

## 农田土壤镉污染修复技术研究进展

杨寒雯<sup>1,2</sup>, 刘方<sup>1</sup>, 刘秀明<sup>2,3\*</sup>, 王世杰<sup>2,3</sup>, 胡静娴<sup>2</sup>

- (1. 贵州大学 资源与环境工程学院 贵州 贵阳 550025;  
2. 中国科学院 地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室 贵州 贵阳 550081;  
3. 中国科学院 普定喀斯特生态系统观测研究站 贵州 普定 562100)

**摘要:** 镉(Cd)是自然界中生物毒性最强的元素之一,具有很高的分散性,易通过食物链进入人体,威胁人类健康,因而研究土壤镉污染的预防措施和修复技术是当前人们亟待解决的生态难题。本文介绍了国内外农田土壤镉污染的修复技术、方法的优缺点及其适用范围等方面的研究进展,并结合区域镉污染特征,探讨了这些方法在南方喀斯特山区镉污染修复中应用的可行性。建议在镉高背景值地区的农田镉污染修复的实践中,结合农耕习惯来开发无二次污染的环境钝化材料,重视周边林地对农田的重金属污染风险和土壤-作物之间的镉动态变化规律及其对其他微量元素的影响机制。开展高频次的动态观测工作;调整重金属污染区的产业结构,旨为我国农田重金属镉污染修复提供可行的理论依据。

**关键词:** 农田污染; 重金属镉; 修复技术; 喀斯特山区

中图分类号: X53 文献标识码: A

文章编号: 1008-0457(2020)02-0058-06

国际 DOI 编码: 10.15958/j.cnki.sdnyswxb.2020.02.009

### Advances in Study on the Remediation Techniques of Farmland Soil Contaminated by Cadmium

YANG Hanwen<sup>1,2</sup>, LIU Fang<sup>1</sup>, LIU Xiuming<sup>2,3\*</sup>, WANG Shijie<sup>2,3</sup>, HU Jingxian<sup>2</sup>

(1. College of Resource and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;  
2. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang, Guizhou 550081, China; 3. Puding Karst Ecosystem Observation and Research Station, Chinese Academy of Sciences, Puding, Guizhou 562100, China)

**Abstract:** Cadmium (Cd) is one of the most deleterious biological elements in nature. It is highly dispersed and readily prone to easily enter the human body through the food chain to threaten human health. The study of preventive measures and remediation techniques for soil cadmium pollution is currently an urgent ecological problem. This paper reviewed the research progress of domestic and foreign farmland soil cadmium pollution remediation technologies, the advantages and disadvantages of their methods and their application scope. And it also discussed the feasibility of these methods in the application of cadmium contamination remediation in karst mountains in southern China combined with the characteristics of regional cadmium pollution. It is suggested that farming habits should be considered in developing environmental passivation materials without secondary pollution in the practice of farmland remediation contaminated by high levels of cadmium. Meanwhile, it is needed to pay more attentions to the potential risk of heavy metal pollution caused by the input of surrounding woodland to farmland and the cadmium dynamics rules between soil and crops as well as its influence mechanism on other trace elements. Furthermore, some measures should be conducted, including high-

收稿日期: 2019-09-15; 修回日期: 2019-11-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD0800602); 贵州省高层次创新型人才培养计划“十”层次人才项目(黔科合平台人才[2016]5648)

\* 通讯作者: 刘秀明(1974—), 博士, 研究员, 主要从事环境地球化学研究, E-mail: liuxiuming@vip.skleg.cn.

frequency dynamic observations and the adjustment of industrial structure in heavy metal polluted areas. It provides some theoretical basis for future research on farmland remediation polluted by cadmium in China.

**Keywords:** farmland contamination; cadmium; remediation technology; karst areas

我国农田土壤污染来源多样,包括过度施用化肥、有机肥、农药、地膜弃置、污水灌溉、大气沉降、工业三废的排放等。通常所说的重金属“五毒”即是镉、汞、铅、砷和铬,这五种重金属元素对人体健康和生态环境有巨大的威胁。其中,镉(Cd)在生态系统和食物链中迁移能力的重要性应列首位。

