

间套轮作超积累植物技术模式修复Cd污染土壤的研究进展

杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 徐瑜, 刘杰, 陈喆

引用本文:

杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 等. 间套轮作超积累植物技术模式修复Cd污染土壤的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2122-2133.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0568>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

丝瓜与伴矿景天间作对土壤Cd形态及丝瓜Cd吸收的影响

王京文, 蔡梅, 郑洁敏, 李丹, 王贤波, 张奇春

农业环境科学学报. 2016, 35(12): 2292-2298 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-0825>

钝化剂处理对玉米与伴矿景天间作下植株生长及镉累积特征的影响

陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 李博, 李元

农业环境科学学报. 2019, 38(9): 2103-2110 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1446>

酸与Cd污染农田的植物修复及健康风险评价

赵雪梅, 谢华, 吴开庆, 余孟好, 杨瑞刚, 李相林

农业环境科学学报. 2015(4): 702-708 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.014>

镍污染土壤修复技术研究进展

王丙烁, 黄益宗, 王农, 李娟, 龙健

农业环境科学学报. 2018, 37(11): 2392-2402 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0862>

皇竹草对酸与Cd污染农田土壤的治理效果及安全应用分析

谢华, 赵雪梅, 谢洲, 吴开庆, 李相林, 杨瑞刚, 彭波, 余孟好, 何金华

农业环境科学学报. 2016, 35(3): 478-484 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.03.010>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

杨佳节, 游少鸿, 吴佳玲, 等. 间套轮作超积累植物技术模式修复 Cd 污染土壤的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2122–2133.

YANG Jia-jie, YOU Shao-hong, WU Jia-ling, et al. Research progress of intercropping, interplanting, and crop rotation models on remediation of cadmium contaminated soil by hyperaccumulators[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10): 2122–2133.



开放科学 OSID

间套轮作超积累植物技术模式修复 Cd 污染土壤的研究进展

杨佳节¹, 游少鸿^{1,2}, 吴佳玲¹, 徐瑜¹, 刘杰^{1,2}, 陈喆^{1,2*}

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 桂林理工大学, 环境污染控制理论与技术广西重点实验室, 广西桂林 541004)

摘要:我国农田土壤中 Cd 污染问题突出, 其修复技术一直备受关注。基于超积累植物的植物提取技术是根治我国 Cd 污染农田土壤的热门修复技术, 但单一的植物提取技术模式通常无法保障污染地区正常的农耕生产需求, 故当地农户对该技术的接受程度普遍较低。为解决单一超积累植物修复技术在工程应用推广中的实际问题, 提出“高效修复与安全生产”相结合的双赢策略, 总结了前人对植物修复技术、超积累植物的概念由来及研究范围, 综述了现阶段基于超积累植物的间、套、轮作修复模式的研究进展, 统计比对了各种植物组合耕作模式对 Cd 污染农田土壤的综合治理效果, 并对今后利用不同种植模式修复 Cd 污染农田土壤提出了研究展望。

关键词: Cd 污染土壤; 超积累植物; 间作; 套作; 轮作

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2020)10-2122-12 doi:10.11654/jaes.2020-0568

Research progress of intercropping, interplanting, and crop rotation models on remediation of cadmium contaminated soil by hyperaccumulators

YANG Jia-jie¹, YOU Shao-hong^{1,2}, WU Jia-ling¹, XU Yu¹, LIU Jie^{1,2}, CHEN Zhe^{1,2*}

(1. College of Environment Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guilin University of Technology, Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: The severity of heavy metal pollution in soil has increased the awareness of remediation methods. The technology of plant extraction is a focal point in the field of agriculture; however, a single plant extraction technology model is often unable to guarantee meeting the agricultural production demand of people in a polluted area. Therefore, the acceptance of this technology by local farmers is generally low. To solve the practical problems in the application and popularization of single hyperaccumulation phytoremediation technology in engineering, in this study, we present an effective strategy of “efficient phytoremediation and safe production.” Furthermore, we summarized the concept origin and research scope of previous phytoremediation technology and hyperaccumulator plants; summarized the research progress of intercropping, interplanting, and crop rotation phytoremediation model based on the hyperaccumulator plants; and

收稿日期: 2020-05-19 录用日期: 2020-07-21

作者简介: 杨佳节 (1995—), 女, 江苏泰兴人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境修复研究 Email: 18443913301@163.com

*通信作者: 陈喆 E-mail: ldchenzhe@qq.com

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0800700); 国家自然科学基金项目 (41807136); 广西自然科学基金项目 (2018GXNSFBA138039); 广西科技重大专项 (桂科 AA17204047); 桂林市科学研究与技术开发计划课题 (20190219-3)

Project supported: National Key R&D Program of China (2018YFD0800700); The National Natural Science Foundation of China (41807136); Guangxi Natural Science Foundation (2018GXNSFBA138039); Guangxi Science and Technology Major Project (GuiKeAA 17204047); Guilin Science and Technology Development Program (20190219-3)

performed a statistical comparison. The effects of various plant cultivation modes on the comprehensive treatment of cadmium polluted farmland soil are discussed, and the research prospect of using different cultivation modes to repair cadmium polluted farmland soil in the future is proposed.

Keywords: cadmium contaminated soil; hyperaccumulator; intercropping; relay intercropping; crop rotation

随着工业化和城镇化的快速发展,土壤重金属污染问题日趋严重^[1-3]。2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国耕地土壤重金属的总超标率为19.4%,其中Cd的点位超标率达7.0%,居我国土壤污染物之首^[4]。受Cd污染的耕地每年生产的Cd米(Cd含量 $\geq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的糙米)约 $5 \times 10^7 \text{ kg}^{[5]}$ 。同时,由于Cd易在食物链中富集传播,长期食用含Cd的粮食作物会给人体带来致癌、致畸、致突变等健康风险^[6]。因此,针对土壤Cd污染问题的植物修复技术研究一直备受关注,此技术包括植物提取、根际过滤、植物稳定和植物挥发4个部分^[7]。目前,植物提取是其中最具发展潜力的一项技术:主要通过种植超积累植物将土壤中的重金属高效吸收、转运和储存至植株地上部,再经过刈割方式收获地上部植株,焚烧后回收重金属,从而降低土壤中重金属的总量,达到根治土壤重金属污染的目的^[7]。该技术具有原位净化重金属的能力,因此在重金属污染土壤修复界备受青睐。然而,大面积种植无收益的超积累植物不仅降低当地农民农业生产的积极性,还可能引发其负面情绪,导致修复工程进展缓慢、效果不佳等问题^[8]。因此,如何利用超积累植物修复耕地,同时恢复正常农业生产活动是该技术在工程实践中应用的关键。探索并构建实现“高效修复与安全生产”的植物修复技术双赢模式至关重要。我国传统农艺增产种植模式间、套、轮作技术为此提供了有益启示,若将其合理地应用于Cd污染农田上,不仅能利用Cd超积累植物逐年削减土壤中Cd的含量,还可以通过间、套、轮作低积累农作物品种收获符合国家粮食安全生产标准的农产品,使当地农民重新受益,并接受该技术模式的推广,以期在无修复资金持续投入的情况下,此修复模式还能继续保持旺盛的生命力。

