

土壤-蔬菜系统对氮镉互作效应的 响应及其调控模式研究

李素霞 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

土壤-蔬菜系统对氮镉互作效应的 响应及其调控模式研究

李素霞 著



WUHAN UNIVERSITY PRESS

武汉大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

土壤-蔬菜系统对氮镉互作效应的响应及其调控模式研究/李素霞著. —武汉: 武汉大学出版社, 2017. 10

ISBN 978-7-307-19425-0

I. 土… II. 李… III. ①蔬菜园艺—氮—土壤污染—污染控制—研究 ②蔬菜园艺—镉—土壤污染—污染控制—研究 IV. X53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 143270 号

责任编辑:白绍华

责任校对:汪欣怡

版式设计:韩闻锦

出版发行: 武汉大学出版社 (430072 武昌 珞珈山)

(电子邮件: cbs22@whu.edu.cn 网址: www.wdp.com.cn)

印刷:虎彩印艺股份有限公司

开本: 720 × 1000 1/16 印张: 18.25 字数: 262 千字 插页: 1

版次: 2017 年 10 月第 1 版 2017 年 10 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-307-19425-0 定价: 79.00 元

版权所有, 不得翻印; 凡购我社的图书, 如有质量问题, 请与当地图书销售部门联系调换。

前 言

城郊菜地土壤污染已经越来越突出,尤以重金属污染及土壤富营养化更为突出,其中重金属主要有镉、砷、汞、铅、铬、锌、铜等,土壤富营养化元素决定于菜农的施肥习惯,主要为氮,其次为磷和钾。通过实地调查及查阅文献,土壤—蔬菜系统对于重金属的“头号”污染物为镉,土壤富营养化表现最突出的营养元素为氮。

通过实地城市农贸市场调查以及城郊蔬菜调查显示,蔬菜重金属超标日趋严重,蔬菜硝酸盐以及亚硝酸盐含量超标率也不容忽视,究其原因主要是城市的日趋发展引发的“三废”排放以及化学肥料的不合理应用所致。

关于重金属镉与硝酸盐的复合污染主要方案在于首先揭示镉与硝酸盐复合污染的特征,明确氮营养管理对缓解蔬菜镉和硝酸盐污染的作用,其次是及时调整施肥方案,再次是要调控城郊菜地镉的污染。如果说菜地土壤关于硝酸盐污染的解决方案相对简单的话,重金属镉的污染就比较复杂和困难。关于重金属镉的污染一般有物理方法(例如客土法)、化学方法(例如交换法、沉淀法、改变酸碱度法等)、生物法(例如微生物法、植物修复法等)等,这些方法均能对土壤重金属镉的污染有一定的修复效果,但是,与菜地硝酸盐复合污染的修复将不一定达到相同的效果。关于镉与硝酸盐的复合污染,目前还没有更好的方法,本书结合镉污染修复方法以及硝酸盐富营养化修复方法制定一系列的修复方案,本书的研究方法将对城郊菜地镉与硝酸盐的复合污染有一定的修复效果,为城郊区农产品安全、高效生产提供理论和技术支持。

本书内容框架由李素霞副教授拟定完成,研究思路在华中农业大学胡承孝教授指导下形成系统。在这里还特别感谢华中农业大学

谭启玲副教授、孙学成副教授、西北农林科技大学刘金山博士、武汉生物工程学院谢朝阳高级实验师、广西益全检测评价有限公司韦司棋工程师，同时还有李刚、胡正立、晏文峰、杨苗、李梦维、周金慧、万珂、郭海亮、龚丽、杨钢、刘海胜、吴曼、张建英、舒稳、杜宇、刘晓宇、杨程程、吴青、陈晓薇、石根科、季斌、熊亭、毛俊辉、孙晓永、岳东、高超、马岚岚、杜茜、陈凤、陈潇依、姜兵、丁冠甲、张森、董莹、陈星艳、艾莉、龙雄杰、桑子慧等同学的支持与帮助，在此不一一列举，深表谢意。

