农作障碍及存在“白色污染”隐患等。调查发现绝大多数种植户的废旧塑料薄膜未进行任何处理,全部遗留在田间。长此以往将严重破坏土壤结构,造成地力大幅下降,影响农作物收成,而且这种污染长时间内根本无法消除。

## 3. 过量投入导致食品安全问题

氮磷在设施蔬菜产地土壤中的高量积累严重影响到周围水体和田间蔬菜的质量。南方设施蔬菜生产中不合理的灌水或揭棚洗盐方式,使得氮磷向地表水的排放负荷超出露天蔬菜产地2~3倍。而北方设施蔬菜种植区大量积累的氮磷通过较沙的土壤进入地下水,大部分地下水硝态氮平均含量均超过了我国《生活饮用水卫生标准(GB 5749—2006)》限值,远远高于大田区。此外,设施蔬菜硝酸盐含量也显著高于露地蔬菜,如叶菜类硝酸盐最高可达蔬菜硝酸盐最高限量标准的1.4倍(黄标等,2015)。农药持久性的增加,导致施药后设施蔬菜农药残留是同期露地蔬菜的1.3~2.1倍,进一步增加了农药对蔬菜的危害效应(黄标等,2015)。

土壤中酞酸酯会直接被蔬菜根系吸收并向地上部运移,或挥发至空气中后被蔬菜吸收。典型设施蔬菜产地调查结果表明,6种酞酸酯在蔬菜可食部分的积累量可达0.79~7.30 mg/kg,是露天蔬菜中的2~3倍。其中具有类雌激素作用的邻-苯二甲酸二辛酯浓度出现高于欧盟食品最高限制量(1.5 mg/kg)的情况(汪军等,2013)。

土壤中抗生素的积累可引起周围地表水或地下水的污染,其生态风险不容忽视。对南京周边地区设施蔬菜土壤抗生素污染调查发现,一些设施蔬菜产地周边河流和水塘的水体中监测到高含量、与土壤中抗生素类型一致的抗生素类药物,明显高于一般河流淡水中的抗生素浓度,高出一般淡水中的3~15倍(黄标等,2015)。此外,长期施用畜禽粪便的土壤可诱导产生70%的抗生素抗药性菌株,有可能给环境生物、人类健康造成不利影响。

从整体看,目前国内外的相关研究主要集中在土壤盐渍化、酸化、养分积累、微生物数量等方面,而重金属作为关系到土壤环境和农产品质量安全的具有潜在危害的重要污染物,其污染不仅对土壤质量产生负面影响,当其积累至一定程度至过量时,还会抑制作物生长发育、降低作物产量与品质,并最终通过食物链危害动物和人类的健康。

## 二、设施农田系统重金属污染与控制

### (一)设施蔬菜中重金属污染现状

设施栽培土壤中重金属、农药等污染物的累积造成农产品的数量和质量下降,导致区域粮食安全问题。目前,我国菜地土壤重金属污染形势非常严峻。特别是城市郊区地带,同时也是设施栽培比较集中的区域,由于城郊与城市相连,交通方便,作为蔬菜生产并供给城市的重要基地,同时城郊往往又与工业生产区、污灌区、交通干线接近,成为重金属污染的重要区域。

被誉为“中国蔬菜之乡”的寿光是我国最大的蔬菜生产基地,然而化学肥料的大量施用等,使得寿光地区部分蔬菜重金属含量超标(徐晓慧等,2010)。蚌埠市市售蔬菜中,叶菜类蔬菜中主要是 Pb、Cd 超标,其中 Pb 超标率为 100%,最高含量可达 0.473 mg/kg,超出国家允许量的 2.37 倍,平均超标 1.6 倍(朱兰保等,2006)。福州市不同区域种植的蔬菜样品中重金属含量与其对应区域土壤中重金属含量的高低大体一致,也是城郊区蔬菜重金属含量较高,蔬菜中重金属含量出现超标的元素为 Pb、Cd,其中 Cd 在城郊区、近郊区、中低山区和滨海区都出现超标现象(魏为兴,2007)。

由此可见,根据中国的蔬菜食品卫生标准,我国目前蔬菜重金属污染现状已不容乐观,各主要大、中城市郊区的蔬菜都已受到一定程度的重金属污染。尽管各城市采用的评价标准不一,但重金属元素在蔬菜中的积累是很明显的,部分已达到了较高的残留水平,有的甚至已超过了食品卫生标准。