有研究发现我国受到重金属镉污染的耕地面积已达1300万 $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>。2013年我国南方部分地区爆发镉稻米污染,农田变成“毒土”等事件引起人们对Cd污染的高度重视。2014年发布的《全国土壤污染状况调查公报》显示我国土壤Cd的无机污染点位超标率最高,达到7.0%,从污染分布情况来看,南方土壤重金属污染重于北方<sup>[2]</sup>。目前,针对重金属镉污染农田土壤的修复技术包括:采用EDTA、氯化铁等化学药剂进行原位土壤淋洗;采用生物炭、堆肥、石灰等作为稳定剂对重金属镉原位钝化;电动修复,利用电化学的原理去除重金属污染物;植物修复,利用高富集或低积累植物吸收去除土壤中的重金属镉;对耕作方式进行优化管理。近几十年来,农田土壤重金属的修复技术研究、来源和动态变化等方面已取得了许多进展,但目前尚未发现一种能高效清除重金属且无二次污染风险的修复技术。因此,研究修复农田土壤镉污染对区域生态系统安全和人体健康有着重要的现实意义。

本文总结了国内外农田土壤镉污染的修复技术、方法的优缺点及其适用范围等方面的研究进展,探讨了南方喀斯特地区农田镉污染的修复方法,并对未来发展方向进行了展望,旨在为今后的农田土壤镉污染修复研究提供防治策略和技术选择。

## 1 农田Cd污染的化学修复技术

### 1.1 土壤淋洗修复技术

土壤淋洗修复法分为原位淋洗和异位淋洗。淋洗法具有操作简单、时效长、周期短、清理彻底等优点,但淋洗剂受控于pH值、种类、浓度、固液比和淋洗时间,且对于一些粘性土壤的修复效果不佳。土壤重金属淋洗剂主要有无机溶液(HCl和 $\text{HNO}_3$ 等)、表面活性剂(茶皂素和鼠李糖脂等)和螯合剂(EDTA和EDDS等)。胡园等<sup>[3]</sup>对 $\text{FeCl}_3$ 、

柠檬酸、乙酸和 $\text{CaCl}_2$ 的淋洗条件进行优化后发现固液比为1:5时去除效果最佳。杨文俊等<sup>[4]</sup>对比了4种淋洗剂得出对农田重金属Cd的去除效果依次为乙二胺四乙酸二钠盐(EDTA) > 氨三乙酸三钠盐(NTA) > 柠檬酸(CA) > 酒石酸(TA)。EDTA因具有较好的螯合能力和洗脱效果而被广泛用于修复农田Cd污染,但是其难以生物降解,因此也有人研究出了EDTA的替代品,即N,N'-乙二胺二琥珀酸(EDDS)、谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)或乙二醇双(2-氨基乙基醚)四乙酸(EGTA)等易被生物降解的螯合剂<sup>[5]</sup>。土壤淋洗法的淋出液含大量污染物不能随意排放,需做特殊处理,淋洗液的后处理是修复的最后一个环节,需要根据重金属和淋洗剂的类型来选择适当的工艺,进行重金属的分离收集和淋洗剂的回收。通过电化学法可打破络合态重金属离子结构,同时在阴极形成金属单质,阳极处则可回收螯合剂。利用沉淀法可使重金属形成难溶物质后沉淀分离。

### 1.2 土壤钝化技术

目前研究的土壤钝化剂主要有石灰性材料、磷酸盐、含硅肥料、硅酸盐、红石粉煤灰分、氮肥、硫化物、氧化铁等。赤泥具有极细的粒度和相对比较大的比表面积以及相对较高的化学活性等特点,能够与土壤或水体中的污染物质快速发生吸附作用,施用赤泥可以有效减少玉米叶片对农田土中Cu、Cd的吸收<sup>[6]</sup>。与普通的生物修复材料相比,褐煤的有机部分具有较强抵抗微生物分解的能力,在土壤中它同金属离子生成的螯合或络合物相对更加稳定。李泰平等<sup>[7]</sup>采用赤泥、磷矿粉和钙镁氧化物混合药剂均可钝化农田土壤中Cd、As、Pb、Zn,其中施加2%钙镁氧化物混合药剂对重金属Cd的钝化效果最显著且极大地降低了小麦幼苗地上部中的Cd,有利于植物生长。袁林等<sup>[8]</sup>针对农田酸性土壤进行水稻品种和钝化剂筛选后推荐以德优4727作为水稻品种,选择石灰 $0.15\text{ kg/m}^2$  + 腐殖酸 $0.075\text{ kg/m}^2$ 作钝化剂的修复效果较好。对于中碱性农田重金属污染土壤,解晓露等<sup>[9]</sup>归纳出了钝化修复材料以选用复合型材料为宜,且以钙镁磷肥、油菜秸秆生物炭、腐殖酸、椰壳生物炭形成有机-无机复合效果较好且经济环保。

