



文章栏目：重金属污染土壤修复新技术与新思路专题

DOI 10.12030/j.cjee.202211051 中图分类号 X53 文献标识码 A

曹越, 赵逸涵, 张祥, 等. 砷污染农田的植物提取修复技术研究进展[J]. 环境工程学报, 2022, 16(12): 4037-4048. [CAO Yue, ZHAO Yihan, ZHANG Xiang, et al. Research progress on phytoextraction technology of arsenic contaminated soil in farmland[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2022, 16(12): 4037-4048.]

砷污染农田的植物提取修复技术研究进展

曹越^{1,2}, 赵逸涵¹, 张祥¹, 张文^{1,2,3}, 孙丹^{1,2,3}, 冯华原^{1,2,3}, 汤叶涛^{1,2}, 仇荣亮^{1,2,3,✉}

1. 中山大学环境科学与工程学院, 广东省环境污染控制与修复重点实验室, 广州 510006; 2. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室, 广州 510642; 3. 华南农业大学资源环境学院, 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 广州 510642

摘要 由于粗放的矿物采冶方式, 矿区大量的砷扩散到周边农田中, 会导致农田土壤砷污染问题。部分地区的砷背景值高, 部分地区在农业生产活动中使用含砷化肥、农药等, 均会加剧农田砷污染问题。植物提取修复是一种利用超富集植物将土壤污染物吸收并转移到植物地上部, 待植物成熟收割以整体移除污染物的方法。与其他砷污染农田土壤的修复技术相比, 植物提取修复技术具有无二次污染的特点。该技术辅以合理的农艺措施, 可使土壤砷污染减量, 并实现边生产边修复的目标, 应用潜力广泛。分析了砷污染土壤植物提取修复技术的原理与现状; 重点探讨了近年来强化砷植物提取修复的方法, 包括修复植物的种质创新、超富集植物与根际微生物联合作用和农艺措施优化等几个方面; 最后展望了农田土壤砷污染修复技术的未来研究方向, 以期为该技术的进一步发展提供参考。

关键词 砷污染土壤; 超富集植物; 蜈蚣草; 根际微生物; 间套作

砷 (Arsenic, As) 及其无机化合物对人体有严重危害, 是国际卫生组织公布的 I 级致癌物^[1]。在含砷矿产资源的开采与冶炼过程中, 砷会扩散至周边农田, 引起严重的农田土壤污染^[2-3]。此外, 在农业生产中, 长期投入含砷农药、化肥和饲料添加剂, 亦会加剧农田土壤砷污染^[4-6]。我国土壤砷环境背景值高, 平均质量分数为 $11.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 接近全球平均值 ($6.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 2 倍^[7]。以上表明, 我国农田土壤砷污染状况不容乐观。我国表层农业土壤中砷的质量分数中位数为 $10.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与其他国家相比处于较高水平^[8]。砷进入农田中会引起土壤退化, 并影响农业的可持续发展。砷通过作物、蔬菜的种植进入食物链进而威胁人体健康。水稻是我国重要的粮食作物, 具有较强的砷吸收转运能力, 因此, 稻田砷污染也成为稻米砷暴露的主要途径^[9]。另有调查显示, 我国菜地砷超标情况严重, 9.2% 的统计样本砷含量超标, 中部地区菜地土壤砷的超标率高达 24.8%^[10]。因此, 我国农田土壤的砷污染问题亟需解决。

我国农田土壤砷污染面积大, 以中低污染程度为主。相比物理、化学等修复方法, 以植物提取修复为核心的联合修复技术既是一种对土壤扰动小的绿色友好修复技术^[11-12], 又能真正实现土壤

收稿日期: 2022-11-09; 录用日期: 2022-12-23

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2020YFC1807600); 国家自然科学基金面上项目 (42077107); 广州市科技计划一般项目 (基础与应用基础研究项目) (202102021082)

第一作者: 曹越 (1988—), 男, 博士, 副教授, caoy85@mail.sysu.edu.cn; ✉通信作者: 仇荣亮 (1967—), 男, 博士, 教授, cesql@mail.sysu.edu.cn

污染的减量。植物提取修复技术依赖于能超量积累目标污染物的超富集植物。砷超富集植物蜈蚣草 (*Pteris vittata* L.) 的发现, 使砷污染土壤的植物提取修复成为可能^[13-14]。蜈蚣草是一种凤尾蕨属的蕨类植物, 地上部砷浓度可达 $22.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (鲜重), 远远高于常见的普通植物 ($<10.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 鲜重), 地上部和地下部含砷比例可达到 24, 是一种非常理想的砷污染土壤的植物提取修复材料。同时, 蜈蚣草自然分布广、环境适应性强, 自其发现至今已在海内外多地进行了成功应用^[15-18]。然而, 超富集植物生长较慢、种植技术成本较高等特点限制了其大规模应用。目前, 我国农田砷及其他重金属的污染防控, 主要采用低积累品种作物结合钝化剂投入的安全利用策略。然而, 若仅使用安全利用策略, 一方面无法实现土壤中砷污染的减量, 另一方面钝化剂的长期投入还可能带来新的土壤污染问题。植物砷提取修复技术进一步降本增效, 并优化与安全利用技术的联合修复模式, 有望通过“边生产、边修复”的方式实现农田中砷污染减量。

基于我国大面积砷污染农田的修复需求, 已有研究者以蜈蚣草为代表的砷超富集植物为研究对象, 在解析其的砷富集机理, 进一步探索了提高砷污染土壤植物修复效果的技术。强化提取修复技术的研究主要有以下几个方面: 1) 提取修复植物材料的种植创新, 包括砷超高富集生态型的筛选和近期砷超富集工程植物的创制; 2) 提取修复的微生物强化, 包括根际砷活化、修复植物促生菌剂的开发和超富集植物根际微生物集群特征与功能的解析; 3) 提取修复的农艺措施优化, 包括土壤砷活化剂、植物激素的使用和超富集植物与作物组合种植模式的构建。本文分析了砷污染土壤植物提取修复技术的原理与现状, 综述了近 5 年来强化砷植物提取修复的方法, 包括修复植物的种质创新、超富集植物与根际微生物联合作用和农艺措施优化等几个方面的技术发展与原理研究, 并对农田土壤砷污染修复技术的未来研究方向提出了展望, 以期为该技术的进一步发展提供参考。

1 砷提取修复植物的种质创新

植物提取修复砷污染的核心是砷超富集植物。自蜈蚣草这种超富集植物被发现之后, 研究者一直在寻找砷富集能力更强的超富集植物。之后陆续发现的多种砷超富集植物也大都属于凤尾蕨属, 如井栏边草、斜羽凤尾蕨、琉球凤尾蕨、紫轴凤尾蕨、粉叶蕨等。但这些超富集植物的单株砷富集能力和提取修复的实践效果与蜈蚣草均有明显差距^[19-22]。在我国南方, 蜈蚣草被广泛种植, 不同地区的蜈蚣草种群 (populations) 显示出不同砷富集特征。因此, 砷超富集植物的种质挖掘由寻找新的超富集植物转为在蜈蚣草种内筛选出具有更高砷富集能力的蜈蚣草生态型 (ecotype)。另一方面, 随着分子生物学技术的迅猛发展, 砷超富集植物中的许多关键基因被挖掘, 研究者也尝试通过基因工程手段, 创制砷植物修复工程植物。