### (二)设施农田系统土壤重金属污染现状

蔬菜中累积的重金属主要来源于土壤,国外对设施菜地重金属方面的研究涉及较少,主要是因为国外多采用的是无土栽培技术,而我国设施栽培目前主要是有土栽培,农用化学品和有机肥的投入量大、复种指数高,因此设施土壤的重金属累积甚至超标问题较为严重。李树辉(2011)调查了北方典型区域(山东寿光、河南商丘、吉林四平和甘肃武威)的设施菜地,发展这四个区域中以土壤中 Cd 的超标问题最为突出,样本超标比例顺序为“吉林四平(39.8%)>山东寿光(27.4%)>河南商丘(6.1%)>甘肃武威(1.0%)”(表 1-3)。

表 1-3 我国几个农业主产区耕地表层重金属含量状况 mg/kg

重金属元素	吉林四平( $n=147$ )				山东寿光( $n=128$ )			
	平均值± 标准差 <sup>①</sup>	超过 I 级% <sup>②</sup>	超过 II 级% <sup>③</sup>	超过 III 级% <sup>④</sup>	平均值± 标准差 <sup>①</sup>	超过 I 级% <sup>②</sup>	超过 II 级% <sup>③</sup>	超过 III 级% <sup>④</sup>
Zn	74.5±27.9	15.6	0	0	104±55	42.2	3.1	0.8
Cu	26.0±14.7	21.8	0	0	28.6±12.6	18.8	0	0
Cd	0.6±0.9	42.2	21.1	7.5	0.4±0.4	59.4	18.0	4.7
Cr	46.9±14.8	0.7	0	0	51.4±9.9	0	0	0
As	8.9±3.0	0.7	0	0	9.7±2.0	1.6	0	0
Ni	21.2±5.6	0	0	0	29.9±7.7	10.2	2.3	0
Pb	15.2±4.0	0	0	0	18.4±4.3	1.6	0	0

重金属元素	河南商丘( $n=182$ )				甘肃武威( $n=135$ )			
	平均值± 标准差 <sup>①</sup>	超过 I 级% <sup>②</sup>	超过 II 级% <sup>③</sup>	超过 III 级% <sup>④</sup>	平均值± 标准差 <sup>①</sup>	超过 I 级% <sup>②</sup>	超过 II 级% <sup>③</sup>	超过 III 级% <sup>④</sup>
Zn	70.9±13.4	2.7	0	0	82.3±15.4	11.1	0	0
Cu	22.8±6.6	3.8	0	0	32.1±6.8	23.7	0	0
Cd	0.3±0.2	52.2	17.6	1.6	0.4±0.2	85.9	11.9	0.7
Cr	52.1±11.7	1.1	0	0	53.4±4.1	0	0	0
As	10.9±2.3	4.9	0	0	13.7±2.1	25.2	0	0
Ni	27.2±4.4	1.6	0	0	29.1±2.3	0	0	0
Pb	15.9±3.9	1.6	0	0	20.7±3.6	0.7	0	0

① Mean±Standard deviation; ② >standard I %; ③ >standard II %; ④ >standard III %.

土壤重金属随种植年限增加而增加已成普遍现象。李见云等(2006)研究发现,设施土壤的重金属 Cu、Zn、Pb 均随着种植年限的延长而升高,而 Cd 增加的幅度相对较小。还有研究发现,南方城郊设施蔬菜基地种植 5 年以上,重金属 Cu、Cd、Zn 等即出现明显积累,积累量可达背景的 1.5 倍以上。而北方日光温室土壤中 Cd、Cu、Zn、Hg 含量随种植年限增加的趋势更为明显,Cd、Cu、Zn、Hg 的平均累积速率分别为 68、5 100、9 300 和 7 g/(hm<sup>2</sup>·年)。某些地方种植 10 年左右的设施蔬菜产地土壤 Cd 含量最高可比露天菜地土壤高出 5 倍多(Yang 等,2013; Chen 等,2014)。整体来说,Cu 和 Zn 的累积速率最快,而 Cd 的累积速率最低,但其达到国家 II 级标准值的时间最短,风险相对较高(李树辉,2011)。张汝洁(2013)对天津三个区县保护地大棚的研究也发现了类似规律,Zn 元素的累积速率最大,为 2.43 mg/(kg·年),Cu 和 Cd 元素的累积程度最高。