### 1.3 电动修复技术

污染土壤电动修复是20世纪80年代末兴起的一门修复技术,对于重金属的电动修复,第一次尝试是由Lageman用铅、铜和砷实现的,而后Pamucku则研究了锌、镉、镍、钴、镉、铯和铀的电动修复法<sup>[10]</sup>。这是最早对重金属的电动修复研究。但修复导电性差和渗透性高的砂质土壤效果不佳,且针对现在普遍存在的无机、有机复合污染的土壤类型修复效果欠佳。近年来,众多科学家在经典电动力学修复技术的基础上进行改进,且已有了不少成果。刘又畅等<sup>[11]</sup>引入对重金属离子具有较高吸附性的纳米纤维膜和电解液循环机制,避免了经典电动力学修复技术因电解造成的土壤酸/碱化和聚焦现象产生的一些固有缺陷。MARCEAU等<sup>[12]</sup>尝试了小规模Cd污染土壤的电动修复试验研究,经过259 h的电动修复后,Cd<sup>2+</sup>的去除率可达98.5%。张宇等<sup>[13]</sup>研究零价铁渗透反应墙联用电动法能够吸附迁移到附近的重金属离子,从而去除污染农田土壤中的Cd、Pb、Zn、As、Cu,提高了电动修复效率。电动力学修复在有效去除土壤中Cd的同时还能提升土壤肥力,是一种可行的农田土壤修复技术。

## 2 农田Cd污染的生物修复技术

### 2.1 微生物修复技术

公元20世纪初,人们对生物修复技术逐渐重视。在生物圈中有些微生物起着地球化学作用,加速矿物的沉淀、转化或溶解,因此这些微生物可以作为降解或转化有毒污染物的一类新工具。迄今为止,在生物修复去除重金属技术中最有前途的是生物吸附。不同种类的细菌、真菌和藻类都具有生物吸附能力。在吸附过程中,具有不必添加营养物质和保持无菌以及调整参数具有操作简捷的优点。前人研究发现,对重金属具有修复能力的微生物主要包括真菌、细菌和放线菌。不同种类的微生物,对重金属污染的耐性也有所差异,一般而言,放线菌<细菌<真菌。JEONG等<sup>[14]</sup>研究发现,在Cd污染土壤中接种巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)能提高Cd的流动性和生物有效性,增加2倍的植物提取率。杨榕等<sup>[15]</sup>研究表明,在镉污染土壤中接种胶质芽孢杆菌菌液,随着时间延长有效态镉含量呈上升趋势。生物质吸附重金属后可利用解析进行微生物的回收,但解析处理的成本高,若非经济效益很高则可选择焚烧处理,然后回收灰分

中重金属,焚烧后的物质若无法回收则需做安全填埋。

### 2.2 植物修复技术

由于人们质疑微生物生产过程中的安全性以及在环境中运用时可能会引发二次污染,因此开始将重心转移至研究一种更加安全可靠、应用范围更广的方法,即植物修复技术<sup>[16]</sup>。通常使用的植物修复技术有植物挥发、植物固定、植物萃取以及植物降解、根际过滤。植物挥发仅限于去除可挥发性污染物,现多用于汞污染土壤的修复,不适用于镉污染。植物固定仅适合对污染物进行原位处理,去除重金属效果不彻底。修复结束后不需要处理有害物质或生物量,可用于迅速固定地表水和地下水的重金属污染物质。植物的茎部生物量通常被收集起来,在特定的地点进行适当的处理,或者焚烧以回收金属。此方法适用于原位修复大范围的镉污染土壤,具有成本低、可持续的优点。吴科堰等<sup>[17]</sup>研究了棉花、蓖麻、苕麻、桑树、剑麻5种非食用经济作物对不同重金属的富集特性和耐受性发现,表明利用非食用经济作物修复重金属农田污染土壤不仅可以阻止Cd、Cu、Zn、Pb、As等重金属进入食物链,而且能大规模地进行农田污染土壤修复,并且有经济价值,是一项具有很好应用前景的修复技术。目前国内利用得较多的植物修复技术为超富集植物萃取技术和低积累作物筛选技术。

