

土壤污染与修复理论和实践研究丛书

重金属污染土壤的 修复机制与技术发展

Remediation Mechanism and
Technological Development of
Heavy Metal Polluted Soil

骆永明 等 著



科学出版社

土壤污染与修复理论和实践研究丛书

重金属污染土壤的 修复机制与技术发展

骆永明 等 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是作者近 20 年来开展重金属污染农田、矿区土壤的植物修复和物理-化学修复的理论、方法和技术研究工作的全面总结。重点介绍了重金属的超积累植物吸取机制、高耐性植物根际稳定机制、配位诱导强化吸取机制、配位蒸发浓缩机制和物化稳定机制。并以镉、锌、铜等污染农田土壤为例,系统介绍了修复植物的筛选与鉴定、耐性与积累、修复技术发展及评估、田间示范应用与修复后植物安全处置与资源利用技术。同时介绍了重金属-有机复合污染土壤的植物修复、蒸发修复及钝化修复技术发展,以及矿区尾矿基质改良与稳定化修复技术发展。本书还介绍了重金属污染土壤修复效果的生物学评估方法与指标,提出了既不改变土壤肥力、又能净化土壤污染的绿色超积累植物修复新途径。这些研究成果对发展重金属污染土壤的可持续修复原理与技术、推动土壤修复学和修复土壤学建设具有重要的理论和实践指导价值。

本书可作为土壤污染防治与修复、环境保护、农业管理、生态建设、国土资源利用等专业和领域的管理者、科研工作者、研究生等的参考书,也可作为高等院校、科研院所土壤学、环境科学、环境工程、生态学、农学等相关学科的研究生教学参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

重金属污染土壤的修复机制与技术发展/骆永明等著. —北京:科学出版社, 2016.12

(土壤污染与修复理论和实践研究丛书)

ISBN 978-7-03-052188-0

I. ①重… II. ①骆… III. ①土壤污染—重金属污染—修复—研究 IV. ①X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 022192 号

责任编辑:周 丹 梅靛雅/责任校对:贾娜娜

责任印制:张 伟/封面设计:许 瑞

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>

北京厚诚则铭印刷科技有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 12 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2016 年 12 月第一次印刷 印张: 24 3/4

字数: 586 000

定价: 168.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



作者名单

主要著者

骆永明 吴龙华 宋 静 滕 应 胡鹏杰
章海波 涂 晨 刘五星 李连祯

著者名单 (按姓氏笔画排序)

马 莹	马文亭	王国庆	王家嘉	田 晔
毕 德	过 园	乔显亮	刘 玲	刘五星
孙小峰	李 宁	李 华	李 柱	李 敏
李连祯	李晨曦	吴龙华	余海波	沈丽波
宋 静	张殿顺	胡鹏杰	查红光	赵 冰
赵 静	钟继承	钟道旭	姚春霞	骆永明
翁高艺	高 岩	唐明灯	涂 晨	黄树焘
章海波	蒋先军	蒋金平	滕 应	潘 澄

序 言

自 20 世纪 80 年代以来,随着高强度的人类活动和经济社会的快速发展,大量人为排放的重金属和有机污染物以不同类型、方式、途径进入土壤,造成土壤污染,危及土壤质量安全与生态系统及人体健康。土壤环境质量与安全健康保障令人担忧。土壤污染管控与修复成为国家生态环境治理的重大现实需求。土壤污染与修复的基础理论研究、技术装备研发、监管体系建设和产业化发展已是新时期我国土壤环境保护的重要任务。