随着设施土壤重金属的累积,超标问题比较严重。不少设施蔬菜基地发现土

壤某些重金属含量超过《温室蔬菜产地环境质量评价标准(HJ/T 333—2006)》(国家环境保护总局,2006)。即使未超标,但随着设施蔬菜土壤高强度利用条件下土壤理化性质的剧烈变化,如土壤 pH 明显降低、有机质积累、土壤盐分含量明显升高等,明显提高了土壤中重金属的生物有效性和作物对重金属的吸收。这导致设施蔬菜中一些重金属含量普遍高于露天蔬菜,甚至出现超过《食品中污染物的限量(GB 2762—2005)》(中华人民共和国卫生部,2005)的现象,尤其叶菜类蔬菜超标较多。而设施蔬菜产地周边的露天蔬菜中则较少出现超标(Yang 等,2013;Chen 等,2014)。

### (三)设施农田系统土壤重金属污染来源

土壤中重金属的来源主要有自然来源和人为干扰输入两种途径。在自然因素中,成土母质和成土过程对土壤重金属的影响很大;随着城市化进程及工农业的迅速发展,人为原因导致的重金属迁移进入生物圈已经日益成为重金属环境地球化学循环的重要过程之一(郑袁明,2003)。Luo 等以整个国家为研究范围,统计了各个不同来源向我国农田土壤带入重金属的状况(Luo 等,2009),包括大气沉降、畜禽粪、肥料与农药、污灌、污泥等,发现对于 As、Cr、Hg、Ni 和 Pb 的总输入量,大气沉降贡献率占 43%~85%,对于 Cd、Cu、Zn,畜禽粪贡献率分别约为 55%、69%、51%。在设施农田中,因为是封闭的空间,来自大气的重金属污染源很少,设施农田的重金属主要来自污水灌溉,化学肥料和有机肥料的使用。

设施农田中有机肥料的大量施用也带来了大量重金属和抗生素等污染物。据调查,我国主要商品有机肥和有机废弃物的重金属含量状况,鸡粪中以 As、Cd、Cu 超标为主;猪粪中以 Cu、Zn、Cd 超标为主;牛粪中以 Cd、Zn 超标为主;以鸡粪、猪粪为原料的有机肥中普遍残留重金属。我国商品有机肥重金属含量变异很大,若参照德国腐熟有机肥重金属限量标准,鸡粪中 Cu、Ni、Cd 等超标率为 21%~66%,牛粪中 Cd 等超标率为 2%~38%,猪粪中 Zn、Cu、Cd 超标率为 10%~69%,堆肥 Ni、Cd 的超标率分别为 83% 和 42%(刘荣乐等,2005)。可见,有机肥大量施用是造成设施蔬菜土壤重金属污染的直接原因。

污水灌溉在世界范围内是普遍存在的现象,其可以为污水的排放提供方便,能够为作物生长提供养分,且为土壤提供有机质,同时也会对土壤环境和作物生产造成的负面的影响,造成土壤重金属的累积,以及地下水质量的污染。中国自 20 世纪 70 年代初期以来实行用生活污水和工业污水灌溉农田(陈怀满,1996),特别是北方地区。

农业生产过程中施用含有重金属的农药、含重金属的劣质化肥和有机肥,都可导致土壤中重金属的污染。大量含有重金属的农药是造成土壤重金属污染的另一个重要原因,比如含砷、铜的杀菌剂长期使用会导致土壤中砷和铜的积累(谢正苗

等,2006)。此外,由于农用塑料薄膜生产时使用的热稳定剂中含有镉和铅,农业生产中大量使用塑料薄膜也可造成土壤重金属的污染(郑喜坤等,2002)。

大田重金属污染具有很强的区域性,不同地区污染农田的重金属种类和含量差异很大,与相应的污染源密切相关。设施农田重金属没有十分明显的区域性,主要取决于养管理、种植制度等因素,尤其是施用的肥料种类和数量,在很大程度上决定了设施农田土壤重金属种类和含量,例如,施用猪粪超过5年,土壤中Cu含量从1~2 mg/kg增加到3~10 mg/kg;长期大量施用磷肥,会使得土壤中Cu、Zn、Cd污染指数增高(高砚芳等,2007);硝酸铵、磷酸铵、复合肥中砷含量高达50~60 mg/kg(崔德杰和张玉龙,2004),长期施用必然导致土壤砷污染。除了肥料,为防止病虫害、促进作物生长发育、提高作物产量等,农药和化肥在设施蔬菜的生产过程中也得到广泛使用,然而农药和化肥中均不同程度的含有重金属,过量或不合理施用势必导致重金属在设施菜地土壤中累积,从而加剧设施蔬菜重金属污染。其中农药中常含有汞、砷、铜、锌等重金属,如真菌农药中常含有铜和锌,波尔多液等制剂中含有一定数量的铜。此外,污水灌溉产生的重金属污染也不容忽视,工矿企业污水中大量的汞、镉、铅、锌、砷等重金属元素以灌溉形式进入土壤,被土壤截留、固定后形成累积,同时也容易产生重金属淋移,污染地下水。

