

# 重金属低积累型植物筛选研究进展

汪艳杰, 胡志辉\*

(江汉大学 生命科学学院; 湖北省豆类(蔬菜)植物工程技术研究中心, 湖北 武汉 430056)

**摘要:**随着工业的发展和废弃物排放的持续增加,土壤重金属污染日益严重,导致可用耕地面积减少,作物中的重金属含量超标,最终严重威胁到人类的健康。从我国土壤重金属的污染状况,土壤重金属超标对植物产生的毒害作用,以及重金属低积累型作物的筛选和稳定性研究等几个方面进行了综述,并对今后的研究方向及重点进行了展望。

**关键词:**土壤;植物;筛选;重金属;低积累;稳定性

中图分类号: X171; X822.1

文献标志码: A

文章编号: 1673-0143(2018)06-0559-08

DOI: 10.16389/j.cnki.cn42-1737/n.2018.06.013

## Review on Screening of Heavy Metals Low Accumulated Plants

WANG Yanjie, HU Zhihui\*

(School of Life Sciences; Hubei Province Engineering Research Center for Legume Plants,  
Jianghan University, Wuhan 430056, Hubei, China)

**Abstract:** With the development of industry and the continuous increase of waste emissions, heavy metals pollution becomes more and more serious, it can cause the reduce of agricultural acreage, heavy metals in excess of the standards in corps, and eventually harms human health. The author presented a review of recent researches on soil heavy metals pollution condition in China, side effects on plants, screening of heavy metals low accumulated plants, stability of heavy metals low accumulated crops. The future research directions are prospected.

**Key words:** soil; plants; screening; heavy metals; low accumulation; stability

耕地在地理学上是指可以用来种植农作物的土地,是极其重要的农业资源之一。近年来,随着世界人口数量急剧上升、经济一体化与经济全球化发展速度不断加快,耕地污染状况日益突出。为了保证人类的健康和生态环境,对重金属污染土壤的有效利用受到了广泛关注。笔者针对重金属低积累作物的筛选进展进行了总结,并分析了作物重金属低积累特性的稳定性,旨在为轻度重金属污染土壤的有效合理利用提供一定的参考。

### 1 我国土壤重金属污染状况

环境保护部和国土资源部于2015年4月17日联合发布了全国土壤污染状况调查公报。公报显示,全国土壤调查点的超标率为16.1%,耕地污染接近五分之一,导致农耕面积大量减少。其中,镉元素的超标率最高,为7.0%。重金属是指密度大于5 g/cm<sup>3</sup>的金属,主要包括Cd、Cr、Hg、Pb、Cu、Zn、Ag、

收稿日期: 2018-07-12

基金项目: 湖北省自然科学基金面上项目(2016CFB651);武汉市属高校产学研项目(CXY201801)

作者简介: 汪艳杰(1983—),女,实验师,博士生,研究方向:植物生理生态。

\*通讯作者: 胡志辉(1973—),男,副研究员,研究方向:植物生理生化遗传育种。E-mail: huzhihui@jhun.edu.cn

Sn等,一般把As、Se和Al等也包括在内。土壤受到重金属污染是世界的危机,特别是在中国等发展中国家<sup>[1]</sup>,在中国,由重金属污染导致的作物损失每年会超过10 000 000 t,导致经济损失200亿元<sup>[2-3]</sup>。中国农田10.18%受到重金属的污染,主要是Cd、Hg、Cu、Zn等重金属的污染<sup>[4]</sup>。Cd、As、Zn、Cr、Hg、Cu、Ni、Pb 8种重金属元素中,Cd污染概率为25.2%,远超过其他几种土壤重金属元素<sup>[5]</sup>。2013年,广州市食品药品监督管理局发现8个批次的大米镉含量超标;2016年,江西宜春中安实业有限公司恶意偷排未经任何处理的污水,导致袁河及仙女湖镉、铊、砷严重超标。因此,控制食物中重金属的含量越来越重要,国内外都颁布了人类饮食中有毒金属的最大允许含量的相应法规,中国颁布了食品安全国家标准《食品中污染物限量》(GB 2762-2012),其中规定了食物中多种重金属含量的限量值。土壤组分多、结构复杂,具有非均一性等特点,而重金属在土壤中的形态、活跃程度也不尽相同,这些特征决定了土壤重金属污染具有隐蔽性、滞后性、不可逆性和长期性。土壤中的重金属极易被植物根系吸收并被转运至地上部,从而进入食物链,对植物生长发育产生抑制和毒害,最终对人类健康造成危害,诱发多种疾病,如图1所示<sup>[6]</sup>。