骆永明研究员应聘 1997 年度中国科学院“百人计划”,于 1998 年从英国留学回国,在南京土壤研究所组建了“土壤圈污染物循环与修复”研究团队。2001 年起,先后在国家杰出青年科学基金项目、973 计划项目、863 计划项目、国家自然科学基金重点、面上及重大国际合作项目、中国科学院创新团队国际合作伙伴计划项目、环保公益性行业科研专项项目、江苏省创新学者攀登项目等支持下,他带领团队成员,系统开展了我国沿海经济快速发展地区(长江、珠江、黄河三角洲及香港地区)土壤环境污染状况、过程、效应、评估、植物修复、微生物修复及化学-生物联合修复等理论、方法、技术、标准及工程应用方面的研究与实践,取得了诸多创新性研究成果。他于 2005 年撰文提出了“土壤修复”是一门土壤科学和环境科学的分支学科的论述。自 2000 年以来,发起并连续组织召开了“第一、二、三、四、五届土壤污染与修复国际会议”,不仅促进和带动了自身的科学前沿研究与技术发展,而且引领和推动了我国乃至世界土壤环境和土壤修复科技的研究与发展。

即将出版的“土壤污染与修复理论和实践研究丛书”正是骆永明及其团队(包括博士后、研究生)近 20 年来研究工作的系统总结。该丛书共分四册,分别介绍了《土壤污染特征、过程与有效性》、《土壤污染毒性、基准与风险管理》、《重金属污染土壤的修复机制与技术发展》和《有机污染土壤的修复机制与技术发展》。这是目前我国乃至全球土壤污染与修复研究领域的大作,既有先进的理论与方法,又有实用的技术与规范,还有田间实践经验与基准标准建议,为土壤科学进步与区域可持续发展做出了重大贡献。该丛书的出版,正逢国家“土壤污染防治行动计划”(“土十条”)颁布和各省(市、区)制定“土壤污染防治行动计划”实施方案之际。相信,该丛书可供“全国土壤污染防治行动计划”的实施借鉴,将推进我国土壤污染与修复的创新研究和产业化发展。



中国科学院院士、南京土壤研究所研究员

2016 年 12 月于南京

前 言

土壤污染是一个全球性环境问题，可以发生在农用地，也可以出现在建设用地，还可以存在于矿区和油田。早在 20 世纪 70 年代，世界上工业先进、农业发达的国家就开始调查研究工业场地和农业土壤的污染问题，寻找其解决的技术途径。在同一时期，我国进行了污灌区农田土壤污染与防治研究，开启了土壤环境保护工作。进入上世纪 80 年代，我国在土壤有机氯农药和砷、铬等重金属污染及其控制研究上取得了明显进展；90 年代初基于第二次全国土壤调查数据确定了土壤环境背景值，揭示了其区域分异性，并于 1995 年首次颁布了土壤环境质量标准，为全国土壤污染防治与环境保护奠定了新基础。至 90 年代末，土壤重金属、农药、石油污染的微观机制和物化控制、微生物转化技术研究取得了新进展，重金属污染土壤的植物修复研究在我国起步。2000 年 10 月在杭州召开了第一届“International Conference of Soil Remediation”，标志着我国土壤修复科学、技术、工程和管理研究与发展序幕的全方位拉开。迈入新世纪后，我国土壤污染与修复工作得到进一步重视。科技部、国家自然科学基金委员会、中国科学院等相继部署了土壤污染与控制修复科技研究项目；2001 年污染土壤修复技术与大气、水环境控制技术同步纳入国家“863”计划。2006 年环保部和国土资源部首次联合开展了全国土壤污染调查与防治专项工作，2014 年两部委联合发布的《全国土壤污染状况调查公报》明确指出，全国土壤环境状况总体不容乐观，部分地区土壤污染较重，耕地土壤环境质量堪忧，工矿业废弃地土壤环境问题突出。土壤污染防治与修复成为国家环境治理和生态文明建设的重大现实需求。土壤修复的基础研究、技术研发、监管支撑和产业发展已是新时期我国土壤环境保护的重要任务。