因此,本文围绕“高效修复与安全生产”相结合的双赢策略,介绍了学界对超积累植物的由来和定义,综述了目前基于超积累植物的间、套、轮作修复模式的研究进展,比对了现阶段各种植物组合耕作模式对Cd污染农田土壤的综合治理效果,并对今后利用不同种植模式修复Cd污染农田土壤提出了展望。

1 Hyperaccumulator的引入与拓展

自20世纪70年代以来,“Hyperaccumulator”一词已被使用过数百万次,其精确性和理解程度却不尽相同。“Hyperaccumulator”最早出现在Reeves的一篇关于*Sebertia acuminata*(现为*Pycnandra acuminata*)树中Ni超积累能力的论文标题中^[9-10]。直至1977年,Brooks等^[11]正式提出了关于“Hyperaccumulator”的概念,用其来定义干叶组织中含Ni浓度大于 $1\,000 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 的植物。此外,对Hyperaccumulator的中文翻译国内学界尚存在差异,较早的研究学者将其译为重金属超量积累植物或超积累植物,即能够超量吸收和积累重金属的植物。也有学者认为超富集植物的译法更贴切,其具备在地上部大量富集污染物的能力^[12-13]。关于“Hyperaccumulator”的两个不同译法在目前研究领域都是认可和通用的,作者通过中国知网限定关键词检索发现“超积累植物”的使用频率比“超富集植物”更高,故为统一文章表述,下文一致使用超积累植物。1983年,Chaney^[14]提出了利用超积累植物修复重金属污染土壤的思想,即植物修复。随后英国Sheffield大学Alan JM Baker博士(1983)介绍了植物修复概念,提出超积累植物能够去除土壤中重金属和吸收植物中重金属,对修复重金属污染工作具有实际应用性^[15]。

学术界对超积累植物的评判标准一直存在争议,但有两个基本条件是现阶段公认的^[15-17]:(1)地上部分(植物叶片)的重金属积累量是普通植物的100倍或以上,要高于一定的临界值,即Cd含量在 $100 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,Co、Cu、Ni、Pb含量在 $1\,000 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上,Mn、Zn含量在 $10\,000 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$ 以上(Baker和Brooks提出的参考值);(2)植物对重金属的转运系数(即植物地上部分与根部重金属含量比值,用来评价植物将重金属从地下部向地上部的运输和富集能力)大于1。关于第一点要强调的是,有学者提出超积累植物需要满足“在自然栖息地生长”的条件,即超积累植物要能在重金属原位污染土壤正常完成生活史,且生物量(植株大小、茎叶生长状况等特征)不能明显减少^[18]。比如,

(a)可能会在自然原位土壤中发现某些植物地上部金属含量 $>1\,000\,\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而其他植物中金属含量 $<1\,000\,\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,或者(b)仅在人工异位条件下,如通过金属盐,或者改良实验土壤或营养液,发现某些植物的金属含量很高。在(a)情况下,植物有资格成为超积累植物,但在(b)情况下则没有资格。其次,判定超积累植物的含量限值应统一关注植物叶片,同时,讨论超积累植物时,“积累”应该是植物叶片组织内通过根系的主动积累,而不应考虑通过空气传播沉积在植物叶片上的被动积累,前者更能判定其超积累性^[19-20]。

随着对植物积累其他重金属元素的不断发现和探索,超积累植物的概念和定义也得到了拓展。有研究者提出另外两个判断特征^[15, 21-22],即:(1)植物对重金属的生物富集系数(植物地上部与所处土壤中重金属含量的比值,用来反映植物对重金属的提取效率)大于1;(2)植物对重金属有较强的耐性,能够正常生长,不会出现生物学毒害现象。这一点也与国外学者所提出的超积累植物应满足在自然栖息地生长的条件相吻合。2005年,聂发辉^[23]在前两个系数之上又提出了新的超积累植物评价系数——生物富集量系数,即给定生长期单位面积地上部分植物吸收的重金属总量与土壤含量之比。此系数的提出扩大了传统超积累植物的定义,为筛选出能满足规模化工程应用的超积累植物提供了可能。

对于超积累植物的界定会随着探究的深入更加严格,但是阈值定义标准依然是判断的基础。而在实际过程中也不能将其视为绝对临界值。例如,持续积累 $900\,\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{Ni}$ 的植物仍表现出极强的生理行为,因

此应被视为该金属的过量积累^[24]。综合来看,以阈值标准为基础,综合其他特征,能更严格地帮助我们筛选出真正的超积累植物。

至今为止,全球发现的超积累植物721种(表1),来自52科,130属。其中代表性最强的超积累植物集中在十字花科(83种)和竹兰科(59种),研究最多的植物主要在芸苔属(*Brassica*)、庭芥属(*Alyssums*)及遏蓝菜属(*Thlaspi*)^[25]。随着进一步探索,这些数字可能会增加,同时在进一步校正后(例如在温室实验中,排除空气污染因素),一些暂时确定的超积累植物,特别是Cu、Co或Pb的超积累植物(考虑叶面样品被土壤或空中微粒污染)也可能会从已有列表中清除^[26]。

超积累植物物种已报道数量最多的国家是古巴,为128种。新喀里多尼亚65种,土耳其59种,巴西至少有30种。鉴于最近在马来西亚沙巴进行的开创性野外工作(24种Ni超积累植物物种),东南部亚洲也正在成为超积累植物多样性的全球中心^[36-41]。表2总结了每种元素的最重要的家族和属,以及超积累植物所在的主要区域。

2 Cd超积累植物原位提取效率

国内外关于Cd超积累植物新物种发现的报道较少,目前已经发现的Cd超积累植物只有十字花科的*Arabidopsis halleri*(鼠耳芥)和*Thlaspi caerulescens*(天蓝遏蓝菜),以及中国发现的景天科东南景天(*Sedum alfredii* H.)和伴矿景天(*Sedum plumbisincicola* XH)、堇菜科的宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)、茄科的龙葵(*Solanum nigrum* L.)以及商陆科的商陆

表1 全球发现的超积累植物种类
Table 1 Species of hyperaccumulators found globally

元素Element	阈值Threshold/($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	科Families	属Species	种类Species	全球记录Global records
镍(Ni)	$>1\,000$	52	130	532	<i>Berkheya coddii</i> (7.6%) ^[27]
铜(Cu)	>300	20	43	53	<i>Aeolanthus biformifolius</i> (1.4%) ^[28]
钴(Co)	>300	18	34	42	星香草(1%) ^[29]
锰(Mn)	$>10\,000$	16	24	42	<i>Virotia neurophylla</i> (5.5%) ^[11]
硒(Se)	>100	7	15	41	双沟黄芪(1.5%) ^[30]
锌(Zn)	$>3\,000$	9	12	20	<i>Noccaea caerulescens</i> (5.4%) ^[31]
铅(Pb)	$>1\,000$	6	8	8	<i>Noccaea rotundifolia</i> subsp. <i>cepaifolia</i> (0.8%) ^[15]
镉(Cd)	>100	6	7	7	遏蓝菜(0.36%) ^[32]
砷(As)	$>1\,000$	1	2	5	蜈蚣草(2.3%) ^[33]
稀土元素(镧La,铈Ce)	$>1\,000$	2	2	2	芒萁(0.7%) ^[34]
铊(Tl)	>100	1	2	2	李果芥(1.9%) ^[35]

注:全球记录是迄今为止报告的最高含量。
Note: The global record is the highest concentration element reported to date.