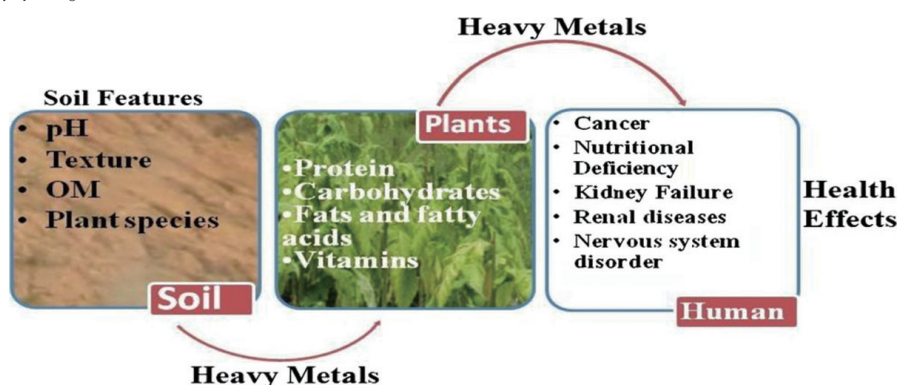


图1 重金属的来源、吸收与人类健康关系图

Fig. 1 Diagram of source, absorption and relationship with human health of heavy metals

## 2 重金属的毒害效应

### 2.1 土壤重金属对作物及人类的危害

重金属污染物不能自然降解或被微生物分解,一方面通过食物链的积累危害动物和人类健康<sup>[7]</sup>,另一方面影响植物的生长和植物体内活性氧代谢系统的平衡,从而导致一系列有害的生理生化变化<sup>[8]</sup>。国内外许多研究者对重金属对植株的毒害效应进行了研究。Cd、Pb等重金属不是植株生长的必需元素,在植株体内积累大量的重金属后,必需元素的吸收和转运过程会受到影响,最终影响到植株的生长与繁殖<sup>[9]</sup>。Cd及其化合物具有相对较强的水溶性和脂溶性,在土壤中有很强的迁移能力,具有很强的生物活性,有向生物体积聚的趋势。Cd胁迫对作物根系代谢、叶片光合作用、呼吸作用和蒸腾作用、作物碳/氮/核酸代谢、作物激素等方面都有影响;对土壤的养分胁迫和生态系统也会间接地产生影响等;表现为根尖变黑、生长受阻、组织失绿、干物质产量降低等,严重时导致作物死亡<sup>[10]</sup>。重金属含量过高对蔬菜或者作物的营养价值也会产生一定的影响,主要是在碳水化合物、蛋白质与氨基酸、脂肪和脂肪酸、维生素等方面的影响<sup>[6]</sup>。土壤中的重金属可以进入植株的营养器官和生殖器官,阻止传粉者的作用,并改变花粉粒的萌发,表明土壤中重金属对植株的生殖器官有重要影响<sup>[11]</sup>。

### 2.2 重金属污染的评价指标

生物转移系数(biological transfer factor, BTF)是指植物地上部某种重金属元素含量与植物根部该种重金属元素含量的比值,反映了植物对土壤重金属元素的富集能力,富集系数越大,富集能力就越强<sup>[12]</sup>。

生物富集系数(bioaccumulation factor, BAF)是指植物体内某种重金属元素的含量与土壤中该种重金属元素的含量的比值,反映植物吸收重金属后,从根部向茎、叶转移的能力<sup>[12]</sup>。

籽粒/茎叶转运系数 = 植株籽粒重金属含量/茎叶同种重金属含量<sup>[13]</sup>。

耐性指数(tolerance index, %) = (重金属处理植株的生物量/对照组植株的生物量) × 100%<sup>[14]</sup>。

相对生物量(%) = (重金属胁迫下植株干重/对照植株干重) × 100%, 相对生物量是反映植株耐重金属特性的一个重要指标。

转运效率(%) =  $100 \times (\text{地上部重金属含量} \times \text{地上部生物量}) / (\text{地上部重金属含量} \times \text{地上部生物量} + \text{根系重金属含量} \times \text{根系生物量})$ , 转运效率(S/R)是衡量植物对重金属分配和转移能力的重要指标, 其值越大表示植物转运重金属的能力越强<sup>[15]</sup>。

每日吸收率(daily intake rate (DIR)) ( $\mu\text{g/day/person}$ ) = 蔬菜或水果中的重金属含量(mg/kg 鲜重) \* 当地蔬菜或水果的摄取率(g 鲜重/人/天)/成人平均体重(kg)<sup>[16]</sup>。DIR用来评估消费者暴露于一种或者多种重金属污染的食物潜在慢性威胁状况。