恰逢其时，我应聘了 1997 年度中国科学院“百人计划”，于 1998 年回国，在南京土壤研究所开辟了土壤污染与修复研究方向。近 20 年来，在国家、地方和国际合作项目资助下和各方支持下，率领研究团队，系统研究了在我国经济快速发展过程中不同区域和不同土地利用方式下土壤重金属和有机污染规律，建立了土壤污染诊断、风险评估、基准与标准制定方法，发展了土壤污染的风险管理和修复技术，提出了“土壤修复”学科。“土壤污染与修复理论和实践研究丛书”就是这些研究工作及其进展的系统总结，丛书共分四册，分别为《土壤污染特征、过程与有效性》、《土壤污染毒性、基准与风险管理》、《重金属污染土壤的修复机制与技术发展》和《有机污染土壤的修复机制与技术发展》。希望该丛书的出版有助于全国各地“土壤污染防治行动计划”的设计与实施，有益于我国土壤污染与修复的创新研究和产业化发展。

本著作为第三册，重点介绍了重金属的超积累植物吸取机制、高耐性植物根际稳定

机制、配位诱导强化吸取机制、配位蒸发浓缩机制和物化稳定机制。并以镉、锌、铜等污染农田土壤为例,系统介绍了修复植物的筛选与鉴定、耐性与积累、修复技术发展、评估、田间示范应用与修复后植物安全处置与资源利用技术。同时介绍了重金属-有机复合污染土壤的植物修复、蒸发修复及钝化修复技术发展,以及矿区尾矿基质改良与稳定化修复技术发展。此外,还介绍了重金属污染土壤修复效果的生物学评估方法与指标,提出了既不改变土壤肥力、又能净化土壤重金属污染的绿色植物修复新途径。这些研究成果对发展重金属污染土壤的可持续修复原理与技术、推动土壤修复学和修复土壤学建设具有重要的理论和实践指导价值。

全书共分五篇。第一篇介绍镉锌污染土壤的植物修复机制与技术发展,共分五章:第一章 镉锌污染土壤的超积累植物吸取修复研究进展;第二章 遏蓝菜对镉锌污染土壤的吸取修复机制与技术发展;第三章 印度芥菜对镉锌污染土壤的吸取修复机制与技术发展;第四章 伴矿景天对镉锌污染土壤的吸取修复机制与技术发展;第五章 镉锌超积累植物产后安全处置原理与技术发展。第二篇介绍铜污染土壤的植物修复机制与技术发展,共分五章:第六章 超积累植物在铜污染土壤修复中的应用进展;第七章 印度芥菜对铜污染土壤的植物修复及其有机调控;第八章 饭包草对铜污染的植物修复;第九章 香薷植物对铜污染土壤的吸取修复机制与技术发展;第十章 铜富集植物型生物肥料的研制及应用。第三篇介绍重金属复合污染土壤的修复机制与技术发展,共分三章:第十一章 铜砷复合污染土壤的蜈蚣草修复;第十二章 重金属复合污染土壤的络合蒸发修复和植物蒸腾驱动螯移-基质固定修复;第十三章 重金属复合污染农田土壤的钝化机制与修复技术发展。第四篇介绍矿区尾矿基质改良与稳定化修复机制与技术发展,共分两章:第十四章 铜陵铜尾矿基质改良与能源植物稳定化修复机制与技术发展;第十五章 德兴铜尾矿库基质改良与稳定化机制与技术发展。第五篇介绍连续植物修复下重金属复合污染土壤的质量变化,共分四章:第十六章 连续植物修复下重金属复合污染土壤的理化性质变化;第十七章 连续植物修复后重金属复合污染农田土壤的重金属含量变化;第十八章 连续植物修复后重金属复合污染土壤的生物学特性变化;第十九章 连续植物修复对重金属复合污染农田土壤酶活性的影响。