1.1 砷超富集植物生态型 (ecotype / population) 的筛选

植物种群 (population) 即在一定空间中同种个体的集合。来自不同地域的同种植物群体, 会朝着各自所适应环境条件的方向发展进化, 并在不同地域的群体间将变异遗传给后代, 从而形成同一个物种分化为不同的群体类型, 即生态型 (ecotype)。严格来说, 定义一种新生态型, 需要经过形态学特征或基因序列的鉴定。目前, 各项研究中所提到的蜈蚣草生态型, 实为不同地域的蜈蚣草种群。这些采集自不同地区的蜈蚣草确实显示出形态特征和砷富集能力的显著差异, 具备被进一步确定为生态型甚至亚种的条件。

蜈蚣草原产于中国南方, 在全球的分布范围很广, 在各大洲的热带地区及欧洲的地中海地区均有分布。为避免修复应用过程中的物种入侵风险, 我国研究者对蜈蚣草生态型的筛选限于本国范围内的不同蜈蚣草种群。利用野外采集记录和植物标本数据库, 使用最大熵模型 (Maximum Entropy, MAXENT) 分析蜈蚣草生长区的温度、降水、海拔等环境因素, 发现我国南方大部分地区

均适宜蜈蚣草生长。而我国广泛分布的蜈蚣草种群,可为不同的砷修复场景提供备选材料^[23]。早期关于蜈蚣草生态型的比较,研究者或直接在野外采集不同区域的蜈蚣草,或进行小规模室内盆栽实验,对不同生态型蜈蚣草的砷吸取能力及富集系数进行测定并比较^[24-26]。然而,这些研究存在生态型种类少、修复实践规模小等问题,未能较好地促进提取修复实践。

近年来,关于蜈蚣草生态型的筛选,不再简单地比较生态型蜈蚣草的砷富集差异,而是在实际修复中比较不同的蜈蚣草生态型,即包括单一使用超富集植物的植物提取修复,也包括超富集植物与经济作物的组合种植模式。为阐明不同生态型蜈蚣草砷富集差异的机制,研究者比较了蜈蚣草根系对五价砷 As(V) 和三价砷 As(III) 的吸收动力学参数,发现具有高砷富集特征的蜈蚣草生态型根系对 As(V) 和 As(III) 的最大吸收速率显著高于其他。这说明根系细胞膜上负责砷吸收的转运蛋白的数量差异,可能是决定蜈蚣草生态型砷富集差异的重要因素^[27-28]。WAN 等^[29]将 4 种不同蜈蚣草生态型与桑树进行间作,对华北地区的砷污染农田土壤进行修复实践。结果发现,4 种不同蜈蚣草生态型与桑树间作,间作效率(促进作物生长和降低间作桑树中砷浓度的能力)也存在差异。其中,来自广西的生态型相比来自湖南石门的蜈蚣草对砷的吸收移除效果更强,与其间作的桑树中砷积累更少、生长更佳。原因是采自广西的蜈蚣草生态型在该间作体系中根系生长显著优于其他生态型,其发达的根系覆盖了更加广泛的间作土壤,能吸取更多砷,也降低了桑树根系对砷的吸收,改善了桑树生长。

目前,关于不同蜈蚣草生态型对砷富集差异的比较,所用的生态型种类仍非常有限。蜈蚣草在我国南方分布广泛,可建立更大范围蜈蚣草种群统一培养条件下的筛选比较。除了比较砷富集能力,应进一步考虑建立大范围蜈蚣草生态型的基因库,挖掘植物砷富集的分子标记,为选培更高效砷修复植物提供基因信息。

1.2 利用基因工程创制砷提取修复植物材料

除筛选具有更高积累能力的修复植物物种及生态型外,挖掘超富集植物的基因资源,利用植物基因工程的方法,构建用于砷污染土壤提取修复的基因工程植物也是一种重要策略。将超富集植物的分子机制“复制”到其他高生物量及高经济价值植物中,还有望解决蜈蚣草等砷超富集植物生物量小、种植成本高等问题。近几年来,在砷超富集植物蜈蚣草的分子生物学机制的研究中已取得了丰富成果。研究者解析了多个蜈蚣草砷富集途径中的关键基因功能,并利用这些基因尝试创制了一些砷富集能力强化的工程植物。

蜈蚣草能吸收大量砷并转运到其地上部分,依赖于其所特有的砷高效吸收转运途径。无机砷在土壤-植物体系中运移的主要形式为砷酸盐 [As(V)] 和亚砷酸盐 [As(III)]。研究表明,磷转运蛋白 Pht1 (Phosphate transporter 1) 和亚砷酸盐逆转运蛋白 ACR3 家族分别介导了蜈蚣草将 As(V) 和 As(III) 向地上部的转运过程^[30-37]。其中,蜈蚣草中的多个磷转运蛋白,具有比普通植物磷转运蛋白更强的砷酸盐转运能力。而 *PvPht1;3* 主要在植物根中柱细胞中表达,可能是蜈蚣草 As(V) 向地上部转运的关键^[30]。在模式植物烟草中异源表达 *PvPht1;3* 基因,转基因株系对 As(V) 的吸收速率增加了 40.1%~84.5%, 伤流液中 As(V) 质量分数增加了 47.5%~106.8%, 地上部砷质量分数是野生型的 2.0~3.0 倍。该结果说明, *PvPht1;3* 等具有高效 As(V) 转运能力的基因可作为提高植物砷富集能力的功能基因元件。另一方面,蜈蚣草体内 As(III) 的转运、代谢也是其超富集的重要生理基础。普通植物体内的 As(III) 会被植物螯合素 (PCs) 螯合之后区隔到液泡,而蜈蚣草中并没有检测到 PC。这说明蜈蚣草中的 As(III) 更多以离子态的形式移动。蜈蚣草体内的 As(III) 通过亚砷酸盐逆向转运蛋白家族 ACR3 进行组织间和细胞器间运输。ACR3 转运蛋白家族基因在显化植物中丢失,仅存在于低等植物和蕨类植物中。目前,已在蜈蚣草中发现 4 个 ACR3 家族成员基因,分别定位于质膜和液泡膜上^[34-35, 37]。质膜上的 *PvACR3*、*PvACR3;2* 负责蜈蚣草根 As(III) 木质部装载和砷向地上部的转