#### 2.2.1 超富集植物萃取技术

超富集植物迄今为止发现了494种,涉及约50个科,其中Cd的超富集植物仅6种,均属十字花科,分别为天蓝遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)、圆叶南芥(*Cardaminopsis halleri*)、遏蓝菜属(*Thlaspi praecox*)、景天科东南景天(*Sedum Alfredii Hance*)、堇菜科宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)和茄科龙葵(*Solanum nigrum Linn*)<sup>[18]</sup>。此外,某些品种的柳树也作为忍耐—富集型作物进行植物萃取,FISCHEROV等<sup>[19]</sup>比较了7个树种发现毛枝柳积累能力和修复效率与超积累植物*Thlaspi caerulescens*、*Arabidopsis halleri*相似。目前中国对Cd超富集植物也有了一定的研究进展,我国享有巨大的油菜种质资源库,其中的某些品种对Cd富集能力较强,具有易种植、生物量大、抗胁迫能力强等特征,是一种修复农田镉污染潜力极大的作物,其中芥菜型油菜和印度芥菜是同属同种植物有相似的富集能力。苏德纯等<sup>[20]</sup>从40多种芥菜型油菜中选出了吸收镉能力较强的两个品种:溪口和朱苍花籽,其中溪口

花籽去除 Cd 的能力相对较强。

植物萃取的另一个方向是通过添加某些化学物质来活化重金属以促进富集植物吸收重金属离子。目前相关研究中化学物质主要使用的是以 EDTA、DTPA 为代表的有机螯合一络合剂。但是由于土壤中 EDTA 的螯合作用会导致水溶态镉增加至少 400 倍,若发生淋洗作用将对地下水造成严重的二次污染。此外有研究发现,施用有机酸能够增强油菜对镉的积累和富集系数<sup>[21]</sup>。该技术的缺点之一是收获植物中存在高含量的重金属,目前常用的修复后处置方法包括焚烧法、堆肥法、热解法以及液相萃取法等,其中堆肥法耗时较长,约 2~3 个月,且成本较高有渗滤液污染地下水的风险,而焚烧法和热解法则被认为是处理修复植物最可行的选择,其减量化效果极为显著。最后利用火法精炼、电渗析、电磁和湿法冶炼等技术来提取灰分中的重金属成分。ROBINSON<sup>[22]</sup>利用一套用于预测植物萃取治理土壤重金属污染的效果及费效分析的决策支持系统(Decision Support System, DSS)对修复技术进行了分析,结果表明,从长远来看,植物萃取是治理农田土壤镉污染的最好方案之一。

### 2.2.2 低积累作物筛选技术

根据前人研究,目前已筛选出来的低积累作物有水稻、蔬菜、小白菜、菜心、芹菜、油麦菜、大白菜、甘蓝、玉米、小麦等。同作物品种的种间种内对不同重金属的吸附能力差异较大,ALEXANDER 等<sup>[23]</sup>通过对 6 种常见蔬菜的 Pb、Cd、Zn 和 Cu 积累差异性研究,叶菜类和根菜类分别呈现高积累和中等积累,而豆科蔬菜呈低积累。王林友等<sup>[24]</sup>将 78 份水稻品种的糙米中的 Cd、As、Pb 含量进行对比发现明恢 86 品种为 Cd、Pb、As 三低品种。杜彩艳等<sup>[25]</sup>研究 20 个玉米品种发现在 Cd-Zn 复合胁迫下,品种间玉米的籽粒、茎叶、根中 Cd、Zn 含量均存在显著差异。

## 3 农艺调控

### 3.1 叶面阻隔技术

叶面阻隔技术的机理主要是通过拮抗作用来阻碍镉金属酶的活性,减弱植物蒸腾作用以抑制 Cd 向上运输,同时促进抗氧化物质的形成,与重金属离子发生吸附和螯合等化学反应,能够强化叶面对营养物质的吸收能力和提高植物的胞内盐浓度,从而抑制植物对环境中重金属的吸收。这不仅能阻控农作物中重金属的积累,且利用率高、吸收快,