THQ(target hazard quotient)<sup>[17]</sup>可以用来鉴定重金属对人类健康的威胁程度(human health risk assessment, HHRA), THQ是非致癌性的风险评估, 是重金属暴露剂量和ORD(日常参考剂量)的比值, THQ > 1表明重金属暴露水平高于ORD, 如果人类长时间暴露在重金属的环境中很可能对身体健康产生副作用。  $THQ = E_f E_d F_{IR} C/R_f D W_{AB} T_A * 10^{-3}$ 。其中,  $E_f$ 是重金属暴露频率(365 days/year),  $E_d$ 是重金属暴露持续时间, 即人的平均寿命(70 years),  $F_{IR}$ 是食物摄取率(g/day · person),  $C$ 是食物中的重金属含量(mg/kg dry weight),  $R_f D$ 是日常参考剂量(mg/kg day<sup>-1</sup>),  $W_{AB}$ 是人体平均体重(55.9 kg for adults and 32.7 kg for children),  $T_A$ 是非致癌物的平均暴露时间(365 days/year, number of exposure years, assuming 70 years in this study),  $10^{-3}$ 是换算因数(mg/kg)<sup>[18]</sup>。

如果人类暴露在多种重金属环境下, 可以用下面的公式计算多种重金属对人类健康的危害,  $HI = \sum_{i=1}^n THQ_i$ , 其中,  $n$ 是重金属的种类,  $THQ_i$ 是单种重金属的THQ值<sup>[19]</sup>。

单因子指数法(single pollution index)<sup>[20]</sup>是目前国内通用的一种重金属污染评价的方法, 为土壤单项污染物的实测值与评价标准的比值, 用以表示土壤中该污染物的污染程度。其计算公式为:  $P_i = C_i / S_i$  (3-1), 式中,  $P_i$ 为土壤(蔬菜)中污染物*i*的单因子污染指数;  $C_i$ 为土壤(蔬菜)中污染物*i*的实际测量浓度;  $S_i$ 为污染物评价标准。评价结果可分为4个等级:  $P_i \leq 1$ , 非污染;  $1 < P_i \leq 2$ , 轻污染;  $2 < P_i \leq 3$ , 中污染;  $P_i > 3$ , 重度污染。

尼梅罗综合指数(Nemerow multifactor index)<sup>[21]</sup>:  $P = [(P_{\text{mean}}^2 + P_{\text{max}}^2) / 2]^{1/2}$ ,  $P_{\text{mean}}$ 是单项污染指数的平均值,  $P_{\text{max}}$ 是单项污染指数的最大值。  $P < 0.7$ , 安全;  $0.7 < P < 1$ , 相对安全;  $1 < P < 2$ , 轻微污染;  $2 < P < 3$ , 中度污染,  $P > 3$ , 严重污染。

### 3 农作物积累重金属的差异性

#### 3.1 作物对重金属的吸收特性

在重金属污染土壤上生长的植物对重金属污染具有一定的耐性, 不同的耐性机制使植物对重金属的吸收、转移和积累特征表现出较大的差异。忍耐性植株地上部的Cd积累程度是有限的, Cd忍耐的机制主要有阻止重金属在植株体内的积累, 细胞的解毒作用, 有毒金属的代谢拮抗作用<sup>[14]</sup>。尚爱安等<sup>[22]</sup>认为不同植物对相同重金属的吸收能力不同, 重金属在植物不同部位的分布也不同; 相同种类的植物对不同重金属的吸收能力也不相同, 这是由作物基因型决定的。李正文等<sup>[23]</sup>对57个中稻品种进行了比较试验, 观察水稻对重金属的吸收特征, 结果表明, 同一土壤中在不同水稻品种籽粒中的Cd、Cu、Se积累具有显著性差异。张堃<sup>[24]</sup>研究了28个油麦菜品种的茎叶Cd含量, 认为28个油麦菜品种的茎叶Cd含量品种间差异足够大, 足以用来鉴别Cd-PSC。植物不同部位对Fe和Zn的吸收顺序为叶片 > 茎 > 根 > 果实, 对Cu和Pb的吸收顺序为茎 > 根 > 叶片 > 果实, 对于Cr的吸收顺序为茎 > 叶片 > 根 > 果实, 果实中重金属的含量最低, 最不易积累重金属<sup>[25]</sup>。BEZEL'等<sup>[26]</sup>认为作物从土壤中吸收的Cd只有很少量转运到籽实中, 绝大部分都积累在根部, 可以保护营养器官和繁殖器官。根作为植物地下器官, 与土壤直接接触, 土壤中的重金属等有害物质通过植物根的吸收作用和体内转运最终在植物可食部分中积累。地上部积累差异是由根系吸收能力和根系转运能力决定, 籽粒低积累品种将吸收的镉大部分保留在根系中<sup>[27-28]</sup>。雷梅等<sup>[29]</sup>将研究区域内的植物对重金属的吸收机制分为3类, 即

富集型(accumulation)、根部囤积型(root compartments)、规避型(excluders)。富集型植物能从土壤中主动吸收并富集重金属元素,将重金属转移到地上部;根部囤积型能将重金属囤积于根部,只有少量向地上部转移,减少对光合、呼吸、生殖系统的伤害;规避型植物能够将土壤重金属沉淀在根系表面,而植物体内只吸收很少量的重金属。