运,液泡膜上的 *PvACR3;1*、*PvACR3;3* 参与蜈蚣草羽叶中 As(III) 的区隔化解毒^[34-35,37]。其中,在质膜上定位的 ACR3 成员 *PvACR3*、*PvACR3;2* 被认为是蜈蚣草能将大量砷富集到地上部的关键因素之一。在拟南芥、烟草中分别表达 *PvACR3*、*PvACR3;2* 可使转基因株系地上部的砷积累增强约 7.5 倍和 2.6 倍^[34,37]。以 2 种不同模式植物为背景材料创制的 ACR3 超表达工程植物均显著提高了地上部砷积累的效果。这说明 ACR3 是开发砷提取修复工程植物的重要分子元件。在此基础上,WANG 等^[38] 在拟南芥砷酸还原酶 *hac1* 突变体中异源表达 *PvACR3*。这一工程植物地上部的 As 积累量近 $40.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与野生型拟南芥地上部砷含量相比,提高了约 30 倍,即进一步增强了单一表达 ACR3 的地上部富集效果。HAC 是普通植物根系中砷还原的关键酶。在水稻和拟南芥中,HAC 基因在 As(V) 胁迫条件下在根系特异表达,负责帮助植株在根系将 As(V) 还原为 As(III),并进行进一步的区隔解毒。值得注意的是,蜈蚣草根系的 *HAC1* 同源基因在根系表达量相对于地上部很低,As(V) 在根系的还原过程缓慢,蜈蚣草根系砷还原缓慢而转运高效,这与 WANG 等^[38] 构建的拟南芥工程材料(*hac1* 突变体表达 *PvACR3*) 的效果类似,这说明 HAC 功能缺失与 *PvACR3* 的存在可能是蜈蚣草超富集砷的核心通路之一^[39]。

现阶段通过基因工程手段创制的修复工程植物与蜈蚣草的砷富集量仍有较大差距,其可能原因是已被利用的几个目标基因,都在砷由地下向地上转运的过程中发挥作用。工程植物的设计尚缺乏对砷吸收、代谢等环节的考虑,研究者需进一步对砷高效吸收、区隔解毒等方面的分子元件进行进一步机理研究和应用尝试。未来,厘清蜈蚣草超富集砷的分子调控网络,“复制”到易于栽培、高经济效益的植物中,创制更为高效、经济的砷超富集工程植物,是超富集植物种质创新的重要目标和发展趋势。

2 砷植物提取修复的微生物强化

植物根际是重金属生物地球化学循环的热点区域。根际微生物与植物根际的重金属行为联系紧密,在植物修复的过程中扮演着重要角色。同时,植物根际微生物的基因组被称为植物的“第二基因组”,植物与根际微生物在多方面的互作机制成为研究热点^[40]。近年来,研究者主要集中于两方面的研究:研发能促进砷提取修复的微生物菌剂;深入挖掘砷超富集植物根际的关键功能微生物,解析其在砷富集过程中的作用。

2.1 利用促生功能微生物或砷抗性菌提高修复效果

植物促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)、菌根真菌(Mycorrhizal Fungi)等有益根际微生物能帮助植物抵御病害、提高逆境适应能力、增强养分获取,添加这些有益微生物被视为一种提高植物修复效率的有效途径。应用于砷污染土壤修复的促生菌,需具备较好的砷耐受性,故从实际砷污染场地中筛选的功能菌具有较好的应用效果。如 SINGH 等^[41] 将筛选自砷污染土壤水稻根际的 3 株芽孢杆菌(*Bacillus altitudinis* Strain SS8、*Bacillus megaterium* Strain SS9、*Lysinibacillus* sp. Strain SS11)接种于超富集植物蜈蚣草根际,不仅改善了蜈蚣草的生长,并且提高了蜈蚣草对砷的吸收,相比对照组,接种菌剂的蜈蚣草地上部的砷积累增加了约 59.0%。促生菌在植物修复、抗病、抗逆境等多方面已有较好应用,在砷污染产地修复的实践中,菌种对砷的耐受性是应重点考虑的因素。

此外,丛枝菌根真菌(Arbuscular Mycorrhizal Fungi, AMF)对植物的促生作用也被人们熟知。在自然土壤环境中,大多数植物的根系并非单纯的根系组织,而是以根系与菌根共生的菌根形式存在^[42]。菌根能通过根外菌丝极大地扩展植物根系在土壤中的吸收空间,增强根系对土壤中养分的获取,对植物有显著促生作用^[43]。研究者已通过盆栽实验发现,接种 AMF 后的砷超富集植物能显著促进地上部砷的富集增强提取修复的效率^[44-46]。2020 年,意大利的土壤修复团队在砷污染较

高的场地进行了为期两年的 AMF-蜈蚣草联合修复的田间实验。结果发现, 接种 AMF 将蜈蚣草叶片中砷的积累量从 $496.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增至 $753.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 蜈蚣草与 AMF 的联合修复有效降低了 0~20cm 深度的表层土壤砷污染^[47]。以上结果表明, 使用植物促生功能微生物对土壤砷污染的植物提取修复具有明显促进作用。

在植物根际环境中, 土壤微生物不仅以三价 [As(III)] 氧化、细胞质五价砷 [As(V)] 还原、呼吸性 [As(V)] 还原和砷甲基化作用等方式直接改变土壤中砷的形态, 还通过驱动铁、硫的生物化学循环, 影响砷在土壤-植物体系中的迁移转化^[48-50]。利用功能微生物促进土壤中的砷转化为易于被植物吸收富集的形态, 也是促进提取修复的一种有效策略^[51]。研究者从砷超富集植物井栏边草 (*Pteris multifida*) 根际分离得到的假单胞菌 m318, 该假单胞菌含有亚硝酸盐氧化酶基因 *aioA*。将接种该菌接种到蜈蚣草根际, 根际亚硝酸盐氧化酶基因 *aioA*-like 的丰度显著升高, 很可能促进了蜈蚣草对砷的吸收和转运。在蜈蚣草砷提取修复的长期田间实验中添加该菌, 与未接种该菌的对照组相比, 蜈蚣草单株砷积累量显著增加^[52]。相比接种单菌, 多种微生物组成的合成菌落对砷提取修复显示出更好的促进效果。LAMPIS 等^[53] 从高砷污染工业区土壤中筛选分离出多种本地抗砷细菌, 将其中的 5 种抗砷菌混合接种于蜈蚣草根际, 包括可合成 IAA 的芽孢杆菌 MPV12 和假黄单胞菌 P4V6、能将砷酸盐还原为亚砷酸盐的假单胞菌 P1III2、P2III5 和芽孢杆菌 MPV12; 同时这 5 种细菌都能够产生铁载体。接种混合菌的蜈蚣草, 羽叶中的砷平均质量分数可达 $4\,700.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与未接种的对照相比增加了 5 倍, 生物量增加了 45.0%, 砷的去除效率从 13.0% 提高至 35.0%, 显著提高了砷的提取修复效果。

2.2 对蜈蚣草根际微生物的研究

长期以来, 研究者一直关注砷超富集植物根际微生物对其吸收积累砷的作用, 并希望筛选出具有促进植物砷富集的功能微生物。由于蜈蚣草的砷超富集能力最强, 同时研究基础最为丰富, 砷超富集植物根际微生物研究多以蜈蚣草为研究对象。蜈蚣草根际会富集抗砷基因的微生物, 根际抗砷基因的积累有助于活化根际土壤中的砷^[54-55]。近年来, 随着测序技术的发展, 特别是利用宏基因组测序, 对蜈蚣草根际微生物的群落构成与基因功能研究也取得诸多进展。