有利于农作物发育、增产、改善品质。常规叶面阻隔剂主要有:含硅的叶面生理阻隔剂,硒和稀土元素为重要成分的叶面生理阻隔剂,氮(N)、磷(P)、钾(K)和微量元素为主要成分的叶面生理阻隔剂。喷施硅质叶面阻隔剂能够提高豆芽中碳水化合物和蛋白质含量,使一些酯类物质转化为其他物质以提高豆芽耐 Cd 性<sup>[26]</sup>。王加冕等<sup>[27]</sup>施用含硒叶面肥后,小麦品种结实率均值相比对照增长了 7.84%,同时显著降低稻米中汞、铅、镉含量,其中,稻米中镉含量分别降低 11.7% 和 15.6%。但是一般非硒积累的植物含硒量 > 50 mg/kg 时,会导致植物中毒,表现出生长缓慢、植株矮小、叶子失绿等中毒症状。铈对镉引起的生长抑制及营养障碍无明显的防护作用,但铈可明显降低小麦幼苗茎叶及根系中镉的生物富集量,胡忻等<sup>[28]</sup>发现 5 mg/L  $Ce^{3+}$  对低浓度镉引起菱叶片的毒害作用缓解效果明显。

### 3.2 科学施肥与水分管理

目前农户施肥大多还是以施用化肥为主,但过多施用化肥极易引起土壤板结,长期如此将造成严重的环境污染、作物徒长而结实率较低。同一种肥料采用不同的施肥方式最终的经济效益会出现显著的差别,科学合理的施肥方式根据土壤、气候、肥料特点等具体因素,有限度、有选择地提供植物生长所需元素,使之有效地提高作物产量和经济效益,促使土壤养地和用地良性循环。

有机肥中含较多的糖、酚、醛类化合物以及羧基,适量有机肥能够吸附和固定化肥中的硝酸盐。因此,无机肥和有机肥合理配施可产生交互作用,减少板结并增产。由于农田土壤环境中微量元素的含量较低而导致植物体难以对其进行吸收,因此还需要依据当地的农田土壤养分状况来配施微量肥料。杨文弢等<sup>[29]</sup>研究了 Cd 胁迫下外源有机肥对土壤中 Cd 有效性和水稻糙米中 Cd 含量及稻谷产量的影响。此外,施肥方式不同也会导致种植效果的差异。基肥、种肥以及追肥采用深施的方式有助于保持农田土壤肥力,例如深施氮肥能够有效解决氮素挥发和肥料施用量大的问题。农田土壤中的磷肥移动性较差,最好配施有机肥并进行早施、作底肥或分层施等施肥方式。在条件允许的情况下可以进行集中施、条施或穴施于根系富集层,使种子及植物根系吸收磷元素,促进根系对营养物质进行吸收,提升肥料的利用率。

与节水灌溉技术相结合的施肥方式,将充分发

挥水肥效应并且能够有效地提升肥料的利用率。节水灌溉技术目前使用较多的是喷灌、漫灌、微灌。与传统的漫灌相比,喷灌技术主要运用在农作物密集区,区域化管控能更好地节水。但实际运用时,因其耗能高,水分易蒸发,必须要在大容量水源和风力较低的条件下方能够实施。微灌技术克服了水资源浪费的问题,具有应用范围广、对地形土壤要求低等优点。此外,水分作为水稻生产过程中的重要因子,不仅调控着水稻吸收营养和生理代谢能力,而且影响着植株抗逆性。杨小粉等<sup>[30]</sup>发现,在全生育期淹水灌溉下农田土壤有效性Cd降低,水稻根茎叶各器官中的Cd含量也达到最低值。

#### 4 展望

迄今为止农田土壤在Cd来源辨别、各影响因子及其风险评价方面的研究尚少。不同地区由于Cd污染的来源不同而导致同一种修复处理会产生极大的差异,尤其在南方喀斯特地区。在喀斯特地区农田未污染区的土壤镉并没有明显富集,表层镉的随机分布受到农业耕种方式和肥料农药施用的影响更大<sup>[31-32]</sup>。喀斯特地区的土壤多偏中碱性,因此可利用钙镁磷肥、秸秆生物炭、椰壳生物炭、腐