### 3.2 豆科作物中重金属的积累

豆科作物有3亚科,748个属,约20000种。豆科作物具有重要的经济意义,是人类食品中淀粉、蛋白质、油、蔬菜的重要来源之一,也是良好的绿肥和饲料作物。刘俊<sup>[30]</sup>采用盆栽和水培的方法,测定了大豆整个生育期的不同器官的镉含量,结果发现,外界胁迫时间一定,镉浓度增加,大豆根部Cd含量极显著增加,当外界Cd浓度一定时,随着时间的延长,大豆根部Cd含量先下降后上升,即花荚期<幼苗期<成熟期。黄运湘等<sup>[31]</sup>研究了10个大豆品种,采用水培方法,进行了抗性筛选,研究了耐镉的差异性。赵云云等<sup>[32-33]</sup>利用盆栽方法对大豆品种进行了抗镉性评价,并发现了不同抗性品种的大豆。ARAO等<sup>[34]</sup>通过土培法和水培法发现大豆品种的镉的吸收与分布具有差异显著性。BELIMOV等<sup>[14]</sup>研究了豌豆中重金属积累和对Cd的耐性,从99个豌豆品种中,最终筛选出了13种Cd耐性的表型,结果表明,豌豆是Cd敏感的物种。

## 4 重金属低积累型作物筛选研究进展

### 4.1 重金属低积累作物筛选意义

2016年5月28日,国务院印发了《土壤污染防治行动计划》,简称“土十条”<sup>[35]</sup>,提出了整合高等学校、研究机构、企业等科研资源,开展土壤环境基准、土壤环境容量与承载能力、污染物迁移转化规律、污染生态效应、重金属低积累作物和修复植物筛选,以及土壤污染与农产品质量、人体健康关系等方面基础研究。在土壤污染防治中,农艺调控是指利用农艺措施对耕地土壤中污染物的生物有效性进行调控,实现受污染耕地安全利用,主要包括种植重金属低积累作物、调节土壤理化性状、科学管理水分、施用功能性肥料等,土壤Cd污染危害程度取决于土壤中Cd总量及其生物有效性、环境-生物系统特别是环境-植物系统的迁移转化以及生物对Cd的积累程度。开展粮食作物收获部位低Cd积累品种的筛选和降低粮食作物Cd吸收积累的农作技术措施研究意义重大。目前,解决粮食中重金属Cd含量超标途径主要有两条:一是从土壤角度,降低土壤中Cd的含量或者钝化土壤中Cd的活性,从而减少粮食中Cd含量;二是从农作物角度,筛选Cd低积累的作物品种,并在污染区推广种植,减少Cd向食物链迁移。

### 4.2 筛选作物重金属积累程度的标准

杨中艺教授提出了PSC(pollution-safe cultivars)的概念,即在一定的受污染土壤中种植时,其食用部位污染物含量能够达到安全食用标准的农作物品种,PSC策略对保障我国食品安全具有很重要的现实意义和应用价值<sup>[36]</sup>。刘维涛等<sup>[37]</sup>认为重金属低积累的植物应同时具备:该植物的地上部和根部的重金属含量低或者可食用部位低于有关标准;富集系数<1;转运系数<1;该植物对重金属毒害具有较高的耐性,在较高的重金属污染下能够正常生长,并且生物量没有显著降低。

### 4.3 重金属低积累作物的筛选方法

我国有大面积农田受到重金属的污染,这些作物的可食用部分重金属含量会超过国家粮食卫生标准的几倍甚至是几十倍。可以通过筛选重金属低积累的作物品种来减少重金属的富集是可行的。目前筛选重金属低积累品种的方法仍在探索阶段,筛选方法主要有土培法和水培法。土培法在重金属污染的土壤中原位筛选,通过植株的生长状态和重金属的积累程度判断耐重金属能力的高低;水培法是在溶液中加入重金属,观察植株的生长状态和重金属的积累程度判断耐重金属能力的高低<sup>[38]</sup>。张堃<sup>[24]</sup>研究了市售的种子中的镉含量,并测定了植物幼苗中的NaCl提取态的Cd含量以及稀HCl提取态的Cd含量,以及它们在同种蔬菜中积累镉的能力的差异,结果认为市售种子中Cd含量可以用于芹菜Cd低积累品种的快速筛选;并可以将NaCl提取态的Cd含量以及稀HCl提取态的Cd含量的比值作为衡量植物积累Cd能力的指标,对小白菜和蕹菜而言,能够有效区分镉低积累和高积累品种。王林友

等<sup>[39]</sup>等测定了78份水稻品种糙米中镉、铅、砷三种元素的含量,同时将20个品种种植在3个不同镉、铅、砷含量的土壤中,比较了镉、铅、砷含量的变化情况,结果发现,不同品种水稻籽粒对重金属的积累存在显著的品种差异性,并筛选出重金属低积累型水稻。郭晓方等<sup>[13]</sup>选择了8个抗寒玉米品种,研究了不同品种积累重金属能力的差异,结果发现,在籽粒和茎叶中的重金属含量在不同品种间存在显著差异,籽粒生物量、籽粒重金属含量及重金属转运系数是筛选重金属低积累型玉米品种的重要依据。ARCHAMBAULT等<sup>[40]</sup>将幼苗(苗龄4~5 d)暴露于Cd胁迫下,测量第二片幼叶及根系的Cd含量,并以第二片幼叶及根系Cd含量的比值作为指标来鉴别Cd低积累基因型。目前已筛选出的重金属低积累型品种如表1所示。