本书吸收了国家科技部“十五”“973”计划项目(2002CB410800)、“十二五”“863”计划重大项目(2012AA06A200),国家自然科学基金委杰出青年科学基金(40125005)、重点(40432005、41230858)、面上(49871042)及重大国际合作项目(40821140539),中国科学院“百人计划”项目(重金属污染土壤的评价与生物修复)、创新团队国际合作伙伴计划项目(CXTD-Z2005-4)、知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-404)、江苏省攀登学者计划项目(BK2009016)等科研项目的部分研究成果,是在研究团队成员(包括博士后和研究生)的辛勤努力下共同完成的。本书的主要执笔人为:骆永明、吴龙华、宋静、滕应、胡鹏杰、章海波、涂晨、刘五星、李连祯;参加相关研究和本书撰写工作的还有:马文亭、马莹、王国庆、王家嘉、田晔、过园、毕德、乔显亮、刘玲、孙小峰、

李宁、李华、李柱、李晨曦、李敏、余海波、沈丽波、宋静、张殿顺、赵冰、赵静、查红光、钟继承、钟道旭、姚春霞、翁高艺、高岩、唐明灯、黄树焘、蒋先军、蒋金平、潘澄，以及付传城、马海青、周倩等。全书由李连祯和骆永明统稿，骆永明定稿。需要指出的是考虑到丛书的系统性，本书中的部分内容引自我们早期出版的有关专著。还需要一提的是为保持早期研究工作的原始性，我们在研究内容及其参考文献上未作新的补充。

由于作者水平有限，书中疏漏之处在所难免，恳切希望各位同仁给予批评指正。



2016年12月于烟台

目 录

序言
前言

第一篇 镉锌污染土壤的植物修复机制与技术发展

第一章 镉锌污染土壤的超积累植物吸取修复研究进展	3
第一节 镉锌超积累植物资源调查	3
第二节 超积累植物对镉锌的耐性与富集机制	4
第三节 镉锌超积累植物吸取修复效果及应用示范	8
参考文献	14
第二章 遏蓝菜对镉锌污染土壤的吸取修复机制与技术发展	20
第一节 遏蓝菜镉超积累和耐受的遗传基础及分子机制	20
第二节 遏蓝菜吸取修复对根际土壤溶液性质的影响	35
参考文献	37
第三章 印度芥菜对镉锌污染土壤的吸取修复机制与技术发展	40
第一节 印度芥菜对镉锌的富集特征及其对土壤中镉锌生物有效性的影响	40
第二节 镉锌污染土壤的印度芥菜吸取修复及络合诱导机制	43
参考文献	49
第四章 伴矿景天对镉锌污染土壤的吸取修复机制与技术发展	52
第一节 景天植物修复镉锌污染土壤的生理生化基础	52
第二节 镉锌污染土壤的伴矿景天植物修复强化调控措施	65
第三节 镉锌污染土壤的伴矿景天植物-微生物联合修复技术	78
参考文献	89
第五章 镉锌超积累植物产后安全处置原理与技术发展	95
第一节 伴矿景天无害化热处置方法原理	95
第二节 热处理过程中伴矿景天常规污染物的排放与重金属迁移转化	101
第三节 伴矿景天流化床焚烧过程中多环芳烃的排放	112
参考文献	118

第二篇 铜污染土壤的植物修复机制与技术发展

第六章 超积累植物在铜污染土壤修复中的应用进展	123
第一节 铜超积累植物资源调查	123
第二节 超积累植物对铜的耐性与富集机制	125
第三节 超积累植物修复铜污染土壤的调控途径	131
参考文献	134
第七章 印度芥菜对铜污染土壤的植物修复及其有机调控	137
第一节 污灌水稻土铜污染的植物修复及其有机调控作用	137
第二节 EDTA 和低分子量有机酸对铜污染水稻土的诱导强化植物修复	142
第三节 EDTA 和低分子量有机酸铜污染旱地红壤的诱导强化植物修复	146
参考文献	152
第八章 饭包草对铜污染的植物修复	153
第一节 饭包草对铜的吸收积累	153
第二节 饭包草对铜的生理响应及解毒机制	160
参考文献	170
第九章 香薷植物对铜污染土壤的吸取修复机制与技术发展	171
第一节 香薷植物修复铜污染的生理生化基础	171
第二节 铜污染土壤植物修复的化学调控途径	177
第三节 铜污染土壤的香薷植物-微生物联合修复	205
参考文献	224
第十章 铜富集植物型生物肥料的研制及应用	231
第一节 不同环境因子对海州香薷堆肥品质与物质转化的影响	231
第二节 香薷植物堆肥对缺铜土壤中冬小麦生长和铜吸收的影响	239
参考文献	242