在本书出版之际，感谢国家“十一五”科技支撑计划课题(2008BADA03)资助和武汉市教育局科研项目(2007K019)(2008K081)资助。特别感谢钦州学院资源与环境学院黄远林院长的特别支持与关注，中国科学院南京土壤研究所吴龙华研究员的关心与鼓励，覃雪梅老师、莫小荣老师的关心与帮助！

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请各位同仁批评、指正！

李素霞

2017年3月于钦州

目 录

第一章 土壤—蔬菜系统对氮镉互作效应的响应研究.....	1
第一节 土壤—蔬菜系统氮镉互作效应现状.....	1
一、土壤镉来源及土壤—蔬菜系统镉污染现状.....	1
二、土壤硝酸盐来源及其土壤—蔬菜系统硝酸盐污染 现状.....	3
三、土壤—蔬菜系统硝酸盐与镉复合污染的效应.....	5
第二节 城郊(武汉)土壤—蔬菜系统重金属的调查分析与 评价	12
一、2001年武汉城郊蔬菜土壤重金属调查结果与评价	12
二、2010年城郊(武汉)蔬菜—土壤重金属镉(Cd) 调查结果与评价	27
三、2010年城郊(武汉)蔬菜—土壤硝酸盐(NO_3^-) 调查结果与评价	36
四、2011年城郊(武汉)特殊污染源(电厂)周边 蔬菜—土壤重金属调查结果	45
五、2011年城郊(武汉)特殊污染源(垃圾填埋场) 周边蔬菜—土壤重金属调查	57
六、2013年城郊(武汉)特殊污染源(垃圾填埋场) 周边蔬菜重金属调查	68
七、2011年城郊(武汉)特殊污染源(药厂)周边 蔬菜—土壤重金属调查	77
八、2012年城郊(武汉)村镇农田土壤重金属调查.....	79
第三节 农田土壤—蔬菜重金属污染的研究现状	84
一、农田土壤重金属污染的研究现状	84

二、农田蔬菜重金属污染的研究现状	92
第四节 菜地土壤镉重度污染水平对小白菜、苋菜生长 和品质的影响	105
一、原位定点试验	105
二、盆栽条件下镉重度污染水平与氮交互作用对 小白菜、苋菜生长及品质的影响	105
第五节 土壤—蔬菜系统氮镉交互作用研究	116
一、盆栽条件下氮镉交互作用对苋菜、小白菜生长 及其营养品质的影响	116
二、氮镉交互作用对苋菜、小白菜体内累积镉与 硝酸盐的影响	125
三、盆栽条件下氮镉交互作用对苋菜、小白菜 土壤酶活性的影响	136
第六节 土壤—蔬菜系统中镉污染条件下不同品种的 氮肥效应研究	140
一、镉污染条件下不同品种氮肥对苋菜、小白菜 品质的影响	141
二、镉污染条件下不同品种氮肥对苋菜、小白菜 生长量的影响	143
三、镉污染条件下不同品种氮肥对苋菜、小白菜 吸收镉与硝酸盐的影响	144
四、镉污染条件下不同品种氮肥对苋菜土壤酶 活性的影响	146
第七节 讨论与总结	150
一、讨论	150
二、总结	150
三、不足之处	152
第二章 土壤—蔬菜系统氮镉交互作用下调控模式研究	153
第一节 土壤—蔬菜系统氮镉交互作用下调控模式研究 现状	153

一、菜地—土壤系统氮镉交互作用下改良现状·····	153
二、不同改良剂对氮镉互作下土壤酶活性的研究 进展·····	160
第二节 不同改良剂对土壤—蔬菜系统氮镉交互作用 调控模式研究·····	168
一、不同改良剂处理在镉与硝酸盐复合污染下 对辣椒品质的影响·····	171
二、不同改良剂在镉与硝酸盐复合污染下对 番茄品质的影响·····	174
三、不同改良剂在镉与硝酸盐复合污染下对 小白菜品质的影响·····	177
四、不同改良剂在镉与硝酸盐复合污染下对 苋菜品质的影响·····	183
五、氮镉互作下石灰对不同蔬菜品质的影响·····	184
六、氮镉互作下有机肥对不同蔬菜品质的影响·····	187
七、氮镉互作下双氰胺对不同蔬菜品质的影响·····	191
八、不同改良剂对镉与硝酸盐复合污染下土壤酶 活性的影响·····	195
第三节 不同处理改良剂对土壤—蔬菜系统氮镉交互作用 调控模式研究·····	201
一、不同处理双氰胺对镉与硝酸盐复合污染下 苋菜—土壤系统的影响·····	202
二、不同处理双氰胺对镉与硝酸盐复合污染下 小白菜—土壤系统的影响·····	204
三、不同处理的石灰对镉与硝酸盐复合污染下 小白菜—土壤系统的改良效果·····	223
四、不同处理的石灰对镉与硝酸盐复合污染下 苋菜—土壤系统的影响·····	231
五、不同浓度的有机肥对镉与硝酸盐复合污染下 小白菜—土壤系统的改良效果·····	236