表2 超积累植物的重要家族、属及主要生长区域
Table 2 Important families, genera and regions of occurrence of hyperaccumulators

元素 Element	主要家族 Main family	主要种类 Main genera	地区 Regions
砷(As)	蕨科	蕨属、粉叶蕨属	中国、东南亚
镉(Cd)	十字花科、景天科	夜蛾属、景天属	欧洲、中国
铜(Cu)	花科、鸭跖草科、豆科、唇形科、母草科、锦葵科、蓼科	山黄菊属、鸭跖草属、蒿莽草属	刚果
钴(Co)	菊科、唇形科、母草科、列当科、叶下珠科	山黄菊属、算盘子属、叶下珠属、春蓼属	刚果、新喀里多尼亚
锰(Mn)	桃金娘科、芹菜科、角菌科	软桃木属、榄杞木属、银桦属	澳大利亚、新喀里多尼亚
镍(Ni)	菊科、十字花科、黄杨科、葫芦科、菊科、水杨科、紫堇科	庭芥属、黄杨属、菊属、算盘子属、天料木属、鼠鞭草属、白柑桐属	巴西、古巴、地中海、新喀里多尼亚
铅(Pb)	十字花科	夜蛾属	欧洲
稀土元素	茶科	芒莧属	中国
硒(Se)	豆科	黄芪属	美国
铊(Tl)	十字花科	双盾芥属	欧洲
锌(Zn)	十字花科、景天科	拟南芥属、景天属	欧洲、中国

注:稀土元素包括铈(Ce)、镨(Dy)、铒(Er)、铈(Eu)、钆(Gd)、铥(Ho)、镧(La)、铈(Lu)、钆(Nd)、镨(Pr)、钐(Sm)、铈(Sc)、铽(Tb)、铈(Tm)、镱(Yb)和钇(Y)。
Note: Rare earth elements include cerium (Ce), dysprosium (Dy), erbium (Er), europium (Eu), gadolinium (Gd), holmium (Ho), lanthanum (La), lutetium (Lu), neodymium (Nd), praseodymium (Pr), samarium (Sm), scandium (Sc), terbium (Tb), thulium (Tm), ytterbium (Yb) and yttrium (Y).

(*Phytolacca acinosa*) 7种^[42-43]。

此外,一些对Cd具有超积累作用的植物大多属于多金属积累植物,按照严格的定义标准划分,并不属于Cd的超积累植物。一般来说,Cd超积累植物在其自然条件下也必须非常耐Zn,研究表明Zn的毒性实际上限制了Cd的超积累。例如,来自中国的圆锥南芥可以积累的Zn、Pb和Cd的含量分别为20 800、2 300 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 和434 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ^[44]。因而当假定的Cd超积累植物生长在仅用Cd改良的土壤中时,应谨慎。这也再次强调在实验中使用原位污染土壤的重要性和必要性。

1989年,Baker在欧洲中西部发现了十字花科植物天蓝遏蓝菜,它是Cd的超积累植物,积累量高达213 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[45]。束文圣等^[46]通过野外调查和温室试验,发现宝山堇菜(*Viola baoshanensis*)可以积累Cd,在自然条件下,其地上部Cd平均含量为1 168 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。宝山堇菜生物量和遏蓝菜相似,都具有较小的特点,野外干质量可能只有3 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。魏树和等^[47]以杂草龙葵(*Solanum nigrum* L.)为研究对象,通过盆栽模拟实验和小区实验,在Cd投加浓度为25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 条件下,龙葵茎和叶中Cd的含量分别为103.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和124.6 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。商陆(*Phytolacca acinosa*)根系发达、枝繁叶茂,地上部生物量大。聂发辉^[48]调查发现,商陆地上部Cd最大浓度达482.25 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其能够在任一Cd浓度中生长。实验证明,商陆最佳生长周期为3个月,并且一年可收割两季。在200 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

Cd污染土壤中种植商陆,每年可收获Cd量为3.5 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。目前对商陆的研究多以盆栽和水培实验为主,对于治理多种重金属复合污染的实际效果研究较少^[49]。

被发现的Cd超积累修复植物很多尚处于起步阶段,表3主要汇总了现阶段7种Cd超积累植物修复Cd污染土壤的相关文献。目前应用于Cd污染田间修复的超积累植物主要在景天科,其他多为盆栽实验。超积累植物东南景天和伴矿景天都具有生物量大、适应性广和可多次收割等优点^[56],经估算,高浓度Cd污染土壤(土壤总Cd含量大于10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)的修复需要几十到几百年时间,中等程度污染土壤(土壤总Cd含量2~4 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)修复也需要10~20年时间。由于超积累植物普遍生物量小或地域性强,单独修复耗时长,导致工程中大规模推广植物提取技术成为一大难题。McGrath等^[57]曾估算,一种年生物量高达20 $\text{t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、Cd生物富集系数为10的植物,要降低50%土壤Cd含量,也要修复10年之久。Baker等^[58]通过田间实验研究Zn超积累植物(*T. caerulescens*)在Zn污染土壤(440 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)上的修复效果时发现,超积累植物每年从土壤中吸收Zn的总量是欧盟规定的年输入量的2倍,要将试验地重金属含量修复到临界标准(300 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)需13~14年。

鉴于我国人均耕地少的国情,继续寻找生物量大、生长迅速、富集重金属能力强的植物,通过强化等措施提高修复效率是植物修复技术走向实际应用的

表3 几种超积累植物修复Cd污染土壤提取效率的比较

Table 3 Comparison of extraction efficiency of phytoremediation of cadmium contaminated soil by several hyperaccumulators

植物 Plant	种属类别 Species category	方式 Mode	土壤总 Cd Total soil cadmium/ (mg·kg ⁻¹)	土壤 pH Soil pH	生物量 (DW) Biomass	预计修复年数 Estimated years of repair/a	提取效率 Extraction efficiency/%	参考文献 References
天蓝遏蓝菜	十字花科 蒴蕈属	盆栽实验	2.87	7.3	0.7 g·盆 ⁻¹	114	0.6	[50]
东南景天	景天科 景天属	大田实验	170.3	5.46	10.6 t·hm ⁻²	10	10.3	[51]
东南景天	景天科 景天属	盆栽实验	2.65	5.32	1.7 g·盆 ⁻¹	20	3.15	[52]
伴矿景天	景天科 景天属	大田实验	11.53	7.37	6.6 t·hm ⁻²	9.83	13.39	[53]
伴矿景天	景天科 景天属	大田实验	3.04	7.24	11.5 t·hm ⁻²	11	8.6	[54]
商陆	商陆科 商陆属	盆栽实验	5.72	5.68	0.5 t·hm ⁻²	51	0.65	[55]
龙葵	茄科茄属	盆栽实验	5.72	5.68	0.5 t·hm ⁻²	41	0.82	[55]

注:预计修复年数是按照植物提取的线性减少量估计,以降低到土壤总Cd含量为0.3 mg·kg⁻¹。

Note: The estimated number of years of restoration is estimated according to the linear reduction of plant extraction to reduce the total soil Cd content to 0.3 mg·kg⁻¹.