不同作物吸收、转移、富集重金属的能力有明显的差异,水稻、小麦、玉米等粮食作物,根系吸收的重金属转移到籽粒的比例比较低,因此,即使土壤遭受轻微的污染,不会对食物安全构成明显的危害。然而设施栽培主要种植瓜果、蔬菜,这些作物生育期短,吸收富集重金属能力相对比较强,尤其是叶菜类、根茎类作物,比起粮食作物,其食用部分更容易遭受重金属污染(王登启,2008)。

因此,蔬菜对重金属元素的吸收与累积威胁着人类的食品安全,尤其是Cd和Pb等环境中最受人们关注的有毒元素。王丽英等(2009)研究发现河北省设施蔬菜土壤中出现了不同程度的重金属污染和累积,其中进口磷肥是设施菜地中污染的主要来源,无限量标准的畜禽粪便和有机肥是重金属的主要来源。通过调查,杭州市蔬菜基地和由于受到人为活动的影响而在土壤中有所积累,远超当地的土壤背景值的相关研究也表明,设施菜地中重金属含量与菜地种植年限呈显著正相关(谢正苗,2006;李树辉,2010)。从总体上看,对设施菜地这种特殊种植模式下的土壤环境质量问题缺少针对性的系统研究,因此还需引起各界学者的高度重视。

#### (四)设施农田系统重金属控制路径

随着农田土壤重金属污染问题的日益严重,大量设施农田生产力下降,我国的环境安全和粮食安全面临严峻挑战,如何解决这一问题,成为未来环境工作者的工



作重点。由于设施农田重金属来源、种类以及影响程度和范围等与大田重金属污染有明显的差异,需在设施农田重金属污染控制方面,遵循大田重金属污染控制基本原理、技术规范与标准,研究农田重金属污染防控战略及其技术对策。

国内外用于修复土壤重金属污染的技术有:物理修复技术、化学修复技术和生物修复技术。物理修复技术主要包括溶液淋洗法、物理分离法、固化稳定法、电动力的法、冻融法等;化学修复技术主要包括溶剂萃取法、土壤改良剂投加法、氧化法、还原法等。但是由于物理、化学修复技术的成本高,容易破坏土壤结构和土壤微生物,以及易造成“二次污染”等应用局限性的问题,因此生物修复技术越来越受到重视。生物修复主要是利用植物、微生物和动物的代谢作用来降低或稳定污染物的毒性。生物修复技术主要为微生物修复技术、动物修复、植物修复和酶学修复4种类型。

目前,传统的修复方法对局部污染严重的土壤效果显著,但其成本高且对土壤扰动较大,难以应用到大规模的设施农田污染中去。以植物修复和微生物为中心的生态修复方法弥补了现有各种污染修复方法的不足,同物理、化学和生物修复相比,生态修复已经有了进一步的拓宽和深化。在我国,污染土壤修复经历了清洁技术、生物修复的历程,已经进入生态修复阶段。可以说,生态修复研究是修复污染环境介质发展与提高的需要。关于生态修复的理论还比较粗浅,但随着研究的深入,新的修复理论必将在指导污染土壤修复的实践方面发挥重要作用。设施农田重金属污染防控路径及技术对策具体可包括如下几个方面:

### 1. 完善农业产地重金属评价方法与技术体系

利用当地土壤环境背景标准对土壤环境重金属污染状况进行评价,综合分析了解当地土壤重金属污染的状况与影响程度。积极借助于先进的技术手段,如空间信息技术等,研究土壤重金属污染的有效方法及其适用条件,同时利用如内梅罗综合污染指数法、模糊数学法、地质累积指数法等多种不同适用范围的土壤重金属污染的评价方法,科学、合理、准确评价土壤中重金属的污染程度,制定相应的国家标准,建立全过程质量监控监测网络,以及相关的技术规程与规范等。

### 2. 研究农业产地重金属污染的物理防控技术

对污染面积较大且主要以中轻度为主的重金属污染设施农田而言,其修复技术与方式的选择需充分考虑农业生产方式和开发类型,同时要统筹兼顾有效性、经济性和推广性。如开展工程技术措施,主要包括客土法、翻耕混匀法、去表土法、表层洁净土壤覆盖法等技术模式。但农田重金属污染工程治理技术涉及工程量大,成本高,一般只适宜于小面积且染污严重的土壤修复,而且容易引起农田肥力减弱,耕层破坏。