蜈蚣草根际具有丰富的砷抗性菌和砷代谢基因。与大多数植物一样, 蜈蚣草根际微生物群落的细菌和真菌多样性从土壤到根际呈现梯度下降, 根际微生物种群的聚集主要归因于其集群模式。与普通植物相比, 蜈蚣草根系和根际中聚集了更为丰富的参与砷代谢循环的微生物。其中, 宝石单胞菌属 (*Gemmatimonas*)、溶杆菌属 (*Lysobacter*) 和硝化螺旋菌属 (*Nitrospira*) 广泛存在于砷污染环境中, 对高浓度砷具有耐受性; 丰祐菌属 (*Opitutus*) 和青霉属 (*Penicillium*) 的砷酸盐还原菌在砷污染土壤、活性污泥和沿海沉积物中广泛存在^[33]。蜈蚣草根际的这些砷高耐受微生物可能帮助蜈蚣草更好地应对根系和根际的高砷胁迫。此外, 研究者进一步通过宏基因组测序分析还发现, 砷还原基因 *arsC* 为蜈蚣草根际最主要的砷代谢基因, 且该基因的序列主要来自于属水平的鞘氨醇单胞菌 (*Sphingomonas*)。值得注意的是, 蜈蚣草根际的假单胞菌 (*Pseudomonas*) 相较于周围土壤更为丰富, 该菌中含有砷氧化基因 *aoxAB*, 该基因负责 [As(V)] 氧化, 同时参与了硝酸盐还原和二氧化碳固定, [As(V)] 是蜈蚣草根系吸收的主要形态, 研究者推测该假单胞菌介导的砷氧化促进了蜈蚣草根系的砷吸收过程^[56]。

蜈蚣草根际的砷代谢过程与碳、氮等养分循环耦合。DAS 等^[57] 将蜈蚣草在额外加砷和不额外加砷的砷污染场地土 (As 质量分数为 $12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上进行盆栽实验, 发现蜈蚣草中砷的富集提高了根际砷转化菌、铁和硫还原菌以及氮和碳固定菌的的基因丰度, 但降低了蜈蚣草根际微生物的整体丰度。如绿弯菌纲 (*Chloroflexi*) 在营养限制条件下具有巨大固碳潜力, 其在富砷条件下的增加表明富砷条件下生长的蜈蚣草根际固碳能力更强。此外, 变形菌门 (*Proteobacteria*) 在富砷条件下的

相对丰度增加表明,在添加砷的土壤中生长的蜈蚣草根际碳可用性更高,且表现出快速增长。砷浓度和根际的联合选择压力刺激了微生物群落,微生物群落很可能在铁和硫的还原溶解、砷和磷的活化、碳的降解和固定及氮固定中发挥作用。还有研究者设置了不同砷污染程度的土壤实验,发现在砷含量较高且寡营养的土壤中,蜈蚣草根际微生物介导的砷氧化通常与硝酸盐还原和根室碳固定耦合^[56]。以上研究结果表明,蜈蚣草根际微生物参与的养分循环,特别在寡营养条件下,增强了蜈蚣草对砷的耐受性、促进了蜈蚣草生长并增强了砷吸收,在实际场地应用中形成“养分吸收利用-砷富集去除”的良性循环。

以上研究均表明,蜈蚣草根际可能聚集了有助于砷利用及含有抗砷基因的微生物,但将分析获得的关键菌进行分离培养及功能的研究仍较少。另一方面,在蜈蚣草根际发现的关键菌群与其他植物根际的比较研究亦较少,这些关键菌群是否受到蜈蚣草特异性根际的聚集并不清楚,仍有待进一步的研究。此外,尽管在植物-微生物联合修复方面,已有一些功能菌(益生功能微生物、菌根真菌)被筛选并培养,且这些益生功能微生物在增强植物养分吸收利用、促进生长、提升宿主耐性等方面的功能,已获得了可靠性验证,但植物-微生物联合修复技术受外部条件(如土壤温度、酸碱度、湿度、养分、重金属活性、土著微生物、宿主植物的基因型等)影响较大,因此,不少功能微生物辅助砷提取修复的尝试仍停留在室内实验阶段,而尚未进一步应用于大规模的植物提取修复中。

3 提升植物对砷污染土壤修复效果的农艺措施

同农作物的栽培一样,除了超富集植物砷吸收能力的个体差异外,合理的农艺措施是保障修复植物良好生长的关键。同时,辅以适当的农艺措施能进一步提升修复植物对砷的提取能力,强化土壤中砷的移除效果。合理的水肥管理、间套作方式、刈割处理等措施,均能有效提高修复功能。近年来,相关研究主要集中在使用新型活化剂活化根际砷、施加植物激素提高植物砷吸取能力,以及优化修复植物与作物的组合种植模式。

3.1 活化剂的添加

添加活化剂会影响土壤中砷的赋存形态并提高砷的生物可利用性,提高砷超富集植物砷的提取效率^[58],是砷污染土壤修复常用的强化措施之一。活化剂包括表面活性剂和螯合剂。在表面活性剂中,人工合成的表面活性剂会增强土壤粒子的流动性,加剧水土流失和环境污染,故其应用越来越少。在螯合剂方面,多羧基氨基酸乙二胺四乙酸(Ethylene Diamine Tetraacetic Acid, EDTA)因其对重金属较强的螯合能力,曾被广泛研究与应用^[59-61],但其具有一定生物毒性且在土壤中难以被生物降解,会引起土壤和地下水的二次污染^[62]。近年来,在使用活化剂进行砷植物提取增效的尝试中,一些新型环境友好型的多羧基氨基酸螯合剂和天然小分子有机酸(Natural low molecular weight organic acids, NLMWOAs)得到应用。

向东芳等^[63]在低砷土壤的植物提取修复过程中配合施用柠檬酸与活化剂三聚磷酸钠,提高了土壤中有效态砷含量、土壤脱氢酶、脲酶活性,并增强了蜈蚣草体内谷胱甘肽(GSH)、叶绿素含量,在土壤-修复植物双方面的增强作用下,使蜈蚣草地上部生物量提高21.8%,砷提取总量提高了40.4%。与施加柠檬酸效果类似,施加适量的草酸(OA)也可显著提高土壤脲酶活性,增加蜈蚣草地上部生物量和砷累积量^[64]。

近年来,研究者还开发了一些由微生物合成的环境友好型氨基酸类螯合剂,包括二乙基三乙酸(NTA)、乙二胺二琥珀酸(EDDS)、谷氨酸二乙酸(GLDA)等,其生物毒性低、生物降解快、降解产物危害小^[65-68]。施加乙二胺二琥珀酸(EDDS)则可显著增强土壤微生物多样性,促进土壤养分循环、有机质转换、提高微生物活性,从而增强砷的修复效果^[69]。但是,新型活化剂对不同土

壤类型、污染程度的使用方式仍缺乏系统的研究；同时，这些新型可生物降解型螯合剂如乙二胺二琥珀酸 (EDDS) 需要由多种微生物合成，如能进一步优化合成途径、降低生产成本，则可实现更广泛的应用。