第三章 植物修复对镉与硝酸盐复合污染下土壤—蔬菜系统的影响.....	258
第一节 植物修复的概念与种类.....	258
一、植物修复的概念及中国已报道镉超积累植物的种类.....	258
二、植物修复土壤氮镉互作污染的生态研究现状.....	259
第二节 苋菜对镉与硝酸盐复合污染下土壤—小白菜系统的试验研究.....	265
一、试验苋菜的筛选.....	266
二、不同土壤镉与硝酸盐复合污染下苋菜—小白菜混作对小白菜产量和品质的影响.....	268
三、不同土壤镉与硝酸盐复合污染下苋菜—小白菜混作对小白菜镉与硝酸盐含量的影响.....	269
四、讨论与结论.....	270
五、植物修复对氮镉互作下小白菜土壤酶活性的影响.....	271
第四章 结论.....	276
结语.....	283

第一章 土壤—蔬菜系统对氮镉 互作效应的响应研究

第一节 土壤—蔬菜系统氮镉互作效应现状

一、土壤镉来源及土壤—蔬菜系统镉污染现状

菜地土壤污染是我国菜地土壤生态环境最主要的问题之一，其中尤以土壤重金属污染更为突出。环境保护部、国土资源部于2014年4月17日公布的“全国土壤污染状况调查公报”显示，全国土壤重金属的超标率19.4%，土壤镉超标率7.0%，其中镉的重点污染点位比例为0.5%，由此可见，镉在全国土壤中的污染程度。

(一) 土壤镉的来源

镉是毒性很大的重金属元素之一，属于积蓄毒性元素，引起慢性中毒的潜伏期可达10~30年之久(赵美萍和邵敏, 2005; 廖自基, 1992)。土壤中镉的来源可分为自然和人为活动两种，前者来源于岩石和土壤，同时也有以气溶胶形态存在于大气中的镉，经扩散、沉降降落在土壤表面以及矿藏开采和冶炼过程中，镉主要通过冲刷溶解作用和挥发作用释放到水体和大气中，进而污染土壤。后者来源于工业“三废”和含镉肥料的施用。

随着工业迅猛发展，大量重金属污染了农田，尤其在污染源周围的农田菜地的重金属的污染程度最大，一般在冶炼厂附近，土壤镉浓度水平较高。如日本某冶炼厂周围镉浓度高达40mg/kg。

(二) 土壤—蔬菜系统镉污染现状

2007年春季我们曾对浙江某地4个代表性工厂(眼镜制造工厂)的附近菜园地采集土壤，分析其中重金属含量，结果发现镉的

含量为 5.85 ~ 17.89mg/kg, 严重超出土壤环境质量标准 (GB 15618—1995) 的二级标准。在武汉城郊的某垃圾卫生填埋场附近的菜地, 重金属镉的含量为 0.356 ~ 0.546mg/kg, 某电厂附近的菜地重金属东、南、西方向镉的含量为 0.911 ~ 3.428mg/kg、0.495 ~ 1.358mg/kg、0.372 ~ 1.305mg/kg, 当地土壤镉的背景值为 0.172mg/kg, 依据当地的酸碱度, 当地环境质量二级标准为 0.3mg/kg, 均超出了国家标准; 我国上海市郊的松江炼锌厂地区镉污染水平已超过当地土壤背景值的 100 倍左右。沈阳某区土壤镉污染水平平均达到 7mg/kg, 工厂附近镉污染在地表 6 ~ 20cm 根层左右, 浓度可达 40 ~ 50mg/kg。据报道 (陈怀满, 1996; 安志装等, 1996), 我国受镉污染的耕地面积约 1.4 万 hm^2 , 已有 11 处污灌区达到生产镉米的程度。福建省耕地重金属污染综合指数为 0.67, 属警戒污染水平, 单项污染指数以镉最高 (达 0.89) (苏年华和张金彪, 1994), 这说明我国受镉污染的高污染区的现状已经突现。