第三篇 重金属复合污染土壤的修复机制与技术发展

第十一章 铜砷复合污染土壤的蜈蚣草修复	247
第一节 铜砷污染对蜈蚣草地上部生物量的影响	247
第二节 土壤溶液-土壤-蜈蚣草体系中砷的分配特征	249
第三节 土壤溶液-土壤-蜈蚣草体系中铜的分配特征	254

第四节 土壤溶液-土壤-蜈蚣草的磷的分配特征	257
参考文献	259
第十二章 重金属复合污染土壤的络合蒸发修复和植物蒸腾驱动螯移-基质固定修复 ..	262
第一节 重金属复合污染土壤的络合蒸发修复	262
第二节 重金属复合污染土壤的植物蒸腾驱动螯移-基质固定修复	270
参考文献	274
第十三章 重金属复合污染农田土壤的钝化机制与修复技术发展	276
第一节 调理钝化剂施用模式和剂量的模拟优化	276
第二节 调理钝化剂的田间原位修复效果	278
参考文献	280
 第四篇 矿区尾矿基质改良与稳定化修复机制与技术发展	
第十四章 铜陵铜尾矿基质改良与能源植物稳定化修复机制与技术发展	285
第一节 基质改良剂的筛选及其改良效果	285
第二节 能源植物用于尾矿基质植物稳定修复和植被恢复	300
参考文献	309
第十五章 德兴铜尾矿库基质改良与稳定化机制与技术发展	311
第一节 基质改良剂及其施用量的筛选	311
第二节 污泥田间施用的改良效果及环境风险	314
参考文献	318
 第五篇 连续植物修复下重金属复合污染土壤的质量变化	
第十六章 连续植物修复下重金属复合污染土壤的理化性质变化	321
第一节 连续超积累植物修复对重金属污染土壤的物理化学性质影响	321
第二节 连续三年田间原位植物修复对土壤理化性质的影响	322
第三节 不同植物修复方式对土壤理化性质的影响	323
参考文献	325
第十七章 连续植物修复后重金属复合污染农田土壤的重金属含量变化	326
第一节 连续超积累植物修复对农田土壤重金属含量的影响	326
第二节 连续三年田间植物原位修复对农田土壤重金属含量的影响	328

第三节	不同植物修复方式对农田土壤重金属含量的影响	330
第四节	连续植物修复对污染土壤颗粒中重金属变化的影响	336
第五节	连续植物修复后污染土壤的重金属解吸特征变化	343
第六节	连续植物修复下污染农田重金属有效性及修复效率的影响	349
参考文献		355
第十八章	连续植物修复后重金属复合污染土壤的生物学特性变化	358
第一节	连续超积累植物修复对农田土壤生物学指标的影响	358
第二节	连续三年田间植物原位修复对土壤生物学指标的影响	362
第三节	不同植物修复方式对土壤微生物指标的影响	364
参考文献		369
第十九章	连续植物修复对重金属复合污染农田土壤酶活性的影响	370
第一节	连续超积累植物修复对土壤酶活性的影响	370
第二节	连续三年植物原位修复对重金属复合污染土壤酶活性的影响	373
第三节	不同植物修复方式对重金属复合污染土壤酶活性的影响	375
参考文献		382