3.2 植物激素的使用

植物激素对植物生长和重金属的代谢调控均具有重要作用。在砷高污环境中，蜈蚣草羽叶中内源反式玉米素含量显著升高，但在非砷超积累植物中内源反式玉米素含量显著降低^[70]；在高浓度砷胁迫下，大叶井口边草叶片吲哚乙酸 (IAA) 含量显著增加，IAA 氧化酶 (IAAO) 活性显著下降^[71]。这些结果说明，在高砷胁迫条件下，高浓度的植物激素对于砷超富集植物维持正常生长发挥重要作用。据此提出应用植物生长调节剂或植物激素强化砷植物提取修复，相关研究表明，使用激动素 (KT) 可增加凤尾蕨类植物叶片 SOD 等抗氧化酶的活性，还可在一定程度上维持并重组砷超富集植物叶绿体的超微结构，从而显著提高砷向植物地上部的转运和积累量^[72-73]。丛超等^[74]在田间实验中，将 IAA 和 KT 配合使用，显著促进了蜈蚣草和镉超富集植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 的生长；二者的株高、生物量均可增加 50% 以上；蜈蚣草对砷的转移系数、富集系数，以及龙葵对镉的转移系数、富集系数均有所提高；种植 3 个月，喷施 2 次激素，蜈蚣草对砷的提取效率可达 6.1%，比未使用激素的对照组提高 74.6%。

植物激素的使用能促进砷超富集植物的生长、强化抗氧化活性，通过植物砷吸取能力的提升增强修复效果。然而，植物激素是植物调节各种生理生化活动的重要信号物质，每种激素都参与多方面的调控途径。如何使用特定激素“专一”地增强植物砷修复效果，避免引起其他“副作用”，还应进一步厘清增强砷吸收富集的调控机理。此外，植物激素及其类似物的作用具有明显的剂量效应，还需开展大量研究来确定外源施加植物激素的最佳浓度、施用频率、持续时间、喷施方式等条件，且联合使用多种植物激素时，还应考量不同植物激素同时使用的交互作用效果。

3.3 间套作模式

砷超富集植物提取修复轻中度砷污染的土壤时，若单一种植砷超富集植物会中断农业生产，占用农田资源。将超富集植物与农作物或经济作物进行合适间套作，可实现边生产边修复。因此，近年来关于组合种植模式下植物提取修复效果的研究越来越多^[75-78]。目前，与蜈蚣草间作的作物主要包括桑树、构树、柑橘、甘蔗、苧麻和玉米等，不同的间作模式对植物修复效率的强化及产生的经济效益存在差异^[79]。如蜈蚣草与桑树和构树间作，会使植物体内光合色素含量显著提高、抗氧化酶活性提高，氧化损伤减少，抗性增强，蜈蚣草的生物量得到显著增加，对砷吸收可分别显著增加 80.0% 和 64.2%，且蜈蚣草对镉和锌的提取量也有所提高，但桑树和构树体内砷、镉、铅和锌含量则不会增加^[80]。笔者团队在广东省某县中轻度砷污染农田修复中，利用蜈蚣草与低吸收作物砂糖桔间套作，在修复的同时收获符合食品污染物限量标准的农产品。采用“蜈蚣草-砂糖桔间套作”模式修复 3 年后，土壤砷质量分数从 $48.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $16.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，从蜈蚣草的提取量来看，3~6 年可使轻度砷污染 ($<80.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 土壤达标。这些研究表明，由于蜈蚣草等砷超富集植物大都是低矮蕨类植物，与木本植物组会种植易于形成生态位互补，提高生产-修复的效率。在生态位互补的间作体系中，修复植物与作物地上部分能更加高效地利用光能、空间，提高整体的光合作用效率；二者的根系和根际产生互惠效应，优化微生物群落，提高土壤酶活性及植物抗氧化酶活性等作用，有效地促进修复植物的生长及对砷的吸收富集，同时减少作物对重金属的吸收^[75, 79-83]。相比之下，砷超富集植物与草本植物的间、套作效果一般。砷超富集植物与农作物的间、套作过程中，不仅应考虑植物间的相互关系，合理的栽培模式、土壤调理剂、有机肥、微生物菌剂的添加都是重要的组成部分。表 1 为国内外砷污染土壤修复实践中已形成的适用于不同场景的联合修复模式。表 1 中的修复模式大多针对范围有限的砷污染场地。我国具有大面积的中低

表 1 实际场地修复项目中主要运用的修复模式及案例
Table 1 Restoration modes and cases mainly used in actual site restoration projects

修复模式	修复技术	适用场地	案例项目	背景As质量分数/ (mg·kg ⁻¹)	修复效果
砷超富集植物+低吸收作物间套种	植物提取	中轻度As污染农田 (<80 mg·kg ⁻¹)	广东佛冈县As污染农田修复项目, 蜈蚣草与低吸收作物(砂糖桔/黄皮)间套种联合修复	48.7	套种3年, 土壤As浓度降低了约67%, 间套作的农产品重金属含量的合格率>95%
砷超富集植物+低吸收作物间套种+活化剂/土壤改良剂	植物提取	中度至重度As污染农田	湖南石门县砷污染农田土壤修复工程, 蜈蚣草—活化剂强化修复, 蜈蚣草柑橘间作修复	84.2~296.2	修复中度至重度污染农田土壤1000多亩, 土壤中砷平均去除率达到10%以上, 间作的农产品符合国家标准 ^[15, 17]
砷超富集植物+微生物	植物提取	重度As污染土壤	意大利冶金As高污染场地的植物-微生物联合修复	170	AMF接种的蜈蚣草的砷转移系数高出对照30%, 种植第四年可将土壤中的砷质量分数从170 mg·kg ⁻¹ 减至49 mg·kg ⁻¹ 以达到该国标准 ^[50]
砷超富集植物+耐砷植物+添加基质/客土	植物提取、植物稳定	高As污染尾矿	湖南石门县雄黄尾矿库植被复绿工程	2 883	客土施肥, 种植蜈蚣草或芒草, 5年后尾矿坝上建立了稳定的植被覆盖系统, 生长了39种植物 ^[84]
耐砷植物+添加基质/客土	植物稳定	旱区高As污染强酸性尾矿	美国亚利桑那州IKMHSS硫铁矿尾矿堆肥辅助植物稳定化修复	4 000	堆肥改良, 种植6种本地耐性植物3年后, 植被覆盖率最高可达61%, 大部分植物地上部重金属累积量不超过家畜毒性限值 ^[85]

污染农田, 应兼顾低积累作物、砷超富集植物的种质创新与精准的间、套、轮作体系的系统性构建探索, 从而实现长效化地安全利用植物进行土壤修复。

4 展望

1) 如何通过种质创新进一步提高砷超富集植物的植物修复效率。自二十一世纪初蜈蚣草被发现以来, 研究者一直在寻找更优的砷超富集物种, 以期从自然种群中获得砷修复效率更高的砷超富集植物或生态型。近年来, 砷超富集植物的分子机理领域已取得了许多进展, 如何利用其关键基因创制砷提取修复工程植物成为新的方向。之前, 缺乏孢子体(植株)的再生转化体系成为阻碍对蜈蚣草进行转基因强化的技术瓶颈。在近期研究中, 研究者成功地获得了稳定遗传的转基因蜈蚣草植株^[86], 为构建增强型砷超富集植物奠定了重要基础。然而, 仅依赖于某几个基因的组合尚难以获得理想效果, 需要研究者继续深入解析砷超富集的分子网络。同时, 应加深对根际微生物与修复植物间的互作研究, 并且关注砷在土壤-根际-植物间的运移、代谢过程, 以及在砷驱动下, 植物-微生物体系中砷的运移、代谢与根际碳、氮循环的耦合关系, 为在砷土壤修复过程中同时实现土壤增碳目标提供理论依据。