表1 重金属低积累型品种筛选  
Tab. 1 Screening of heavy metals low accumulated plants

| 试验材料 | 元素          | 品种名称  | 报道文献                       |
|------|-------------|---|----------------------------|
| 水稻   | Cd、Pb、As    | 明恢86  | 王林友,等,2012 <sup>[39]</sup> |
|      | Cd、As       | R9308选  |                            |
|      | Pb、As       | 中恢8006、浙恢205  |                            |
|      | Cd、Pb       | 明恢73、明恢78、辅恢838、蜀恢527、H807  |                            |
| 蔬菜   | As、Cd、Hg    | 津优1号、浙蒲2号   | 张永志,等,2009 <sup>[41]</sup> |
|      | As、Cd、Hg、Pb | 杭州本地香、杭州长瓜  |                            |
|      | As、Hg       | 鸡爪×吉林   |                            |
|      | Cd、Hg       | 白玉春、浙杂203、FA-189  |                            |
|      | Hg          | 早熟5号、抗热605、上海青  |                            |
|      | As、Pb、Hg    | 杭茄1号、引茄1号   |                            |
| 小白菜  | Cd          | 抗热四季水口超甜白菜、泰国四季快菜、特选种矮脚黑叶白菜、越秀四号、越秀三号、热优二号、华冠青梗小白菜  | 代成成,2010 <sup>[42]</sup>   |
|      |             | SJ19、49CX、XG49、CH4、LB70、YL80  | 邱丘,2011 <sup>[43]</sup>    |
| 芹菜   | Cd          | Hongchingsiji、Jinnanshiqin1、Shuanggangsusheng、Sghuangnen、Hongchenghuangnen、Sgkangbing、Shuanggangxiqin、Sijiventuola(America) | 张堃,2011 <sup>[24]</sup>    |
| 油麦菜  | Cd          | Sijilv、Sijigaochan、Sijijianyedatou、Youlianggaochan、naichou518、kangrel7  | 张堃,2011 <sup>[24]</sup>    |
| 大白菜  | Cd          | 金丰100(D3)、乐园翠峰(D4)  | 黄志亮,2012 <sup>[44]</sup>   |
| 甘蓝   | Cd          | 精品春丰(G3)、绿秀(G4)   | 黄志亮,2012 <sup>[44]</sup>   |
| 玉米   | Cd          | 红单6号、红育1号、云优78、平单2号、屏单2号  | 杜彩艳,等,2017 <sup>[45]</sup> |
|      | Zn          | 雅玉98  |                            |
| 油菜   | Cd          | L338  | 吴志超,2015 <sup>[46]</sup>   |
| 小麦   | Pb          | 花培8号和周麦20   | 杨素勤,等,2014 <sup>[47]</sup> |

## 5 作物重金属低积累特性的稳定性

筛选作物可食用部分的重金属含量低于国家粮食卫生标准,且这种低积累性状可重复出现,对于不同的土壤环境有较好的适应性,是科学界急待解决的问题。徐燕玲等<sup>[48]</sup>试验表明,依据水稻类型来筛选低镉积累品种是不可取的,水稻品种间Cd积累量存在显著差异性和一定的稳定性,可以作为重金属低积累型水稻筛选的方法,水分管理对于水稻吸收和累积Cd含量的效应要远远大于基因型效应。大量研究报道了水稻类别间存在籽粒对镉累积的差异,然而筛选结果因环境因素不同多有差异甚至矛盾,因此种植低镉水稻品种的同时结合限制镉累积的管理措施的应用将更能有效地降低Cd进入食物链。除Cu元素之外,As、Hg、Zn、Cr、Pb5种重金属元素品种和环境交互作用对玉米籽粒重金属含量有主导作用<sup>[49]</sup>。AMMI模型为研究品种×地点交互效应和评价低积累重金属品种的稳定性和环境

适应性提供了一个较好的分析方法, AMMI 模型双标图能直观地反映 5 个玉米品种籽粒富集重金属能力的大小和稳定顺序,这对评价、培育、推广作物品种具有指导意义<sup>[50]</sup>。