关键^[59]。间套轮作模式作为有效的农艺强化措施,在降低土壤中重金属的同时,收获符合标准的农产品,是一条实现边生产边修复目标的新途径。

植物种间相互作用及其影响因素是农作物间套轮作系统建立的基石。近年来,研究者利用不同植物和农作物进行合理搭配种植,探索不同物种之间的竞争关系及根际相互作用,充分实现了光、水及养分资源的高效利用,提高了作物的产量。在间套轮作系统中,交叉的根系环境不同于植物单作时的环境,超积累植物会降低土壤pH,从而增加土壤溶液中的DOC浓度,植物之间存在的养分竞争以及根系分泌物对土壤重金属有效性的影响等会使植物对重金属吸收造成影响^[60]。多种物种种植在一起能改变其共存的根际环境,改变土壤重金属的生物有效性,从而影响共存条件下植物对重金属的吸收。例如,印度芥菜与农作物油菜间作,在高浓度Cd处理下,印度芥菜和油菜的Cd含量均较单作显著提高^[61]。根系分泌物是氮素、活化P、K和微量元素的重要传递者。有研究报道,小麦与白羽扇豆间作时,白羽扇豆分泌的柠檬酸能活化难溶性Ca-P,使小麦的吸磷量比单作小麦增加了2倍^[62]。

3 间作模式在超积累植物修复Cd土壤污染中的应用

农业上,间作是指把几种作物在一块地上按照一定的行、株距和占地的宽窄比例,在同一时期进行种

植的方式。可以根据作物高矮、喜阳或喜阴、早熟或晚熟等特性进行选择搭配间作^[63]。常见的有林粮间作、薯类与豆类间作、粮豆间作等。

超积累植物与农作物间作时,在充分利用地力、空间和光能的基础上,可以有效提高植物对重金属的提取效率,促进植物或作物的生长。当前关于Cd超积累植物与不同作物间作模式下的土壤修复效果及作物安全生产情况见表4。李新博等^[64]研究表明,在Cd含量为5.37 mg·kg⁻¹的处理土壤上,将超积累植物印度芥菜与苜蓿间作,印度芥菜地上部Cd含量较单作提高了14.5%,且在间作条件下,苜蓿地上部Cd含量比单作时减少了57.1%,远低于饲料卫生限定标准。这样的间作方式具有投入低、效果好、易操作等优点,给土壤修复与农业生产同时进行提供了可能。根据蒋成爱等^[56]的研究发现,在与玉米和大豆间作处理中,超积累植物东南景天对Cd、Pb的吸收总量较单作分别提高了约59%和53%,其生物量也得到了增加,并显著降低了玉米对重金属Cd、Pb的吸收。间作复合群体充分利用不同层次的光源,吸收土壤中的养分和水分,对作物的生长发育和干物质积累产生了积极的作用^[65]。

在芹菜与超积累植物伴矿景天间作中,伴矿景天生长更旺盛,土壤Cd含量降低了50%,显著高于单作处理,芹菜中Cd含量(0.015 mg·kg⁻¹)也明显低于国家蔬菜限量标准(0.2 mg·kg⁻¹)^[66]。连续8年的田间试验研究表明^[67],伴矿景天和玉米间作,土壤中的Zn、Cd

表4 Cd超积累植物与作物间作修复效果与安全生产情况

Table 4 Cd hyperaccumulator and crop intercropping restoration effect and safe production situation

超积累植物 Hyperaccumulators	作物 Crop	种植模式 Planting mode	土壤总Cd Total cadmium of soil/(mg·kg ⁻¹)	土壤pH Soil pH	植物吸收量提高率* Increase rate of soil absorption/%	土壤Cd削减量提高率** Reduction rate of soil cadmium content/%	安全生产情况 Safety in production	参考文献 References
印度芥菜	苜蓿	间作	5.37	8.01	14.50 ↑	20 ↑	达标	[64]
东南景天	大豆	间作	1.624	4.13	68 ↑	13.4 ↑	达标	[56]
东南景天	玉米	间作	1.624	4.13	78 ↑	15 ↑	达标	[56]
伴矿景天	芹菜	间作	0.57	6.7	36.40 ↑	50 ↑	达标	[66]
伴矿景天	玉米	间作	7.25	5.87	25 ↑	36 ↑	达标	[67]
伴矿景天	小麦	间作	1.47	6.22	90 ↑	28 ↑	达标	[69]

注:* 间作条件下超积累植物较单作吸收重金属含量的提高率。 **间作条件下土壤中重金属Cd削减量较单作的提高率。
Note: * The increase rate of heavy metal content absorbed by hyperaccumulator under intercropping compared with monoculture. ** The increase rate of Cd concentration reduction in soil under intercropping compared with monoculture.

总浓度分别降低18.8%和85.4%,修复效率较单作显著提高,同时收获的玉米和高粱中Cd含量都在国家标准以下。因此,超积累植物在自身大量积累重金属的同时,和适当的农作物间作,可以在一定程度上有效提高其修复效率,保证农产品的安全输出,达到双赢的效果。

虽然超积累植物为大部分与之间作的农作物提供了“保护伞”,但是农产品的安全保证仍需得到重视。王京文等^[68]研究丝瓜与Cd超积累植物伴矿景天间作时发现,丝瓜果实中Cd含量虽未超过国标的限定值,但丝瓜对Cd的转移率达到了40.5%,说明两者间作存在增大其果实中Cd含量的风险,且一定程度上减少了丝瓜的结果数量。这可能是超积累植物与作物间作时超积累植物根系分泌物造成的酸性环境形成的。赵冰等^[69]研究发现,超积累植物伴矿景天与小麦间作,间作的小麦地上部重金属是单作的1.1~1.9倍。也有研究证明,伴矿景天与玉米间作,玉米地下部和地上部中Zn与Cd的含量比单作都有所提高。而在添加生物质炭后,玉米的生长状况明显好转,在5%的添加量下,玉米生物量达到最大^[70]。有研究指

出^[71],在间作条件下,超积累植物的根系分泌物可以扩散到与其间作植物的根际,从而提高土壤中重金属的有效性,促进其对重金属的吸收。

4 套作模式在超积累植物修复Cd土壤污染中的应用

套种一般指把几种作物在一块地上按照一定的行、株距和占地的宽窄比例,在不同时期进行种植的方式^[63]。我国常见的农业套种组合有:小麦/玉米、小麦/大豆、花生/玉米等,均可有效提高作物的总产量,研究者将此种效应称之为“竞争-补偿”机制^[72]。套种能够充分利用生长季节变一收为两收或变两收为三收,有效地延长用地时间,提高套种植物对土壤养分、阳光、水资源的利用^[73-74]。

2002年,Wu等^[75]首次提出超积累植物与重金属低积累作物玉米套种,较单种相比,超积累植物提取重金属的效率显著提高,同时玉米能够产出符合安全标准的食品或饲料或生物能源。当前关于Cd超积累植物与不同作物套作模式下的土壤修复效果及作物安全生产情况见表5。邓林^[76]通过连续8年的超积累