2) 如何解决含砷生物质的资源化问题。在植物提取修复土壤砷污染技术的应用实践中, 涉重生物质的无害化处置是砷超富集植物修复技术产业化、规模化应用的关键。常见的处理技术有焚烧法、堆肥法、压缩填埋法、灰化法等传统处置技术, 均以蜈蚣草中高浓度的砷为无害化、生物质组分减量化为目标进行处理处置, 但存在高成本、占用土地资源及存在二次污染风险等问题。

收获后如何进行资源化是利用超富集植物进行提取修复的共性问题。以高应用价值为目标,镍、钴等贵金属“采矿植物”资源化技术受到产业和学界关注。新兴的涉重生物物质处理技术,如植物冶金、热液改质法、超临界水技术、湿法浸提技术等^[87-89]多围绕这些高值金属展开。

事实上,虽然砷是一种让人避之不及的剧毒物,但也因其在高科技领域重要用途,被美国化学会列为百年之内具有严重短缺风险的元素。高纯度的砷是一种新型高端半导体材料,利用高纯砷制备的砷化镓、砷化碲、砷化铟等砷的化合物广泛应用于微电子、光电子等领域。其中,砷化镓(GaAs)被誉为继硅之后的第二代半导体材料,其抗干扰、低噪声、耐高压、耐高温与高频使用等特性,使其特别适用于无线通信中的高频传输领域,是推动互联网和通讯技术高速发展的重要材料。能否将经过超富集植物生物富集的砷变为具有高附加值产品的原料,可能是砷富集植物资源化领域的新方向。

参 考 文 献

- [1] HUMANS I W G O T E O C R T. Some drinking-water disinfectants and contaminants, including arsenic[J]. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans, 2004, 84: 1-477.
- [2] 李莲芳,曾希柏,白玲玉,等.石门雄黄矿周边地区土壤砷分布及农产品健康风险评估[J].应用生态学报,2010,21(11): 2946-51.
- [3] 刘许生.石门雄黄:一座矿山的传奇与悲伤[J].国土资源导刊,2014,11(11): 86-90.
- [4] LIU C, YU H Y, LIU C, et al. Arsenic availability in rice from a mining area: Is amorphous iron oxide-bound arsenic a source or sink?[J]. Environmental Pollution, 2015, 199: 95-101.
- [5] ZHOU Y, NIU L, LIU K, et al. Arsenic in agricultural soils across China: Distribution pattern, accumulation trend, influencing factors, and risk assessment[J]. Science of the Total Environment, 2018, 616: 156-163.
- [6] 张靖佳,单世平.我国砷污染现状及生物修复技术的应用与展望[J].农业网络信息,2016(11): 64-67.
- [7] 魏复盛,陈静生,吴燕玉,等.中国土壤环境背景值研究[J].环境科学,1991(04): 12-19.
- [8] GONG Y, QU Y, YANG S, et al. Status of arsenic accumulation in agricultural soils across China (1985-2016)[J]. Environmental Research, 2020: 186.
- [9] CHEN C, YANG B, GAO A, et al. Transformation of arsenic species by diverse endophytic bacteria of rice roots[J]. Environmental pollution (Barking, Essex:1987), 2022: 119825.
- [10] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣.中国蔬菜土壤重金属含量及来源分析[J].中国农业科学,2007(11): 2507-2517.
- [11] 纪冬丽,孟凡生,薛浩,等.国内外土壤砷污染及其修复技术现状与展望[J].环境工程技术学报,2016,6(1): 90-99.
- [12] 谢运河,纪雄辉,吴家梅,等.镉砷污染土壤“三高”富集植物筛选与修复成本分析[J].环境科学与技术,2020,43(S1): 116-121.
- [13] MA L Q, KOMAR K M, TU C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic (vol 409, pg 579, 2001)[J]. Nature, 2001, 411(6836): 438-U3.
- [14] 陈同斌,韦朝阳,黄泽春,等.砷超富集植物蜈蚣草及其对砷的富集特征[J].科学通报,2002(3): 207-210.
- [15] 陈同斌,杨军,雷梅,等.湖南石门砷污染农田土壤修复工程[J].世界环境,2016(4): 57-58.
- [16] 刘维明,黄增,邓超冰,等.大环江流域重金属污染土壤的3种修复技术研究[J].江西农业学报,2016,28(10): 94-97.
- [17] 马志强.石门砷污染农田修复项目经验介绍[J].中国环保产业,2020(6): 18-21.
- [18] KERTULIS-TARTAR G M, MA L Q, TU C, et al. Phytoremediation of an arsenic-contaminated site using *Pteris vittata* L.: A two-year study[J]. International Journal of Phytoremediation, 2006, 8(4): 311-322.
- [19] WANG H B, YE Z H, SHU W S, et al. Arsenic uptake and accumulation in fern species growing at arsenic-contaminated sites of southern China: Field surveys[J]. International Journal of Phytoremediation, 2006, 8(1): 1-11.
- [20] WANG H B, WONG M H, LAN C Y, et al. Uptake and accumulation of arsenic by 11 *Pteris* taxa from southern China[J]. Environmental Pollution, 2007, 145(1): 225-233.
- [21] SRIVASTAVA M, MA L Q, SANTOS J A G. Three new arsenic hyperaccumulating ferns[J]. Science of the Total Environment, 2006, 364(1-3): 24-31.
- [22] 宋书巧,周永章,周兴,等.土壤砷污染特点与植物修复探讨[J].热带地理,2004(1): 6-9.
- [23] XU W, DU Q, YAN S, et al. Geographical distribution of As-hyperaccumulator *Pteris vittata* in China: Environmental factors and climate changes[J]. Science of the Total Environment, 2022: 803.
- [24] 许飞飞,马晓娜,罗万清,等.不同生态型蜈蚣草对砷富集的差异及其机理[J].科技导报,2017,35(3): 86-91.
- [25] WU F Y, LEUNG H M, WU S C, et al. Variation in arsenic, lead and zinc tolerance and accumulation in six populations of *Pteris vittata* L. from China[J]. Environmental Pollution, 2009, 157(8/9): 2394-404.