殖酸等作为钝化剂修复石灰性农田土壤。同时,部分南方喀斯特地区的林地土壤Cd含量高于耕地土壤,具有中强程度和极强程度的潜在生态风险<sup>[33]</sup>。可利用自然生长林木和人工培育Cd富集植物结合方式能够在短时间内加速植被覆盖面积,树木生长过程中吸收重金属,从而降低了土壤中的重金属含量,减少重金属向地下水淋溶的同时减缓水土流失现象。因此,原位钝化修复技术和植物修复技术适用于中碱性农田土壤环境,其在南方喀斯特地区具有极大的可行性。

农田土壤重金属污染直接威胁到人类的健康安全,而农田土壤的镉又时常伴随着其他重金属的复合污染,因此治理农田土壤镉污染的工作是一个综合的复杂过程。而以往的农田土壤修复研究对象较为单一,缺乏多过程、多时段的长期动态分析,因此农田土壤Cd动态对其他微量元素的响应、气候和管理方式以及复合污染的控制机制等问题有待于更系统地研究。因此,今后的农田土壤修复可向几方面进行深入研究:开发无二次污染的环境钝化材料修复农田污染、监测林地土壤Cd污染对周边农田的风险、对土壤-农作物系统中Cd迁移的高频次动态观测、因地制宜调整产业结构。

#### 参 考 文 献:

- [1] XUE D W, JIANG H, DENG X X, et al. Comparative proteomic analysis provides new insights into cadmium accumulation in rice grain under cadmium stress [J]. *Journal of hazardous materials* 2014, 43(280): 269-278.
- [2] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 《全国土壤污染状况调查公报》探析 [J]. *农业环境科学学报* 2017, 36(9): 1689-1692.
- [3] 刘江红, 薛健, 魏晓航. 表面活性剂淋洗修复土壤中重金属污染研究进展 [J]. *土壤通报* 2019, 50(1): 240-245.
- [4] 杨文俊, 辜娇峰, 周航, 等. 农田土壤重金属淋洗剂筛选与效应分析 [J]. *水土保持学报* 2019, 33(4): 321-328.
- [5] CHAE Y, CUI R, WOONG K S, et al. Exoenzyme activity in contaminated soils before and after soil washing:  $\beta$  glucosidase activity as a biological indicator of soil health [J]. *Ecotoxicology and environmental safety* 2017, 135(6): 368-374.
- [6] 胡园, 林莉, 胡艳平, 等. 农田土壤重金属Cd的环保淋洗剂筛选研究 [J]. *长江科学院院报* 2019, 36(9): 23-28.
- [7] 李泰平, 丁浩然, 徐海珍, 等. 农田重金属污染土壤的原位钝化研究 [J]. *环境科学与技术* 2019, 42(1): 226-230.
- [8] 袁林, 赖星, 杨刚, 等. 钝化材料对镉污染农田原位钝化修复效果研究 [J]. *环境科学与技术* 2019, 42(3): 90-97.
- [9] 解晓露, 袁霖, 朱晓龙, 等. 中碱性镉污染农田原位钝化修复材料研究进展 [J]. *土壤通报* 2018, 49(5): 1254-1260.
- [10] LAGEMAN R, POOL W, SEFFINGA G. *Electro-reclamation: theory and practice* [M]. London: chemistry and industry, 1989: 585-590.
- [11] 刘又畅. 电动力学新技术及其在重金属污染土壤修复中的应用研究 [D]. 重庆: 重庆大学 2014.
- [12] MAREEAU P, BROQUET P, BATIELE P. Electro-kinetic remediation of cadmiums-piked clayey medium [J]. *Pilot test geochemistry* 1999, 328(16): 37-43.
- [13] 张宇, 彭莹. 零价铁反应墙联合电动法修复铅锌矿区重金属复合污染农田土壤的试验研究 [J]. *广东化工* 2017, 44(12): 318-319.
- [14] LU P, NUHFER N T, KELLY S, et al. Lead coprecipitation with iron oxyhydroxide nanoparticles [J]. *Geochimica et cosmochimica Acta* 2011, 75(16): 4547-4561.