表5 Cd超积累植物与作物套作修复效果与安全生产情况

Table 5 Cd hyperaccumulator and crop relay intercropping restoration effect and safe production situation

超积累植物 Hyperaccumulators	作物 Crop	种植模式 Planting mode	土壤总Cd Total cadmium of soil/(mg·kg ⁻¹)	土壤pH Soil pH	植物吸收量提高率* Increase rate of soil absorption/%	土壤Cd削减量提高率** Reduction rate of soil cadmium content/%	安全生产情况 Safety in production	参考文献 References
伴矿景天	高粱	套作	3.5	7.24	60 ↑	20.00 ↑	达标	[76]
伴矿景天	玉米	套作	3.5	7.24	90 ↑	18.30 ↑	达标	[76]
东南景天	玉米	套作	1.231	4.69	13 ↑	10.00 ↑	达标	[56]

注:* 套作条件下超积累植物较单作吸收重金属含量的提高率。 **套作条件下土壤中重金属Cd削减量较单作的提高率。
Note: * The increase rate of heavy metal content absorbed by hyperaccumulator under really intercropping compared with monoculture. ** The increase rate of Cd concentration reduction in soil under relay intercropping compared with monoculture.

植物伴矿景天与玉米/高粱的田间套作试验发现,套作处理下土壤 Cd 含量从 $3.50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $0.55 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 低于国家土壤环境质量三级标准。此外,套作提高了植物的提取效率,是未修复前伴矿景天单作的 6 倍。同时套作下玉米籽粒中 Cd 浓度低于国家食品安全限值。蒋成爱等^[56]将超积累植物东南景天与黑麦草/玉米套种,发现黑麦草和玉米显著降低了对 Cd/Zn 的吸收,并且黑麦草地上部的生物量大幅度提高。也有研究证实,玉米套种蜈蚣草,蜈蚣草地上部的生物量显著提高约 50%,增强了蜈蚣草对 As 的吸收能力,同时玉米中 As 含量降低,但是对玉米的生物量并无影响^[77]。而在 Jiang 等^[78]用超积累植物“东南景天 + 遏蓝菜 + 黑麦草”与玉米套种的研究中,超积累植物的生物量下降,但此模式下超积累植物对重金属的提取效率依然保持较高水平。虽然在多数研究中均显示与超积累植物套种的普通作物地上部的重金属含量降低,但是套种对各自的生物量影响却有不同,这可能与套种密度、套种植物、实验土壤以及套种物种之间营养竞争和生长时间等有关。超积累植物油菜与中国白菜套种,白菜中 Cd 的浓度降低了 33.1%,地上部的累积量降低了 70.6%,但是其生物量也剧减,可能是油菜对土壤中的营养元素及重金属具有较强的竞争优势造成的^[79]。

套种模式的应用能有效减少普通作物对重金属的吸收,从而减少重金属进入食物链,提高超积累植物对土壤重金属的提取效率。周建利等^[80]通过长期田间实验,将超积累植物东南景天和玉米 (*Zea mays*) 套种,发现土壤 Cd、Pb 含量逐渐下降,其中 Cd 含量从 $1.21 \sim 1.27 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降为 $0.29 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 同时套种下土壤 Cd 的降低率较单作提高约 10%,收获后的玉米种子也在第四季达到了食品安全卫生标准。肖伟等^[81]在研究黑麦草和大蒜套种时发现,套种有效地降低了黑麦草对重金属 Cd 的吸收,降低率为 23.92%,但是提高了黑麦草对重金属 Pb 的吸收,增加率为 133.15%。通过东南景天和玉米套种模式处理城市污泥,也可以达到去除重金属的效果,在实现城市污泥稳定化的同时可收获符合粮食标准的玉米^[82-84]。此外,超积累植物和非超积累植物种植在一起,能够为与之套种的植物提供保护作用。非超积累植物 *Thlaspi arvense* 套种同属 Zn 超积累植物 *Thlaspi caerulescens*, 其地上部 Zn 含量是单种时的 1/3,生物量显著提高,由于 *Thlaspi caerulescens* 较强的吸锌能力,套种后 *Thlaspi arvense* 对 Zn 的中毒现象大幅缓解,并且

其生物量显著提高^[84]。选择适当的植物进行搭配种植十分重要。如将 Cd/Zn 超积累植物柳树与矮小的超积累植物拟南芥套种,并没有提高对重金属的提取率,这可能是水、营养和污染物的竞争吸收以及杂草等因素造成的结果^[85-87]。超积累 Zn/Cd 的蕨类植物蹄盖 (*Athyrium yokoscense*) 与另外一种 Zn/Cd 超积累植物 *Arabis flagellosa* 间作也未能提高植物提取效率,可能两种超积累植物的相互竞争导致对 Zn/Cd 的吸收产生了影响^[86]。因此筛选合适的植物进行搭配种植是提高土壤植物修复效率的关键,对于复合型重金属污染土壤也可以考虑采取多种类型超积累植物间套作的方式。

5 轮作模式在超积累植物修复 Cd 土壤污染中的应用

农业上,轮作主要是指在同一块地上,按照季节和一定年限,轮换种植几种性质不同的作物。通常会将吸收养分多、消耗地力大的“麦类、谷类、玉米”等粮食作物、“棉、麻、烟”等经济作物与既能固定空气中的氮素,又能吸收土壤中难溶性磷素和钾素的“各种豆类和绿肥”作物轮作,以提高用地与养地的效率。种植红薯、水稻和瓜类作物的地块,由于植株荫蔽,土壤温度降低,俗称“冷茬”。种植麦类、谷类、土豆、烟草、大麻等作物的地块,土壤温暖,俗称“热茬”。冷茬与热茬轮作,可利于提高作物产量^[63]。

间、套作体系在田间污染修复工程上应用较成熟,应用规模较大的集中在超积累植物伴矿景天和东南景天。轮作模式与其相比目前的报道较少。现阶段应用于田间修复的只有超积累植物伴矿景天,表 6 总结了其与作物轮作的应用情况。居述云等^[87]通过田间微区实验研究伴矿景天/小麦间作、茄子轮作种植,发现间作对于小麦籽粒、茄子和伴矿景天地上部生物量均没有明显影响;间作小麦籽粒中重金属含量较单作降低了 52.4%,并且降低了后茬茄子对重金属的吸收,但是小麦和茄子中 Cd 的含量都未达到食品安全标准,均不能食用。对于未达到安全标准的农产品,应该禁止市场销售并按国家规定做无害化处理。有研究发现,相比单作,小麦和伴矿景天间作对小麦籽粒和伴矿景天地上部生物量无明显影响,但小麦秸秆生物量相对减小。导致这种结果的原因可能是伴矿景天间作小麦后,其根系在生长过程中与小麦根系争夺养分,造成两者相互竞争,影响了小麦秸秆的生长^[88]。这与赵冰等^[69]将伴矿景天与小麦间作于水稻

表6 Cd超积累植物与作物轮作修复效果与安全生产情况
Table 6 Cd hyperaccumulator and crop rotation restoration effect and safe production situation

超积累植物 Hyperaccumulators	作物 Crop	种植模式 Planting mode	土壤总Cd Total cadmium of soil/(mg·kg ⁻¹)	土壤 pH Soil pH	植物吸收量提高率* Increase rate of soil absorption/%	土Cd削减量提高率** Reduction rate of soil cadmium content/%	安全生产情况 Safety in production	参考文献 References
伴矿景天	茄子	轮作	3.04	7.24	2.3 ↑	24.30 ↑	未达标	[88]
伴矿景天	苋菜	轮作	1.34	5.7	50.1 ↑	13.20 ↑	达标	[90]
伴矿景天	水稻	轮作	2.27	7.2	11 ↑	15.00 ↑	达标	[91]

注:* 轮作条件下超积累植物较单作吸收重金属含量的提高率。** 轮作条件下土壤中重金属Cd削减量较单作的提高率。
Note: * The increase rate of heavy metal content absorbed by hyperaccumulator under crop rotation compared with monoculture.** The increase rate of Cd concentration reduction in soil under crop rotation compared with monoculture.