## 6 降低作物重金属吸收能力的处理方法

如何降低作物中重金属的含量,国内外学者进行了广泛的研究。来源于各种材料的生物炭可以降低土壤中重金属的有效性,降低重金属进入食物链的能力。作物秸秆对在 Cd 和 Pb 人为污染的土壤中的玉米和黑麦草重金属的固定和连续摄取有一定影响,即在水稻秸秆处理中土壤有效 Cd 显著降低,在小麦秸秆中 Pb 含量显著降低。玉米地上部的 Cd 浓度在生物炭、水稻秸秆、小麦秸秆分别降低了 50.9%、69.5%、66.9%。地上部 Pb 的浓度和积累尽在水稻秸秆的处理中降低。作物秸秆的直接应用是固定土壤中重金属的一种可行方式,长期效果是确定的<sup>[51]</sup>。T1-17、生物炭、T17+生物炭显著降低了蔬菜可食部分 Cd 和 Pb 的含量,以及总 Cd 和 Pb 的含量<sup>[52]</sup>。张楠<sup>[53]</sup>以 30 个水稻品种为材料,采用在镉、铅污染地区大田试验和盆栽试验相结合的研究方法,筛选了重金属镉、铅低积累型的水稻品种,并探索了海泡石、腐殖酸的阻控效应,结果发现,海泡石、腐殖酸的加入降低了水稻品种秀水 134、嘉 33 根、茎、叶、精米中的镉、铅含量。刘维涛等<sup>[54]</sup>选用高低积累品种大白菜,运用盆栽试验探讨了单一改良剂和不同改良剂组合在重金属镉、铅污染土壤上的效果,结果发现,施用改良剂可显著降低大白菜中 Cd 和 Pb 的含量。董如茵等<sup>[55]</sup>选择了镉低积累油菜品种和普通品种,运用盆栽试验,研究了土施和喷施硫酸锌对油菜生长和镉吸收的影响,结果发现,土壤喷施 Zn 肥抑制根部 Cd 吸收,显著降低 Cd 低积累油菜的地上部的 Cd 含量,是调控 Cd 低积累油菜安全生产的较好措施。苏光麒等<sup>[56]</sup>选择了集中已有报道且有效的镉污染钝化修复技术,在水稻大田栽培条件下开展了试验验证,结果发现,在土壤镉含量中、重度污染地区,用调理剂和石灰处理,稻米镉含量下降 20%~60%,2 种处理方式效果相当。WAN 等<sup>[57]</sup>研究了硒酸盐、亚硒酸盐、硒蛋氨酸对水稻幼苗吸收镉和转移镉方面的作用效果以及镉转移至水稻根中并依赖于浓度的动力学过程,结果发现,在刚刚暴露在 Cd 的环境中时,Se 能够增加水稻幼苗中 Cd 的积累,随着 Cd 暴露时间的延长,Se + Cd, pre-Se 的处理能够降低水稻对 Cd 的吸收和 Cd 从根部到地上部的转移。王蜜安等<sup>[58]</sup>以镉低积累型水稻品种湘晚籼 12 号为试验材料,比较了以 VIP 技术(V, Variety, 选用低镉型水稻品种;I, Irrigation, 优化水分管理;P, 土壤 pH 值, 施用石灰以提高土壤 pH 值)为主的 5 种控制技术在各试验点的总效应中,以“VIP +Se”“VIP +Se +Bi”处理效果最为明显,与对照相比降镉效果显著。

## 7 结语

我国人口多耕地少,很多农作物种植在受到重金属污染的土壤上,给人类健康带来潜在威胁,因此筛选重金属低积累作物品种变得更加迫切。由于作物的重金属高低积累型受环境影响而产生不同的研究结果,故研究者应在以下几个方面进行进一步探索:

- (1)在重金属污染地区应尽量扩大根部囤积型和规避型植物的栽种面积;
- (2)重金属高低积累型作物的筛选方法的简化与改进;
- (3)重金属高低积累作物特性的稳定性研究;
- (4)寻找能够降低或者抑制重金属迁移到植株体内的物质,通过在植物根际土壤中施入重金属吸附剂等,阻隔植物对重金属的吸收,钝化铅离子;
- (5)加深不同种植模式下的重金属在土壤-作物-人类系统的迁移规律、毒害效应以及生理生化机制,建立完善的重金属污染评价和控制系统;
- (6)通过微生物施肥对重金属的包裹附着;
- (7)利用离子拮抗理论,通过土壤施入或叶面喷施离子拮抗剂。

## 参考文献 (References)

- [1] LI Z, MA Z, VAN DER KUIJP T J, et al. A review of soil heavy metal pollution from mines in China: pollution and health