- [15] 杨榕. 胶质芽孢杆菌促进印度芥菜富集土壤镉的效应研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2013.
- [16] MOHAMMED A S ,KAPRI A ,GOEL R. Heavy metal pollution: source ,impact and remedies [M]. London: Biomangement of metal contaminated soils 2011.
- [17] 吴科堰, 敖明, 柴冠群, 等. 非食用经济作物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(1): 62-67.
- [18] 赵爱芬, 赵雪, 常学礼. 植物对污染土壤修复作用的研究进展[J]. 土壤通报, 2000, 27(1): 44-50.
- [19] FISCHEROV Z ,TLUSTO P ,SZKOV J et al. A comparison of phytoremediation capability of selected plant species for given trace elements [J]. Environmental pollution, 2006, 144(1): 93-100.
- [20] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学, 2002, 22(1): 48-51.
- [21] 邢艳帅. 有机酸诱导油菜对 Cd 污染土壤的修复研究[D]. 郑州: 河南师范大学, 2014.
- [22] ROBINSON B ,FERNANDEZ J E ,MADEJON P et al. Phytoextraction: an assessment of biogeochemical and economic viability [J]. Plant and soil, 2003(249): 117-125.
- [23] ALEXANDER P D ,ALLOWAY B J ,DOURADO A M. Genotypic variations in the accumulation of Cd ,Cu ,Pb and Zn exhibited by six commonly grown vegetables [J]. Environmental pollution, 2006, 144(3): 736-745.
- [24] 王林友, 竺朝娜, 王建军, 等. 水稻镉、铅、砷低含量基因型的筛选[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(1): 133-138.
- [25] 杜彩艳, 张乃明, 雷宝坤, 等. 不同玉米( *Zea mays*) 品种对镉锌积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 16-23.
- [26] 吴烈善. 硅质叶面阻隔剂抑制豆芽 Cd 积累效应及机理分析[J]. 广西大学学报( 自科版), 2018, 45(10): 2056-2060.
- [27] 王加冕, 陈火云, 郭金洁, 等. 硒叶面肥对小麦农艺性状、产量和硒含量影响的初步研究[J]. 长江大学学报( 自科版), 2018, 15(10): 1-4.
- [28] 胡忻, 陈逸珺, 王晓蓉, 等. 稀土元素铈对小麦幼苗镉伤害的防护效应[J]. 南京大学学报( 自然科学版), 2001, 34(6): 671-677.
- [29] 杨文弢, 张佳, 廖柏寒. Cd 胁迫下外源有机肥对土壤中 Cd 有效性和水稻糙米中 Cd 含量的影响[J]. 贵州大学学报( 自然科学版), 2020, 37(1): 105-111.
- [30] 杨小粉, 吴勇俊, 张玉盛, 等. 水分管理对水稻镉吸收的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(4): 34-37.
- [31] 刘鸿雁, 涂宇, 顾小凤, 等. 地球化学高背景农田土壤重金属镉的累积效应及环境影响[J]. 山地农业生物学报, 2018, 37(5): 1-6.
- [32] 刘青栋, 刘鸿雁, 周显勇, 等. 镉在土壤-辣椒体系的迁移富集规律[J]. 贵州大学学报( 自然科学版), 2019, 36(4): 30-36.
- [33] 罗慧, 刘秀明, 王世杰, 等. 中国南方喀斯特集中分布区土壤 Cd 污染特征及来源[J]. 生态学杂志, 2018, 37(5): 1538-1544.

(上接第57页)

- [20] 段金廛, 宿树兰, 郭盛, 等. 中药资源产业化过程废弃物的产生及其利用策略与资源化模式[J]. 中草药, 2013, 44(20): 2787-2797.
- [21] 阙云飞, 王晓红, 吕享, 等. 钩藤生物碱的组织化学定位研究[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(3): 27-32.
- [22] 张继东, 王庆琪. 薄荷残渣中化学成分及抗炎作用[J]. 山东医药工业, 2000, 19(3): 34-35.
- [23] 王晓玲, 朱朝阳, 刘高强, 等. 冬虫夏草深层发酵与功效成分分析[J]. 中国食品学报, 2016, 16(1): 91-98.
- [24] 李晓青, 黄国勤. 中药材与农林生物的间套作复合种植模式探析[J]. 现代农业科技, 2008, 37(15): 267-268.
- [25] 史艳财, 李承卓, 邹蓉, 等. 中药材间作种植模式研究进展[J]. 北方园艺, 2012, 33(16): 180-183.
- [26] 周芳, 曹国璠, 李金玲, 等. 药用植物连作障碍机制及其缓解措施研究进展[J]. 山地农业生物学报, 2019, 38(3): 67-72.
- [27] 申绪湘, 游俊, 陈功锡. 地方高校产学研合作创新发展研究与应用[J]. 中国高等教育, 2012, 48(2): 59-60.