由于大量施用含镉的肥料以及使用被工业“三废”污染的水灌溉, 我国土壤普遍存在镉污染问题, 污染面积约为 1330 km^2 , 土壤中的镉含量在 1 ~ 5mg/kg, 有的甚至超过 10mg/kg (崔力拓等, 2006)。李素霞等 (2007) 对武汉市 6 个大的蔬菜基地进行调查、采样、分析发现: 蔬菜及土壤中重金属含量超标, 普遍存在污染的是镉, 总超标率为 50%, 最高超标倍数为 2.86 倍。彭玉魁等 (2002) 对陕西省大中城市郊区菜园 14 类 152 份蔬菜样品进行分析, 结果表明, 镉是该地区的主要污染元素之一, 其超标含量达 29.4%。沈彤等 (2005) 对长沙市各蔬菜基地生长的 13 种蔬菜进行调查分析, 发现蔬菜镉超标率达 96.3%, 最高值为 0.27mg/kg, 是限量指标的 5.4 倍。张超兰等 (2001) 对南宁市郊 12 个主要菜区土壤和蔬菜中 Cu、Zn、Cd、Pb 含量调查分析, 土壤中 Cd、Pb 超出国家规定的卫生标准; 在 12 个采样点中有 11 个采样点蔬菜中镉含量超标, 最高达 91%, 超出标准 6.2 倍。秦波、白厚义等 (2006) 研究发现, 蔬菜土壤镉超标达 38.6%, 成为重金属中污染最突出的重金属元素, 这说明在北部湾经济区土壤—蔬菜系统中镉污染已经具有普遍性。李国倜等 (1986) 较早报道武汉市易家围蔬菜存在镉污

染；夏增禄(1994)报道：在珠江三角洲土壤重金属污染中，以汞、镉污染面积最大。同时，大量资料表明：长沙市、陕西省大中城市、重庆市、周口市、南京市、西安市、广州市、哈尔滨市、南宁市等城市郊区的菜地土壤—蔬菜系统均不同程度受镉污染的影响(沈彤，盛穗等，2005；彭玉魁，赵福劳等，2002；李其林，刘定德等 2004；张国胜和李宏，2011；周文麟，李仁英等，2009；汤波，2011；魏秀国，何江华等，2002；罗娇赢，张思冲等，2009；张超兰，白厚义，2001；秦波、白厚义等，2006)。这说明国内各城市郊区菜地土壤—作物系统镉污染具有普遍性，而且比较突出，需要采取必要措施进行控制。

(三)重金属镉的生物效应

重金属镉通过与巯基蛋白结合或取代其中的 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 等使许多酶活性受到抑制或失活而在生物体内长期蓄积。镉影响光合呼吸作用，干扰碳氮代谢，损伤细胞膜系统，影响植株水分状况和养分吸收。镉还可干扰 Cu、Co 等必需微量元素在体内的正常生理功能和代谢过程而产生相应的毒害效应。为此，镉对作物根系的生长、对种子萌发、对微生物数量、对土壤酶活性、对作物的毒害、对作物的产量和品质等均有显著的负影响，最终通过食物链威胁人的身体健康。

二、土壤硝酸盐来源及其土壤—蔬菜系统硝酸盐污染现状

(一)土壤硝酸盐的来源

氮素是作物的主要营养元素，它与作物的产量和品质关系极大。我国绝大部分土壤都缺氮，施用氮肥一直是我国农业增产的关键技术(吴平宵等，2000)，尤其对蔬菜的增产效果明显，在蔬菜生产中更受重视。我国目前已经成为世界上氮肥施用量最多的国家，年施用量占全世界总量的 30%(巨晓棠等，2002)。施入农田中的氮肥利用率仅为 30%~35%(肖顺勇等，2006)；氮肥一般以铵态氮、硝态氮和酰胺态氮的形式进入土壤，受植物吸收、挥发、硝化和反硝化的影响。铵态氮和酰胺态氮一般首先转化为硝态氮才能被作物吸收(朱兆良，1992)。因此，过量施用氮肥是导致蔬菜硝