- risk assessment[J]. *Sci Total Environ*, 2014: 468–469, 843–853.
- [2] WILLIAMS P N, LEI M, SUN G X, et al. Occurrence and partitioning of cadmium, arsenic and lead in mine impacted paddy rice: hunan, china[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43 (3) :637.
- [3] ZHUANG P, MCBRIDE M B, XIA H, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan mine, South China[J]. *Sci Total Environ*, 2009, 407(5): 1551–1561.
- [4] ZHANG X, ZHONG T, LIU L, et al. Impact of soil heavy metal pollution on food safety in china[J]. *PLoS One*, 2015, 10 (8): e0135182.
- [5] 宋伟,陈百明,刘琳. 中国耕地土壤重金属污染概况[J]. *水土保持研究*, 2013, 20(2): 293–298.
- [6] KHAN A, KHAN S, KHAN M A, et al. The uptake and bioaccumulation of heavy metals by food plants, their effects on plants nutrients, and associated health risk: a review[J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2015, 22(18): 13772–13799.
- [7] 黄永杰,刘登义,王友保,等. 八种水生植物对重金属富集能力的比较研究[J]. *生态学杂志*, 2006, 25(5): 541–545.
- [8] 颜昌宙,曾阿妍. 沉水植物对重金属Cu<sup>2+</sup>的生物吸附及其生理反应[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2):366–370.
- [9] 徐勤松,施国新. 镉及镉、锌共同作用对水芹菜部分生理特性的影响[J]. *南京师大学报(自然科学版)*, 2000, 23 (4): 97–100.
- [10] 肖光辉,卢红玲,彭新德. 土壤镉污染对农作物的危害研究进展[J]. *湖南农业科学*, 2015(9): 83–86.
- [11] WANG Q, CHEN L, HE L Y, et al. Increased biomass and reduced heavy metal accumulation of edible tissues of vegetable crops in the presence of plant growth-promoting *Neorhizobium huautlense* T1-17 and biochar[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 228: 9–18.
- [12] 崔晓艳,郭维君,陈学军. 酒顶铅锌矿废弃地优势植物的重金属富集特征[J]. *金属矿山*, 2010(4): 180–182.
- [13] 郭晓方,卫泽斌,丘锦荣,等. 玉米对重金属累积与转运的品种间差异[J]. *生态与农村环境学报*, 2010, 26(4): 367–371.
- [14] BELIMOV A A, SAFRONOVA V I, TSYGANOV V E, et al. Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L.)[J]. *Euphytica*, 2003, 131 (1): 25–35.
- [15] 张磊,杨惟薇,张超兰,等. 不同水稻类型对镉的耐性、累积性与转运性质研究[J]. *西南农业学报*, 2013, 26(6): 2185–2188.
- [16] LI Y, WANG H, WANG H, et al. Heavy metal pollution in vegetables grown in the vicinity of a multi-metal mining area in Gejiu, China: total concentrations, speciation analysis, and health risk [J]. *Environ Sci Pollut Res Int*, 2014, 21(21): 12569–12582.
- [17] BOGDANOVIC T, UJEVIC I, SEDAK M, et al. As, Cd, Hg and Pb in four edible shellfish species from breeding and harvesting areas along the eastern Adriatic Coast, Croatia[J]. *Food Chem*, 2014, 146(1): 197–203.
- [18] CHIEN L C, HUNG T C, CHOANG K Y, et al. Daily intake of TBT, Cu, Zn, Cd and As for fishermen in Taiwan[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 285 (1): 177–185.
- [19] MIHAJLO J, SLAVKA S. Human exposure to trace metals and possible public health risks via consumption of mussels *Mytilus galloprovincialis* from the Adriatic coastal area[J]. *Food Chem Toxicol*, 2014, 70(6): 241–251.
- [20] WANG X, SATO T, XING B, et al. Health risks of heavy metals to the general public in Tianjin, China via consumption of vegetables and fish[J]. *Sci Total Environ*, 2005, 350(1/2/3): 28–37.
- [21] CHEN Y, HUANG B, HU W, et al. Assessing the risks of trace elements in environmental materials under selected greenhouse vegetable production systems of China[J]. *Sci Total Environ*, 2014, 470–471(2): 1140–1150.
- [22] 尚爱安,刘玉荣,梁重山,等. 土壤中重金属的生物有效性研究进展[J]. *土壤*, 2000, 32(6): 294–300.
- [23] 李正文,张艳玲,潘根兴,等. 不同水稻品种籽粒Cd、Cu和Se的含量差异及其人类膳食摄取风险[J]. *环境科学*, 2003, 24(3): 112–115.
- [24] 张堃. 两种叶菜镉、铅低积累品种筛选及其快速鉴别方法研究[D]. 广州:中山大学, 2011.
- [25] KUMAR V, CHOPRA A K. Accumulation and translocation of metals in soil and different parts of French bean (*Phaseolus vulgaris* L.) amended with sewage sludge[J]. *Bull Environ Contam Toxicol*, 2014, 92(1): 103–108.
- [26] BEZEL' V S, ZHUIKOVA T V, POZOLOTINA V N. The structure of dandelion cenopopulations and specific features of heavy metal accumulation[J]. *Russian Journal of Ecology*, 1998, 29(5): 331–337.
- [27] SUGIYAMA M, AE N, ARAO T. Role of roots in differences in seed cadmium concentration among soybean cultivars—proof by grafting experiment[J]. *Plant and Soil*, 2007, 295(1/2): 1–11.
- [28] ISHIKAWA S, AE N, SUGIYAMA M, et al. Genotypic variation in shoot cadmium concentration in rice and soybean in soils with different levels of cadmium contamination[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2005, 51(1): 101–108.