土、潮土和黑土3种土壤上,均增加了小麦秸秆和籽粒生物量的研究结果并不完全一致,说明种间竞争能力可能也与土壤性质有关。唐明灯等^[89]将优良花红苋菜(*Amaranthus cruetus* Linna.)与Cd超积累植物伴矿景天间作和轮作,发现伴矿景天对苋菜地上部Cd含量和苋菜的单株生物量并无显著影响,同时间作苋菜对伴矿景天的单株生物量和地上部Cd含量也没有明显影响。前茬种植的伴矿景天提高了土壤乙酸铵-Cd含量,但没有对苋菜(后茬)地上部的Cd含量造成明显影响。而沈丽波等^[90]报道,将伴矿景天与低积累水稻中香1号轮作,前茬伴矿景天使得后茬水稻地上部Zn、Cd浓度上升,同时也提高了土壤乙酸铵-Cd含量。虽然土壤重金属的有效态浓度有所提高,但是前茬种植的伴矿景天对于水稻的生长并无不利影响,而钙镁磷肥的施用不仅可提高伴矿景天的修复效率,且对土壤中Zn、Cd的稳定效果也具有显著作用,大幅降低了水稻地上部Zn、Cd浓度。因此在大田修复中,可考虑施用钙镁磷肥增加水稻籽粒产量,以期降低糙米中Cd浓度,提高糙米食用的安全性。

6 展望

有关超积累植物的定义还在不断拓展,严格以阈值标准为判断依据,辅以其他超积累性特征,继续筛选耐毒性高、吸附力强的超积累植物,扩大其种类是今后研究的重点。鉴于污染土壤很多表现为多种重金属的复合污染,筛选多种重金属超积累植物资源也是研究的关键。已有的间套作体系通常表现为互补为主,竞争为辅。在选择物种搭配时,要注意时间、生长条件、光照等方面的因素,选择合适的植物或者农作物种植。拓宽超积累植物在轮作中的应用,将间套轮作相融合的模式系统应用于重金属复合污染土壤是以后研究的一个方向。在种植模式的实际应用中,适宜的种植密度、施肥用量、种植时间等也是影响土

壤修复效果的关键,也应加强研究。

参考文献:

[1] Doumett S, Lamperi L, Checchini L, et al. Heavy metal distribution between contaminated soil and *Paulownia tomentosa*, in a pilot-scale assisted phytoremediation study: Influence of different complexing agents [J]. *Chemosphere*, 2008, 72(10): 1481-1490.

[2] Eapen S, D' Souza S F. Prospects of genetic engineering of plants for phytoremediation of toxic metals[J]. *Biotechnology advances*, 2005, 23(2): 97-114.

[3] Singh O V, Labana S, Pandey G, et al. Phytoremediation: An overview of metallic ion decontamination from soil[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2003, 61(5/6): 405-412.

[4] 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
CHEN Neng-chang, ZHENG Yu-ji, HE Xiao-feng, et al. Bulletin of national soil pollution survey[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5): 10-11.

[5] 王珊, 白瑞琴. 重金属Cd对两种景天的生长和积累研究[J]. 北方园艺, 2016(7):60-65.
WANG Shan, BAI Rui-qin. Study on growth and accumulation of two sedum under cadmium stress[J]. *Northern Horticulture*, 2016(7):60-65.

[6] 宋玉婷, 彭世逞. 我国土壤重金属污染状况及其防治对策[J]. 吉首大学学报(自然科学版), 2018, 39(5): 76-81.
SONG Yu-ting, PENG Shi-cheng. Current situation of soil heavy metal pollution in China and countermeasures[J]. *Journal of Jishou University (Natural Science Edition)*, 2018, 39(5): 76-81.

[7] 杨肖娥, 龙新宪, 倪吾钟. 超积累植物吸收重金属的生理及分子机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(1): 8-15.
YANG Xiao-e, LONG Xin-xian, NI Wu-zhong. Physiological and molecular mechanisms of heavy metal uptake by hyperaccumulating plants [J]. *Plant Nutrition And Fertilizer Science*, 2002, 8(1): 8-15.

[8] 张晏, 周怀龙, 程秀娟. 第二次全国土地调查数据成果公布 我国土地资源基本国情没有改变 耕保红线粮食安全底线仍须坚守[J]. 国土资源通讯, 2014(1): 8.
ZHANG Yan, ZHOU Huai-long, CHENG Xiu-juan. The results of the second national land survey announced that the basic national conditions of China's land resources have not changed the bottom line of grain security in the farming and conservation red line, which still