酸盐超标的主要原因。

(二) 土壤—蔬菜系统硝酸盐污染现状

周艺敏等(1989)对菠菜、小白菜等6种蔬菜进行氮肥试验,发现氮素化肥的施用量与蔬菜体内硝酸盐含量呈显著或极显著正相关;王朝辉等(1998)研究表明,小白菜在施氮量为0.20g/kg、0.40g/kg、0.6g/kg时,硝态氮含量比不施氮肥时分别增加32.8、204.7、366.8倍。杨涛等(2006)研究发现化学氮肥用量与苋菜硝酸盐含量密切相关,在纯氮施用量不超过450kg/hm²的条件下,苋菜硝酸盐的含量与氮肥用量呈显著正相关。增加氮肥用量可引起苋菜硝酸盐积累增加。

唐其展等人对南宁市蔬菜进行调查发现94.4%的蔬菜硝酸盐含量超标,受到不同程度的污染,其中受到污染的蔬菜种类有叶菜类、根菜类、葱蒜类。以叶菜类污染最重(除韭菜),其次是根菜类和葱蒜类,污染指数在1.04~6.60,多数在2.0以上(唐其展,孔德工等,2003)。佛山市南海区露天菜地136个表层土壤样本硝态氮质量分数在1.070~854.4mg/kg,平均值为194.3mg/kg,有19.9%的土壤样本硝态氮质量分数超过300mg/kg,达到极高水平,高强度连作露天菜地土壤的硝态氮质量分数已经接近多年塑料大棚水平(柳勇等,2006)。珠江三角洲地区珠海、中山、江门等地露地种植的奶白菜、菠菜、菜心、西洋菜、芥蓝、茼蒿和玻璃生菜等7种叶菜类蔬菜硝酸盐含量都在1200mg/kg以上,超过叶菜类蔬菜硝酸盐安全限量标准(谢河山等,2000)。中山市大型蔬菜生产基地中9种蔬菜30个样品中硝酸盐含量由高到低依次为菜心>白菜>芥菜>空心菜>生菜>瓜果类,菜心、芥菜和白菜为严重污染,生菜与空心菜为重污染,瓜果类蔬菜为轻污染(黄勇等,2005)。保定市81件应季新鲜蔬菜中硝酸盐含量为5.3~5013mg/kg,严重污染及高度污染程度的各占25%;中度污染程度的占5%;轻度污染程度的占45%(梁淑轩,张美月等,2008)。汪李平等(2000)报道:发现夏季蔬菜硝酸盐污染十分严重,在采集的57种蔬菜中,严重污染的有14种(硝酸盐含量在1440~3100mg/kg),禁止上市的有11种(硝酸盐含量超过3100mg/kg),另外还有轻度污染、二级污

染、三级污染的等；汪李平等(2003)报道：发现冬季蔬菜硝酸盐污染十分严重，在采集的 57 种蔬菜中，其中有 26 种蔬菜属于轻度污染，8 种蔬菜属于中度污染，14 种蔬菜属于严重污染；聊城市蔬菜硝酸盐和亚硝酸盐以及新乡市蔬菜硝酸盐和烟硝酸盐均有不同程度的污染(赵桂平，张明等，2010；高晗，李斌等，2010；高健，孙金华等，2012)，因此，蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐污染已经成为各地区的普遍现象。

三、土壤—蔬菜系统硝酸盐与镉复合污染的效应

(一)氮肥对土壤中重金属形态及植物吸收重金属的影响

郑小林通过盆栽试验研究了镉污染土壤条件下氮磷钾肥处理对香根草修复土壤镉和锌污染效率的影响，结果表明，3 种氮处理能促进香根草地上部生长，而且显著提高地上部特别是叶的镉和锌含量，导致其修复效率成倍增加。建议，为改善香根草对较贫瘠土壤中镉污染的修复效率，应对香根草施氮肥，并控制或不施磷钾肥。