- [26] WAN X-M, LEI M, LIU Y-R, et al. A comparison of arsenic accumulation and tolerance among four populations of *Pteris vittata* from habitats with a gradient of arsenic concentration[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, 442: 143-151.
- [27] WU F, DENG D, WU S, et al. Arsenic tolerance, uptake, and accumulation by nonmetallicolous and metallicolous populations of *Pteris vittata* L[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2015, 22(12): 8911-8918.
- [28] 许飞飞. 不同生态型蜈蚣草砷吸收差异特征及其机理[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [29] WAN X, LEI M. Intercropping efficiency of four arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* populations as intercrops with *Morus alba*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(13): 12600-12611.
- [30] CAO Y, FENG H Y, SUN D, et al. Heterologous Expression of *Pteris vittata* Phosphate Transporter PvPht1;3 Enhances Arsenic Translocation to and Accumulation in Tobacco Shoots[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(18): 10636-44.
- [31] CAO Y, SUN D, CHEN J X, et al. Phosphate Transporter PvPht1;2 Enhances Phosphorus Accumulation and Plant Growth without Impacting Arsenic Uptake in Plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(7): 3975-3981.
- [32] FENG H Y, LI X Y, SUN D, et al. Expressing Phosphate Transporter PvPht2;1 Enhances P Transport to the Chloroplasts and Increases Arsenic Tolerance in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(4): 2276-84.
- [33] SUN D, FENG H, LI X, et al. Expression of New *Pteris vittata* Phosphate Transporter PvPht1;4 Reduces Arsenic Translocation from the Roots to Shoots in Tobacco Plants[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(2): 1045-53.
- [34] CHEN Y, XU W, SHEN H, et al. Engineering Arsenic Tolerance and Hyperaccumulation in Plants for Phytoremediation by a PvACR3 Transgenic Approach[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(16): 9355-62.
- [35] CHEN Y S, HUA C Y, JIA M R, et al. Heterologous Expression of *Pteris vittata* Arsenite Antiporter PvACR3;1 Reduces Arsenic Accumulation in Plant Shoots[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(18): 10387-95.
- [36] WEI S J, KOHDA Y H T, INOUE C, et al. Expression of PvPht1;3, PvACR2 and PvACR3 during arsenic processing in root of *Pteris vittata*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021: 182.
- [37] CHEN J-X, CAO Y, YAN X, et al. Novel PvACR3;2 and PvACR3;3 genes from arsenic-hyperaccumulator *Pteris vittata* and their roles in manipulating plant arsenic accumulation[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021: 415.
- [38] WANG C, NA G, BERMEJO E S, et al. Dissecting the components controlling root-to-shoot arsenic translocation in *Arabidopsis thaliana*[J]. *New Phytologist*, 2018, 217(1): 206-218.
- [39] LI X Y, SUN D, FENG H Y, et al. Efficient arsenate reduction in As-hyperaccumulator *Pteris vittata* are mediated by novel arsenate reductases PvHAC1 and PvHAC2[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020: 399.
- [40] 张瑞福. 根际微生物: 农业绿色发展中大有所为的植物第二基因组[J]. *生物技术通报*, 2020, 36(9): 1-2.
- [41] SINGH S, SHRIVASTAVA A, BARLA A, et al. Isolation of Arsenic-Resistant Bacteria from Bengal Delta Sediments and their Efficacy in Arsenic Removal from Soil in Association with *Pteris vittata*[J]. *Geomicrobiology Journal*, 2015, 32(8): 712-23.
- [42] 李珂, 石兆勇, 王发园. 丛枝菌根生理生态功能及其在生态恢复中的作用[J]. *土壤通报*, 2017, 48(4): 996-1002.
- [43] ZHU Y G, CAVAGNARO T R, SMITH S E, et al. Backseat driving? Accessing phosphate beyond the rhizosphere - depletion zone[J]. *Trends in Plant Science*, 2001, 6(5): 194-195.
- [44] LIU Y, ZHU Y G, CHEN B D, et al. Influence of the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* on uptake of arsenate by the As hyperaccumulator fern *Pteris vittata* L[J]. *Mycorrhiza*, 2005, 15(3): 187-192.
- [45] LEUNG H M, YE Z H, WONG M H. Interactions of mycorrhizal fungi with *Pteris vittata* (As hyperaccumulator) in As-contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 139(1): 1-8.
- [46] TROTTA A, FALASCHI P, CORNARA L, et al. Arbuscular mycorrhizae increase the arsenic translocation factor in the As hyperaccumulating fern *Pteris vittata* L[J]. *Chemosphere*, 2006, 65(1): 74-81.
- [47] CANTAMESSA S, MASSA N, GAMALERO E, et al. Phytoremediation of a Highly Arsenic Polluted Site, Using *Pteris vittata* L. and Arbuscular Mycorrhizal Fungi [J]. *Plants-Basel*, 2020, 9(9).
- [48] QIAO J-T, LI X-M, LI F-B. Roles of different active metal-reducing bacteria in arsenic release from arsenic-contaminated paddy soil amended with biochar[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2018, 344: 958-967.
- [49] REVESZ E, FORTIN D, PAKTUNC D. Reductive dissolution of arsenical ferrihydrite by bacteria[J]. *Applied Geochemistry*, 2016, 66: 129-139.
- [50] FAN L, ZHAO F, LIU J, et al. The As behavior of natural arsenical-containing colloidal ferric oxyhydroxide reacted with sulfate reducing bacteria[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 332: 183-191.
- [51] GOUDA S, KERRY R G, DAS G, et al. Revitalization of plant growth promoting rhizobacteria for sustainable development in agriculture[J]. *Microbiological Research*, 2018, 206: 131-140.
- [52] YANG C, HO Y-N, INOUE C, et al. Long-term effectiveness of microbe-assisted arsenic phytoremediation by *Pteris vittata* in field trials[J]. *Science of the Total Environment*, 2020: 740.
- [53] KUMAR S, CHOUDHARY A K, SUYAL D C, et al. Leveraging