第一篇 镉锌污染土壤的植物修复 机制与技术发展

镉是自然界中存在的一种重金属微量元素，其对动物和植物都是非必需元素。镉具有与锌类似的环境地球化学特性，常与锌矿伴生。因此，矿山开采、冶炼废水排放及农田污泥的施用会导致农田土壤的镉锌污染问题，进而威胁到农业安全生产和人体健康。镉锌进入土壤后，由于移动性小而很难清除。常用的工程措施或化学方法治理土壤重金属污染，不仅成本昂贵，而且还会破坏土壤结构以及微生物区系，并且可能造成“二次污染”。植物吸取修复技术作为一种新兴的绿色生物技术，能在不破坏土壤生态环境，保持土壤结构和微生物活性的状况下，通过植物的根系直接将污染元素吸收从土壤中带走，从而修复被污染的土壤，已成为农田重金属污染土壤修复的优选技术之一。本篇针对我国面广量大的农田土壤镉锌污染问题，在综述了镉锌超积累植物吸取修复技术研究进展的基础上，重点介绍了利用遏蓝菜、印度芥菜以及伴矿景天等超积累植物对镉锌污染土壤进行吸取修复的原理与技术以及调控措施，并对吸取修复后的植物安全处置技术进行了探讨，以期为我国镉锌污染土壤的植物修复理论与技术研发提供借鉴。

第一章 镉锌污染土壤的超积累植物吸取修复研究进展

超积累植物吸取修复技术,因其具有修复成本低、环境友好、不破坏土壤等优点,适合于大面积重金属污染农田土壤的修复。全球发现的重金属超富集植物有近 500 种,广泛分布于植物界的约 45 个科。其中锌超积累植物约有 18 种。有关超积累植物吸取修复的技术原理与强化措施以及田间应用成为关注的热点。本章主要从镉锌超积累植物的筛选与鉴定、超积累植物对镉和锌的耐性与富集机制以及超积累植物对镉锌的吸取修复效果与田间应用示范等方面进行了系统综述,以期对镉锌污染农田土壤的超积累植物吸取修复技术发展与应用提供指导。

第一节 镉锌超积累植物资源调查

一、超积累植物的定义与特征

重金属污染土壤的修复主要有两种策略,一是去除土壤中重金属,二是固定土壤中重金属,降低其环境中风险。根据修复方法不同,重金属污染土壤的修复技术可分为,物理修复、化学修复和生物修复。物理化学修复包括,客土、换土、深耕翻土、土壤淋洗法、热解吸法、玻璃化法、电动修复、固化和稳定化等。但上述传统的重金属污染土壤的修复方法因其修复成本高,对土壤扰动破坏性大,并不适用于我国大面积农田重金属污染土壤的修复。发展能广泛应用、安全、低成本的原位农田生物修复技术是我国农田土壤污染修复的主要方向之一(骆永明, 2009)。超积累植物吸取修复技术,是一种具有应用潜力的生物修复技术。该技术利用对重金属具有强富集能力的超积累植物(hyperaccumulator),吸取土壤中重金属并富集在地上部,通过收割地上部而去除土壤中重金属。超积累植物修复技术具有修复成本低、原位、绿色无污染、不破坏土壤结构等优点,具有广泛应用的潜力(Li et al., 2012; McGrath et al., 2006)。

超积累植物是指能够超量积累重金属的植物。Brooks 等于 1977 年首次提出了超积累植物概念,用来定义含 Ni 浓度(干重)大于 1000 mg/kg 的植物。超积累植物地上部或叶片中重金属富集可超过普通植物的 100 倍以上,且不影响植物生长活动,如 Cr、Ni、Cu、Pb 的浓度应在 1000 mg/kg 以上,而 Mn 和 Zn 浓度应大于 10 000 mg/kg (Baker et al., 1983)。一般而言,重金属超积累植物应满足以下条件(Baker and Brooks, 1989):①植物地上部或叶片中重金属浓度要达到一定临界标准;②植物对重金属的转运系数 TF 和富集系数 BCF 均大于 1, TF 和 BCF 分别为植物地上部重金属浓度与根和土壤中重金属浓度的比值;③植物在吸收富集重金属后,生长良好,没有发生重金属毒害现象。Van der Ent 等(2013)认为,在自然条件下生长的植物满足上述特点方可认为是超积累植物,而非仅在人为的外加重金属的盆栽或水培试验条件下。目前已发现 400 多种超积累植物,因此利用超积