- needs to be adhered to[J]. *National Land & Resources Information*, 2014 (1): 8.
- [9] Jaffré T, Brooks R R, Lee J, et al. *Sebertia acuminata*: A hyperaccumulator of nickel from New Caledonia[J]. *Science*, 1976, 193(4253): 579–580.
- [10] Swenson U, Jérôme M. Revision of *Pycnanthus* subgenus *Achradotypus* (Sapotaceae), with five new species from New Caledonia[J]. *Australian Systematic Botany*, 2010, 23. doi: 10.1071/SB09049
- [11] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7: 49–57.
- [12] 沈振国, 刘友良. 重金属超量积累植物研究进展[J]. 植物生理学通讯, 1998, 34(2): 133–139.
- SHEN Zhen-guo, LIU You-liang. Progress in the study on the plants that hyperaccumulate heavy metal[J]. *Plant physiology communications*, 1998, 34(2): 133–139.
- [13] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196–1203.
- WEI Chao-yang, CHEN Tong-bin. Hyperaccumulators and phytoremediation of heavy metal contaminated soil: A review of studies in China and abroad[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, 21(7): 1196–1203.
- [14] Chaney R L. Plant uptake of inorganic waste constituents[C]//Prr J F eds. *Land Treatment of Hazardous wastes Park Ridge New Jersey, USA* Noyes Data Corporation, 1983, 5076.
- [15] Baker A J M, Brooks R R, Pease A J, et al. Studies on copper and cobalt tolerance in three closely related taxa within the genus *Silene* L. (Caryophyllaceae) from Zaïre[J]. *Plant and Soil*, 1983, 73 (3): 377–385.
- [16] 潘义宏, 王宏斌, 谷兆萍, 等. 大型水生植物对重金属的富集与转移[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6430–6441.
- PAN Yi-hong, WANG Hong-bin, GU Zhao-ping, et al. Accumulation and translocation of heavy metals by macrophytes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(23): 6430–6441.
- [17] Chaney R L, Malik M, Li Y M, et al. Phytoremediation of soil metals [J]. *Current Opinons in Biotechnology*, 1997, 8(3): 279–284.
- [18] Hoffmann P, Baker A J M, Madulid D A, et al. *Phyllanthus balgooyi* (Euphorbiaceae S. L.), a new nickel-hyperaccumulating species from Palawan and Sabah[J]. *Blumea Biodiversity Evolution & Biogeography of Plants*, 2003, 48(1): 193–199.
- [19] Baker A J M. Accumulators and excluders—strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1/2/3/4): 643–654.
- [20] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae) [J]. *New Phytologist*, 1994, 127 (1): 61–68.
- [21] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 农田杂草的重金属超积累特性研究[J]. 中国环境科学, 2004, 24(1): 105–109.
- WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. Studies on the characteristics of heavy metal hyperaccumulation of weeds in farmland [J]. *China Environmental Science*, 2004, 24 (1): 105–109.
- [22] 王爱国. 美洲商陆 (*Phytolacca americana* L.) 对 Mn Cd Cu 的积累特性和EDDS螯合诱导植物修复研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- WANG Ai-guo. Accumulation of Mn, Cd and Cu by *Phytolacca americana* L. and EDDS-Enhanced phytoextraction of contaminated soils [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2012.
- [23] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境学报, 2005, 14 (1): 136–138.
- NIE Fa-hui. New comprehensions of hyperaccumulator[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(1): 136–138.
- [24] Whiting B S. In search of the holy grail: A further step in understanding metal hyperaccumulation?[J]. *New Phytologist*, 2002, 155(1): 1–4.
- [25] Reeves R D, Baker A J M, Tanguy J, et al. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements[J]. *New Phytologist*, 2018, 218: 397–400.
- [26] Ent A, Baker A, Reeves R, et al. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: Facts and fiction [J]. *Plant & Soil*, 2013, 362 (1/2): 319–334.
- [27] Ma L Q, Komar K M, Tu C, et al. Erratum: A fern that hyperaccumulates arsenic[J]. *Nature*, 2001, 411(6836).
- [28] Stein R J, Stephan H J, Romário F M, et al. Relationships between soil and leaf mineral composition are element: Pecific, environment ependent and geographically structured in the emerging model *Arabidopsis halleri*[J]. *New Phytologist*, 2016, 213(3): 1274–1286.
- [29] Malaisse F, Gregoire J, Brooks R R, et al. *Aeolanthus biformifolius* De Wild.: A hyperaccumulator of copper from Zaire[J]. *Science*, 1978, 199 (4331): 887–888.
- [30] Jaffré T, Brooks R, Trow J. Hyperaccumulation of nickel by *Geissois* species[J]. *Plant and Soil*, 1979, 51: 157–161.
- [31] Jolanta M P, Mirosław N, Paweł M, et al. Uptake of cadmium, lead, nickel and zinc from soil and water solutions by the nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii*[J]. *Acta Biologica Cracoviensia*, 2004, 46(2): 75–85.
- [32] Shan X, Wang H, Zhang S, et al. Accumulation and uptake of light rare earth elements in a hyperaccumulator *Dicranopteris dichotoma*[J]. *Plant Science*, 2003, 165(6): 1343–1353.
- [33] Galeas M L, Zhang L H, Freeman J L, et al. Seasonal fluctuations of selenium and sulfur accumulation in selenium hyperaccumulators and related nonaccumulators[J]. *New Phytologist*, 2007, 173(3): 517–525.
- [34] Lacoste C, Robinson B, Brooks R, et al. The phytoremediation potential of thallium-contaminated soils using *Iberis* and *Biscutella* species [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 1999, 1(4): 327–338.
- [35] Reeves R D, Schwartz C, Morel J L, et al. Distribution and metal-accumulating behavior of *Thlaspi caerulescens* and associated metallophytes in France[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2001, 3(2): 145–172.
- [36] Reeves R D, Baker A J M, Borhidi A, et al. Nickel hyperaccumulation in the serpentine flora of Cuba[J]. *Annals of Botany*, 2006(1): 1.
- [37] Jaffré T, Pillon Y, Thomine S, et al. The metal hyperaccumulators from New Caledonia can broaden our understanding of nickel accumulation in plants[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2013(4): 1–7.
- [38] Reeves R D, Adigüzel N. The nickel hyperaccumulating plants of the