张敬锁等用两种不同形态氮素即 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 营养液培养水稻，研究表明， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 促进水稻对 Cd 的吸收，并增加了水稻根中和地上部的水提取态和氯化钠提取态 Cd 的含量；而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 处理却增加了醋酸提取态 Cd 含量。但水稻根中 Cd 都是以氯化钠提取态 Cd 的形态占优势而存在。盐酸提取态和残留态的 Cd 处理差异不明显。曾清如等用五种氮肥研究表明不同氮肥对土壤中重金属的溶出有不同影响，且与氮肥的浓度有关。其中 NH_4Cl 和 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 对 Cd 的溶出均有较大的促进作用。不同铵盐对植物吸收重金属有不同的影响，且与土壤重金属的溶出并不一定呈正相关。另有研究表明，氮肥能促进莴苣对 Cd 的吸收，但对 Cd 在莴苣体内的分布影响不显著。

施用硫酸铵、硝酸铵和尿素能增加土壤中水溶性和交换态的 Cd 的含量，其中以硫酸铵对菠菜叶中 Cd 含量的提高作用最大，Singh 等研究了莴苣 Cd 吸收与施 N 量的关系，施 N 量少于 100mg/kg 时(N 为 NH_4NO_3)，N 增加莴苣对 Cd 的吸收，而施 N 量大于

2000)。营养液中镉处理1周的番茄幼苗硝酸盐含量下降,硝酸还原酶、亚硝酸还原酶以及谷氨酸合成酶、铁氧化—谷酰胺合成酶活性受到抑制,但同时NADH-谷酰胺合成酶、NADH-谷酰胺脱氢酶活性升高(Chaffei et al., 2004)。营养液中 CdCl_2 诱导水稻叶片积累铵可归因于谷氨酸合成酶(GS)活性下降(Chien and Kao, 2000)。这些结果说明,镉污染能够影响植物对硝酸盐的吸收和转化,表现体内硝酸盐含量下降而铵态氮积累增加,这与镉抑制硝酸还原酶、谷氨酸合成酶活性有关。但以上结果大多来源于营养液培养下的植物,缺乏与土壤过程的联系,尤其是针对土壤—作物系统氮镉互作情况下硝酸盐离子在土壤过程中的迁移和转化必然影响其向地下水和植物体内的运移,而这方面的研究相当缺乏。

第二,氮对土壤—作物系统镉污染的效应。在施氮量相同的条件下,施用硫酸铵的处理印度芥菜和高积累镉油菜吸镉量高于施用硝酸铵和硝酸钙的处理(王激清等, 2004);两种不同形态氮素即 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 营养液培养中, NH_4^+-N 促进水稻对镉的吸收,并增加了水稻根中和地上部的水提取态和氯化钠提取态镉的含量;而 NO_3^--N 处理却增加了醋酸提取态镉含量(张敬锁等, 1998)。田间条件下硝酸铵增加了黑麦籽粒中镉含量(Gray et al., 2002)。Zaccheo等(2006)认为,铵态氮营养加上消化抑制剂是促进向日葵提取土壤镉的有效策略。杨锚等研究发现施用铵态氮肥则显著提高了两种形态镉的含量,且氯化铵的作用大于硫酸铵;施用硝酸铵显著提高了水溶态镉含量,但对有效态镉影响较小(杨锚等, 2006)。因此,已有研究说明,不同形态氮或氮肥能够影响土壤中镉的存在形态及其有效性,进而影响植物中镉的含量和存在形态,但有关土壤—作物系统硝酸盐与镉复合污染对镉在系统中的行为尤其是向产品器官研究缺乏。

小结:大量资料说明土壤—蔬菜系统镉污染具有普遍性,而且比较突出。蔬菜中硝酸盐和亚硝酸盐污染已经成为各地区的普遍现象。镉对土壤—蔬菜系统硝酸盐污染的效应以及氮对土壤—蔬菜系统镉污染的效应明显。

参考文献:

- [1] 郑小林, 朱照宇, 黄伟雄. N、P、K 肥对香根草修复土壤镉、锌污染效率的影响[J]. 西北植物学报, 2007, 27(3): 0560-0564.
- [2] 张敬锁, 李花粉, 张福锁, 姚广伟. 不同形态氮素对水稻体内镉形态的影响[J]. 中国农业大学学报, 1998, 3(5): 90-94.
- [3] Florijin P J, Nelemans, van Beusichen M L. The influence of the forms of nitrogen nutrition on uptake and distribution of cadmium in lettuce varieties[J]. Plant Nutr, 1992, 115(11): 2405-2416.
- [4] Willaert G, Verloo M: Effect of various nitrogen fertilizers on the chemical and biological activity of major and trace elements in a cadmium contaminated soil[J]. Pedologie: 1992, 42(1): 83-91.
- [5] Williams C H. David DJ. Zinc, Cd and Mn uptake by soybean from two Zn- and Cd-amended coastal plain soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 1976, 121: 86-93.
- [6] Fabian G, Dezsai D M. Ecophysiological studies of the relationship between heavy metal toxicity and nitrogen nutrition in the early development stage of winter wheat [J]. Acta Botanica Hungarica, 1987, 33(3-4): 219-234.
- [7] Jan E, Eriksson A. field study on factors influencing Cd levels in soils and in grain of oats and winter wheat[J]. Water, Air & Soil Pollution, 1990, 53(1-2): 69-81.
- [8] 金春姬, 李鸿江, 贾永刚, 等. 电动力学法修复土壤环境重金属污染的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2004, 26(5): 341-344.
- [9] 刘奉觉, Edwards WRN, 郑世楷, 等. 杨树树干液流时空动态研究[J]. 林业科学研究, 1993(4): 368-372.
- [10] 李艳梅. 土壤镉污染下小白菜对氮肥的生物学反应[D]. 西北农林科技大学, 2008.
- [11] 张超兰, 白厚义. 南宁市郊部分菜区土壤和蔬菜重金属污染评价[J]. 广西农业生物科学, 2001, 20(3): 186-189, 205.

- [12]李静,谢正苗,徐建明,等.杭州市郊蔬菜地土壤重金属环境质量评价[J].生态环境,2003,12(3):277-280.
- [13]秦波,白厚义,陈秀娟,等.南宁市郊菜园土壤重金属污染评价[J].农业环境科学学报,2006,25(增刊):45-47.
- [14]李国侗,崔慧纯,郭继孝,等.武汉市易家墩蔬菜镉污染初步研究[J].环境科学,1986,7(3):21-24,5.
- [15]夏增禄.中国主要类型土壤若干重金属临界含量和环境容量区域分异的影响[J].土壤学报,1994,31:161-169.
- [16]李素霞,胡承孝.武汉市蔬菜重金属污染现状的调查与评价[J].武汉生物工程学院学报,2007,3(4):211-215.
- [17]沈彤,盛穗,马赛平.长沙市蔬菜中Pb、Cd含量状况及控制对策[J].湖南农业科学,2005(4):62-63.
- [18]彭玉魁,赵锁老,王波.陕西省大中城市郊区蔬菜矿质元素及重金属元素含量研究[J].西北农业学报,2002,11(1),97-100.
- [19]李其林,刘定德,赵中金,等.重庆市菜地土壤重金属污染现状与防治对策[J].农业环境与发展,2004(1):30-32.
- [20]张国胜,李宏.周口市蔬菜中铅、镉、汞污染研究[J].中国健康月刊,2011,30(6):55-56.
- [21]周文麟,李仁英,岳海燕,等.南京江北地区菜地土壤重金属污染特征及评价[J].大气科学学报,2009,32(4):574-581.
- [22]汤波.西安市郊蔬菜地土壤重金属污染调查研究[J].科技向导,2011(17):63.
- [23]魏秀国,何江华,陈俊竖,等.广州市蔬菜地土壤重金属污染状况调查与评价[J].土壤与环境,2002,11(3):252-254.
- [24]罗娇赢,张思冲,辛蕊.哈尔滨市北部菜地土壤重金属污染研究[J].国土与自然资源研究,2009(3):48-49.
- [25]郭燕梅,王昌全,李冰.重金属镉对植物的毒害研究进展[J].陕西农业科学,2008(3):122-125.