累植物治理土壤重金属污染的现实可能性不断增加。

二、镉锌超积累植物的筛选与鉴定

超积累植物的筛选与鉴定是植物修复技术应用的关键一步。根据野外采集的样品分析，全球发现的重金属超富集植物有近 500 种（Verburggen et al., 2009）。在已发现的超积累植物中，Ni 超积累植物最多约占总超积累植物的 50%以上，还有一些 Zn、Cu、Cd、Mn、As 等超积累植物。其中研究最多的植物主要为遏蓝菜属（*Thlaspi*）、庭荠属（*Alyssums*）和芸薹属（*Brassica*）。超积累植物在热带和温带的含重金属土壤上均有发现，诸如，南非、拉丁美洲、北美、欧洲等（Baker et al., 1989）。表 1.1 为已发现的几种主要重金属超积累植物积累低限值和数目及种属（Sheoran et al., 2011）。自 20 世纪 90 年代中后期以来，尤其 2000 年以后，我国境内发现了一系列重金属积累或超积累植物，主要代表性植物有 Cu 积累植物海州香薷（*Elsholtzia splendens*）（Yang et al., 2002）、鸭跖草（*Commelina communis*）（廖斌等，2003），As 超积累植物蜈蚣草（*Pteris vittata*）（陈同斌等，2002）、大叶井口边草（*Pteris aetica*）（韦朝阳等，2002），Cd 和 Zn 积累或超积累植物东南景天（*Sedum alfredii*）（Yang et al., 2004；杨肖娥等，2002）、龙葵（*Solanumnigrum*）、伴矿景天（*Sedum plumbizincicola*）（Wu et al., 2008）、圆锥南芥（*Arabis paniculata*）（汤叶涛等，2005）、长柔毛委陵菜（*Potentilla griffithii*）（胡鹏杰等，2007），Mn 超积累植物商陆（*Phytolacca acinosa*）（薛生国等，2004）、Cr 超积累植物李氏禾（*Leersia hexandra*）（张学洪等，2006）等。

表 1.1 普通植物中重金属浓度和超积累植物最低限值及已知超积累植物种属和个数

元素	非超积累植物浓度 /（mg/kg）	超积累植物低限值 /（mg/kg）	已报道超积累 植物数目	已知超积累植物种属
锌	5~2000	10 000	16	Brassicaceae
锰	5~2000	10 000	11	Apocynaceae, Cunoniaceae, Proteaceae
镍	0.2~100	1000	290	Brassicaceae, Cunoniaceae, Flacortiaceae, Violaceae
铜	1~100	1000	24	Cyperaceae, Lamiaceae, Poaceae, Scrophulariaceae
钴	0.05~50	1000	26	Lamiaceae, Scrophulariaceae
铊	0~0.1	1000	1	Brassicaceae
镉	0.03~20	100	1	Brassicaceae
硒	0.01~10	100	19	Fabaceae

第二节 超积累植物对镉锌的耐性与富集机制

在过去几十年里，重金属超积累和解毒的生理机制已经被国内外学者广泛关注和研究。超积累植物吸收富集重金属涉及 3 个过程：首先，超积累植物根系对重金属吸收；其次，重金属在植物体内转移和运输；最后，重金属在植物地上部存储和解毒。