- arsenic resistant plant growth-promoting rhizobacteria for arsenic abatement in crops[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022: 425.
- [54] CAI L, YU K, YANG Y, et al. Metagenomic exploration reveals high levels of microbial arsenic metabolism genes in activated sludge and coastal sediments[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2013, 97(21): 9579-9588.
- [55] CAO X D, MA L Q, SHIRALIPOUR A. Effects of compost and phosphate amendments on arsenic mobility in soils and arsenic uptake by the hyperaccumulator, *Pteris vittata* L[J]. *Environmental Pollution*, 2003, 126(2): 157-167.
- [56] XIAO E, CUI J, SUN W, et al. Root microbiome assembly of As-hyperaccumulator *Pteris vittata* and its efficacy in arsenic requisition[J]. *Environmental Microbiology*, 2021, 23(4): 1959-1971.
- [57] DAS S, CHOU M-L, JEAN J-S, et al. Arsenic-enrichment enhanced root exudates and altered rhizosphere microbial communities and activities in hyperaccumulator *Pteris vittata*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2017, 325: 279-287.
- [58] 卢陈彬, 刘祖文, 张军, 等. 化学诱导剂强化植物提取修复重金属污染土壤研究进展[J]. *应用化工*, 2018, 47(07): 1531-1535.
- [59] 杨树深, 杨军, 杨俊兴, 等. 土壤添加剂对蜈蚣草吸收转运铅、镉的影响[J]. *生态学杂志*, 2017, 36(6): 1650-1657.
- [60] 熊国焕, 潘义宏, 何艳明, 等. 螯合剂对大叶井口边草Pb、Cd、As吸收性影响研究[J]. *土壤*, 2012, 44(02): 282-289.
- [61] KALYVAS G, TSITSELIS G, GASPARATOS D, et al. Efficacy of EDTA and Olive Mill Wastewater to Enhance As, Pb, and Zn Phytoextraction by *Pteris vittata* L. from a Soil Heavily Polluted by Mining Activities [J]. *Sustainability*, 2018, 10(6).
- [62] LUO C, SHEN Z, LI X, et al. Enhanced phytoextraction of Pb and other metals from artificially contaminated soils through the combined application of EDTA and EDDS[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(10): 1773-1784.
- [63] 向冬芳, 廖水姣, 涂书新, 等. 三聚磷酸钠与柠檬酸复合强化蜈蚣草修复砷污染土壤[J]. *农业环境科学学报*, 2019, 38(8): 1973-1981.
- [64] LIANG Y, WANG X, GUO Z, et al. Chelator-assisted phytoextraction of arsenic, cadmium and lead by *Pteris vittata* L. and soil microbial community structure response[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(10): 1032-1040.
- [65] YANG L, WANG G, CHENG Z, et al. Influence of the application of chelant EDDS on soil enzymatic activity and microbial community structure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 262: 561-570.
- [66] WANG G, ZHANG S, XU X, et al. Heavy metal removal by GLDA washing: Optimization, redistribution, recycling, and changes in soil fertility[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569: 557-568.
- [67] 陈春乐, 杨婷, 邹县梅, 等. 可生物降解螯合剂亚氨基二琥珀酸和谷氨酸N, N-二乙酸对重金属污染土壤的淋洗修复及动力学特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(03): 394-401.
- [68] SAMPANPANISH P, NANTHAVONG K. Effect of EDTA and NTA on Arsenic Bioaccumulation and Translocation Using Phytoremediation by *Mimosa pudica* L. from Contaminated Soils[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2019, 102(1): 140-145.
- [69] 邱亚群, 李益华, 彭佩钦, 等. 螯合剂添加对蜈蚣草修复砷污染土壤效果的影响分析[J]. *环境工程*, 2021, 39(03): 204-209.
- [70] 胡拥军, 王海娟, 王宏镔, 等. 砷胁迫下不同砷富集能力植物内源生长素与抗氧化酶的关系[J]. *生态学报*, 2015, 35(10): 3214-3224.
- [71] LI Q, YANG X, WANG H, et al. Endogenous trans-zeatin content in plants with different metal-accumulating ability: a field survey[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(23): 23422-23435.
- [72] LI Q, WANG H, WANG H, et al. Effects of kinetin on plant growth and chloroplast ultrastructure of two *Pteris* species under arsenate stress[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, 158: 37-43.
- [73] WANG H, CUI S, WU D, et al. Effects of kinetin on arsenic speciation and antioxidative enzymes in fronds of the arsenic hyperaccumulator *Pteris cretica* var. *nervosa* and non-hyperaccumulator *Pteris ensiformis*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2021: 191.
- [74] 丛超, 杨宁柯, 王海娟, 等. 吡啶乙酸和激动素配合施用提高蜈蚣草和龙葵对砷、镉富集的田间试验[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(6): 1299-309.
- [75] MA J, LEI E, LEI M, et al. Remediation of Arsenic contaminated soil using malposed intercropping of *Pteris vittata* L. and maize[J]. *Chemosphere*, 2018, 194: 737-744.
- [76] 陈同斌, 李海翔, 雷梅, 等. 植物修复过程中蜈蚣草对土壤养分的吸收动态: 5年田间定位试验[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(02): 402-408.
- [77] YANG J, GUO Y, YAN Y, et al. Phytoaccumulation of As by *Pteris vittata* supplied with phosphorus fertilizers under different soil moisture regimes - A field case[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 138: 274-280.
- [78] YANG J, YAN Y, LU N, et al. The key nodes and main factors influencing accumulation of soil arsenic in *Pteris vittata* L. under field conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2022: 807.
- [79] BROOKER R W, BENNETT A E, CONG W F, et al. Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology[J]. *New Phytologist*, 2015, 206(1): 107-117.
- [80] ZENG P, GUO Z, XIAO X, et al. Phytoextraction potential of *Pteris vittata* L. co-planted with woody species for As, Cd, Pb and Zn in contaminated soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 594-603.
- [81] YAN Y, YANG J, WAN X, et al. Temporal and spatial differentiation characteristics of soil arsenic during the remediation process of *Pteris vittata* L. and *Citrus reticulata* Blanco intercropping[J]. *Science of the Total Environment*, 2022: 812.
- [82] 石圣杰, 莫良玉, 韦昌东, 等. 不同间种模式对作物富集重金属的效率及风险评估[J]. *中国土壤与肥料*, 2021(05): 223-231.
- [83] WAN T, DONG X, YU L, et al. Comparative study of three *Pteris vittata*-crop intercropping modes in arsenic accumulation and

- phytoremediation efficiency[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021: 24.
- [84] YAN-MING ZHU C-Y W, LIN-SHENG YANG. Rehabilitation of a tailing dam at Shimen County, Hunan Province: Effectiveness assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 178-183.
- [85] GIL-LOAIZA J, WHITE S A, ROOT R A, et al. Phytostabilization of mine tailings using compost-assisted direct planting: Translating greenhouse results to the field[J]. Science of the Total Environment, 2016, 565: 451-461.
- [86] YAN H, XU W, ZHANG T, et al. Characterization of a novel arsenite long-distance transporter from arsenic hyperaccumulator fern *Pteris vittata*[J]. New Phytologist, 2022, 233(6): 2488-2502.
- [87] CUI X, ZHANG J, WANG X, et al. A review on the thermal treatment of heavy metal hyperaccumulator: Fates of heavy metals and generation of products[J]. Journal of Hazardous Materials, 2021: 405.
- [88] JIANG S J, SUN J, TONG G, et al. Emerging disposal technologies of harmful phytoextraction biomass (HPB) containing heavy metals: A review[J]. Chemosphere, 2022: 290.
- [89] JIANG H, CHEN X, CHEN S, et al. Recovery of arsenic and practical utilization of aqueous phase in hydrothermal liquefaction of hyperaccumulator[J]. Chemical Engineering Journal, 2022: 439.
- (责任编辑: 靳炜)

Research progress on phytoextraction technology of arsenic contaminated soil in farmland

CAO Yue^{1,2}, ZHAO Yihan¹, ZHANG Xiang¹, ZHANG Wen^{1,2,3}, SUN Dan^{1,2,3}, FENG Huayuan^{1,2,3}, TANG Yetao^{1,2}, QIU Rongliang^{1,2,3,*}

1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 2. Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural & Rural Pollution Abatement and Environmental Safety, College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China

*Corresponding author, E-mail: eesqrl@mail.sysu.edu.cn

Abstract Arsenic mineral resources are rich in China. Due to the extensive mining patterns and backward techniques, large amount of arsenic in the mining area had been released to the surrounding farmland. Meanwhile, areas with high arsenic geological background values and the addition of arsenic-containing materials in agricultural activities led to severe and widely arsenic pollution in agricultural soils in China. Phytoextraction uses hyperaccumulator to remove contaminants from soils. Compared with other remediation technologies, phytoextraction can reduce soil arsenic pollution with no secondary pollution, which can also achieve simultaneous agricultural production and soil remediation through reasonable farming practices, showing great potential for wide application. In this review, the principle and techniques of phytoextraction in the remediation of arsenic-contaminated soils are summarized. The application of phytoremediation through the plant generational innovation, the combined remediation measures with rhizosphere microorganisms, and the improvement of agronomic measures are discussed. Moreover, this review makes a prospective for the future research on soil remediation of arsenic-contaminated farmland.

Keywords arsenic contaminated soil; hyperaccumulator; *Pteris vittata*; rhizosphere microbiome; intercropping