- [29] 雷梅,岳庆玲,陈同斌,等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报, 2005, 25(5): 1146-1151.
- [30] 刘俊. 镉胁迫下大豆生长发育的生理生态动态特征研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2010.
- [31] 黄运湘,廖柏寒,王志坤,等. 不同大豆品种镉毒害效应及耐镉差异性[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(5): 519-524.
- [32] 赵云云,钟彩霞,方小龙,等. 华南地区11个春播大豆品种抗镉性的差异[J]. 华南农业大学学报, 2014, 35(3): 111-113.
- [33] 赵云云,钟彩霞,方小龙,等. 华南地区夏播大豆品种镉耐性及籽粒镉积累的差异[J]. 大豆科学, 2013, 32(3): 336-340.
- [34] ARAO T, AE N, SUGIYAMA M, et al. Genotypic differences in cadmium uptake and distribution in soybeans [J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2): 247-253.
- [35] 国务院. 国务院关于印发土壤污染防治行动计划的通知[EB/OL]. (2016-5-31). [http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content\\_5078377.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2016-05/31/content_5078377.htm).
- [36] 朱芳,方炜,杨中艺. 番茄吸收和积累Cd能力的品种间差异[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4071-4081.
- [37] 刘维涛,周启星,孙约兵,等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1): 63-67.
- [38] 于力. 豇豆(*Vigna unguiculata* L.)铝毒害及耐性机理[D]. 南京:南京农业大学, 2012.
- [39] 王林友,竺朝娜,王建军,等. 水稻镉、砷低含量基因型的筛选[J]. 浙江农业学报, 2012, 24(1): 133-138.
- [40] ARCHAMBAULT D J, MARENTES E, BUCKLEY W, et al. A rapid, seedling-based bioassay for identifying low cadmium-accumulating individuals of Durum wheat (*Triticum turgidum* L.) [J]. *Euphytica*, 2001, 117(2): 175-182.
- [41] 张永志,郑纪慈,徐明飞,等. 重金属低积累蔬菜品种筛选的探讨[J]. 浙江农业科学, 2009(5): 872-875.
- [42] 代成成. 镉低积累小白菜品种的筛选[D]. 武汉:华中农业大学, 2010.
- [43] 邱丘. 菜心Cd积累的品种间差异及Cd污染控制方法研究[D]. 广州:中山大学, 2011.
- [44] 黄志亮. 镉低积累蔬菜品种筛选及其镉积累与生理生化特性研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2012.
- [45] 杜彩艳,张乃明,雷宝坤,等. 不同玉米(*Zeamays*)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.
- [46] 吴志超. 高低镉积累油菜品种筛选及其生化机制研究[D]. 武汉:华中农业大学, 2015.
- [47] 杨素勤,程海宽,张彪,等. 不同品种小麦Pb积累差异性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2014, 30(5): 646-651.
- [48] 徐燕玲,陈能场,徐胜光,等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究:品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1346-1352.
- [49] 程旺大,张国平,姚海根,等. 晚粳稻籽粒中As、Cd、Cr、Ni、Pb等重金属含量的基因型与环境效应及其稳定性[J]. 作物学报, 2006, 32(4): 573-579.
- [50] 伍钧,吴传星,孟晓霞,等. 重金属低积累玉米品种的稳定性和环境适应性分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2160-2167.
- [51] XU P, SUN C X, YE X Z, et al. The effect of biochar and crop straws on heavy metal bioavailability and plant accumulation in a Cd and Pb polluted soil [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2016, 132: 94-100.
- [52] WANG Q, CHEN L, HE L Y, et al. Increased biomass and reduced heavy metal accumulation of edible tissues of vegetable crops in the presence of plant growth-promoting *Neorhizobium huautlense* T1-17 and biochar [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 228: 9-17.
- [53] 张楠. 低积累型水稻品种的筛选及其配套阻控技术初探[D]. 杭州:浙江大学, 2015.
- [54] 刘维涛,周启星. 不同土壤改良剂及其组合对降低大白菜镉和铅含量的作用[J]. 环境科学学报, 2010, 30(9): 1846-1853.
- [55] 董如茵,徐应明,王林,等. 土施和喷施锌肥对镉低积累油菜吸收镉的影响[J]. 环境科学学报, 2015, 35(8): 2589-2596.
- [56] 苏光麒,尹勇,李昆,等. 大田条件下不同土壤钝化措施对稻米镉吸收的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(4): 837-841.
- [57] WAN Y N, YU Y, WANG Q, et al. Cadmium uptake dynamics and translocation in rice seedling: influence of different forms of selenium [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2016, 133: 127-134.
- [58] 王蜜安,尹丽辉,彭建祥,等. 综合降镉(VIP)技术对降低糙米镉含量的影响研究[J]. 中国稻米, 2016, 22(1): 43-47.