一、根系吸收重金属的吸收过程

超积累植物可以活化土壤中不溶态的重金属。根袋 (rhizobag) 试验表明, 土壤中可移动态 Zn 含量的下降占超积累植物 *T. caerulescens* 吸收 Zn 总量中的不到 10%, 说明 *T. caerulescens* 可以将土壤中的 Zn 从不溶态转化为可移动态, 植物的根系可以分泌质子, 从而促进了植物对土壤中元素的活化和吸收。种植 *T. caerulescens* 和非超积累植物 *T. ochroleucum* 后, 根际土壤中可移动态 Zn 含量均较非根际土壤高, 这可能与根际土壤中 pH 较低有关, 在试验结束时, 根际土壤 pH 较非根际土壤低 0.2~0.4, 但两种植物对根际土壤的酸化程度没有显著差异 (McGrath et al., 1997)。Bernal 等 (1994) 对 Ni 超积累植物 *A. murale* 和萝卜的对比研究表明, 两者根际土壤 pH 的变化方式相似, 主要与阴阳离子的吸收有关, 而与重金属的含量无关; N 肥形态是影响根际土壤 pH 的重要因子, 而根际土壤氧化还原电位受 N 肥种类和重金属含量的双重影响; 根际土壤 pH 的降低和根系释放还原物质不是 *A. murale* 积累重金属的主要机制, 因为 *A. murale* 根系在这两个方面的能力均低于萝卜根系。

Lasat 等 (1996) 发现 *T. caerulescens* 与非超积累植物 *T. arvense* 根系对 Zn^{2+} 的吸收具有相似的米氏常数 (K_M), 但两者的最大吸收速率 ($V_{\max}$) 分别为 0.27 和 0.06 $\mu\text{mol}/(\text{g} \cdot \text{h})$, 前者是后者的 4.5 倍, 说明 *T. caerulescens* 在根细胞膜中具有更多的运输位点, 根系从土壤溶液中吸收 Zn 的能力更强。两种植物对 Zn 的吸收动力学分为两个阶段, 开始是快速的线性动力学阶段, 与根细胞壁吸附 Zn 有关; 随后是较缓慢的饱和吸附阶段, 与 Zn 穿过根细胞原生质膜有关。

Piñeros 等 (1998) 利用 Cd 选择性微电极研究了 Cd 在 *T. caerulescens* 和 *T. arvense* (生长 2~3 周) 根中的迁移, 结果发现两者根中 Cd 的流动方式和流量大小没有明显差异, 他们认为两者对 Cd 吸收量的差异需要较长时间才能表现出来。一些学者曾提出超积累植物从根系分泌特殊有机物, 从而促进了土壤重金属的溶解和根系的吸收, 或者超积累植物的根毛直接从土壤颗粒上交换吸附重金属, 但目前还没有研究证实这些假说。

二、重金属从根系到地上部的转运过程

与非超积累植物相比, *T. caerulescens* 吸收 Zn 并将其从根部转移到地上部的能力明显较高 (Brown et al., 1995), 在中度污染的土壤中, *T. caerulescens* 积累的 Zn 数量是 *T. ochroleucum* 的 2.5~5.5 倍, 是萝卜的 24~60 倍, *T. ochroleucum* 的根中积累的 Zn 仅有 32% 转移到地上部 (Brown et al., 1995)。

T. caerulescens 的木质部汁液中 Zn 的浓度大约是 *T. ochroleucum* 的 5 倍 (Lasat et al., 1998), 说明前者在根中积累的能力比转移到地上部的能力更强。利用 ^{65}Zn 的通量试验发现, *T. caerulescens* 与 *T. arvense* 两者根的细胞壁和细胞质中储藏的 $^{65}\text{Zn}^{2+}$ 的比例相似, 其流出速率 (半衰期, $t_{1/2}$) 也相近; 但 *T. arvense* 在根液泡中储藏的 $^{65}\text{Zn}^{2+}$ 的比例 (12%) 是 *T. caerulescens* (5%) 的 2.4 倍, 其流出速率 ($t_{1/2}$ 为 260 分钟) 却比后者 ($t_{1/2}$ 为 150 分钟) 慢了近 1 倍。在低 Zn 浓度 (10 $\mu\text{mol}/\text{L}$) 时, 两者叶片的原生质中积累的 Zn 数量相同, 而高 Zn 浓度 (1 mmol/L) 时, 前者积累的数量有增加趋势 (Lasat et al.,