- serpentes of Turkey and adjacent areas: A review with new data[J]. *Turkish Journal of Biology*, 2008, 32(3): 143-153.
- [39] Reeves R D, Baker A J M, Becquer T, et al. The flora and biogeochemistry of the ultramafic soils of Goiás state, Brazil[J]. *Plant and Soil*, 2007, 293(1/2): 107-119.
- [40] Van der Ent A, Echevarria G, Tibbett M. Delimiting soil chemistry thresholds for nickel hyperaccumulator plants in Sabah (Malaysia) [J]. *Chemoecology*, 2016, 26(2): 67-82.
- [41] Van der Ent A, Erskine P, Sumail S. Ecology of nickel hyperaccumulator plants from ultramafic soils in Sabah (Malaysia)[J]. *Chemoecology*, 2015, 25(5): 243-259.
- [42] 梅娟, 李华, 郭翠花. Cd超富集植物修复污染土壤的研究进展[J]. 能源与节能, 2013(2): 80-82.
- MEI Juan, LI Hua, GUO Cui-hua. The research progress of Cd-hyperaccumulator in contaminated soil remediation[J]. *Energy and Energy Conservation*, 2013(2): 80-82.
- [43] 吴龙华, 周守标, 毕德, 等. 中国景天科植物一新种——伴矿景天[J]. 土壤, 2006, 38(5): 632-633.
- WU Long-hua, ZHOU Shou-biao, BI De, et al. *Sedum plumbizincicola*, a new species of the crassulaceae from Zhejiang, China[J]. *Soils*, 2006, 38(5): 632-633.
- [44] Tang Y T, Qiu R L, Zeng X W, et al. Lead, zinc, cadmium hyperaccumulation and growth stimulation in *Arabidopsis paniculata* Franch[J]. *Environ Exp Bot*, 2009, 66: 126-134.
- [45] 潘志明. 砷汞铅镉复合污染土壤的肾蕨植物修复技术研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2006.
- PAN Zhi-ming. Studies on the phytoremediation of *Nephrolepis auriculata* (L.) for arsenic, mercury, lead and cadmium in the multiple contaminated soils[D]. Chengdu: Chengdu University of technology, 2006.
- [46] 束文圣, 刘威, 蓝崇钰. 湖南堇菜科一新种——宝山堇菜[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2003, 42(3): 118-119.
- SHU Wen-sheng, LIU Wei, LAN Chong-yu. *Viola baoshanensis* Shu, Liu et Lan, A new species of violaceae from Hunan Province, China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2003, 42(3): 118-119.
- [47] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(23): 2568-2573.
- WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. *Solanum nigrum* L., a newly discovered cadmium hyperaccumulator[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(23): 2568-2573.
- [48] 聂发辉. Cd超富集植物商陆及其富集效应生态环境[J]. 生态环境, 2006, 15(2): 303-306.
- NIE Fa-hui. Cd hyper-accumulator *Phytolacca acinosa* Roxb and Cd-accumulative characteristics[J]. *Ecology and Environment*, 2006, 15(2): 303-306.
- [49] 谷雨, 蒋平, 李明德, 等. 商陆修复土壤重金属污染研究进展[J]. 湖南农业科学, 2018(1): 119-122.
- GU Yu, JIANG Ping, LI Ming-de, et al. Progress of *Phytolacca acinosa* on soil polluted by heavy metal[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2018(1): 119-122.
- [50] 杨勇, 王巍, 江荣风, 等. 超积累植物与高生物量植物提取镉效率的比较[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2732-2737.
- YANG Yong, WANG Wei, JIANG Rong-feng, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2732-2737.
- [51] 何冰, 陈莉, 邓金群, 等. 氮肥类型对东南景天生长及重金属积累的影响[J]. 南方农业学报, 2013, 44(5): 797-801.
- HE Bing, CHEN Li, DENG Jin-qun, et al. Effect of different N fertilizers on the growth of *Sedum alfredii* and heavy metal accumulation [J]. *Guangxi Agricultural Sciences*, 2013, 44(5): 797-801.
- [52] 姚桂华, 徐海舟, 朱林刚, 等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4268-4276.
- YAO Gui-hua, XU Hai-zhou, ZHU Lin-gang, et al. Effects of different kinds of organic materials on soil heavy metal phytoremediation efficiency by *Sedum alfredii* Hance[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(11): 4268-4276.
- [53] 武师. 伴矿景天与经济作物间作修复镉复合污染土壤及其产后处理技术[D]. 杭州: 浙江农林大学, 2018.
- WU Shuai. Remediation of Zn-Cd contaminated soil by intercropping system consisted of *Sedum plumbizincicola* and cash crops and post-treatment of the harvested plant biomass[D]. Hangzhou: Zhejiang Agriculture and Forestry University, 2018.
- [54] 刘玲, 吴龙华, 李娜, 等. 种植密度对镉锌污染土壤伴矿景天植物修复效率的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(11): 3422-3426.
- LIU Ling, WU Long-hua, LI Na, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola* [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11): 3422-3426.
- [55] 吴惠瑾, 刘杰. 三种富集植物对广西兴源铅锌矿区周边Cd污染农田土壤修复性能研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(2): 1-4.
- WU Hui-jin, LIU Jie. Study of three accumulators for phytoremediation of paddy soil contaminated by cadmium at Pb-Zn mining district in Guangxi Province[J]. *Industrial Safety and Environmental Protection*, 2016, 42(2): 1-4.
- [56] 蒋成爱, 吴启堂, 吴顺辉, 等. 东南景天与不同植物混作对土壤重金属吸收的影响[J]. 中国环境科学, 2009, 29(9): 985-990.
- JIANG Cheng-ai, WU Qi-tang, WU Shun-hui, et al. Effect of co-cropping *Sedum alfredii* with different plants on metal uptake[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(9): 985-990.
- [57] McGrath S P, Zhao F J. Phytoextraction of metals and metalloids from contaminated soils[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2003, 14(3): 277-282.
- [58] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal accumulating plants[J]. *Resource, Conservation and Recycling*, 1994, 11: 41-49.
- [59] Wang M, Zou J, Duan X, et al. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize (*Zea mays* L.) [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(1): 82-88.
- [60] 王平洁, 龚玉莲, 汤域巍, 等. 间作对植物吸收积累重金属的影响研究进展[J]. 农业研究与应用, 2016(2): 49-52.
- WANG Ping-jie, GONG Yu-lian, TANG Yu-wei, et al. Research

- progress on the effect of intercropping on heavy metal absorption and accumulation in plants[J]. *Agricultural Research and Application*, 2016 (2):49-52.
- [61] 王激清, 茹淑华, 苏德纯. 印度芥菜和油菜互作对各自吸收土壤中难溶态Cd的影响[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(5):890-894.
- WANG Ji-qing, RU Shu-hua, SU De-chun. Effects of Indian mustard and oilseed rape co-cropping on absorbing in-soluble cadmium of contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2004, 24(5):890-894.
- [62] 刘颖. 种间根际相互作用下植物对土壤重金属污染的响应特征及其机理研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- LIU Ling. Responses of plant to soil contaminated with heavy metal under interspecific rhizosphere interactions and its mechanisms[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [63] 赵玉彩. 浅谈间作套种轮作[J]. *生物学教学*, 2005, 30(9): 69-70.
- ZHAO Yu-cai. On intercropping, interplanting and rotation[J]. *Biological Teaching*, 2005, 30(9): 69-70.
- [64] 李新博, 谢建治, 李博文, 等. 印度芥菜-苜蓿间作对镉胁迫的生态响应[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 185-189.
- LI Xin-bo, XIE Jian-zhi, LI Bo-wen, et al. Ecological responses of *Brassica juncea* - *alfalfa* intercropping to cadmium stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 185-189.
- [65] 刘景辉, 曾昭海, 焦立新, 等. 不同青贮玉米品种与紫花苜蓿的间作效应[J]. *作物学报*, 2006, 32(1):125-130.
- LIU Jing-hui, ZENG Zhao-hai, JIAO Li-xin, et al. Intercropping of different silage maize cultivars and alfalfa[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(1): 125-130.
- [66] 能凤娇, 吴龙华, 刘鸿雁, 等. 芹菜与伴矿景天间作对污泥农用镉污染土壤化学与微生物性质的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(5): 1428-1434.
- NENG Feng-jiao, WU Long-hua, LIU Hong-yan, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* and *Apium graveolens* on the soil chemical and microbiological properties under the contamination of zinc and cadmium from sewage sludge application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(5): 1428-1434.
- [67] Deng L, Li Z, Wang J, et al. Long-term field phytoextraction of zinc/cadmium contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* under different agronomic strategies[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2016, 18(2): 134-140.
- [68] 王京文, 蔡梅, 郑洁敏, 等. 丝瓜与伴矿景天间作对土壤Cd形态及丝瓜Cd吸收的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2292-2298.
- WANG Jing-wen, CAI Mei, ZHENG Jie-min, et al. Investigating the intercropping effects of *Sedum plumbizincicola* and *Luffa cylindrical* on soil cadmium fractions and cadmium uptake by *Luffa cylindrical* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(12): 2292-2298.
- [69] 赵冰, 沈丽波, 程苗苗, 等. 麦季间作伴矿景天对不同土壤小麦-水稻生长及镉吸收性的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(10): 2725-2731.
- ZHAO Bing, SHEN Li-bo, CHENG Miao-miao, et al. Effects of intercropping *Sedum plumbizincicola* in wheat growth season under wheat-rice rotation on the crops growth and their heavy metals uptake from different soil types[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(10): 2725-2731.
- [70] 武帅, 许佳霖, 张进, 等. 生物质炭协同伴矿景天-玉米间作修复镉复合污染土壤研究[J]. *科技通报*, 2019, 35(2): 205-212, 219.
- WU Shuai, XU Jia-lin, ZHANG Jin, et al. Biochar-aided phytoextraction of zinc and cadmium contaminated soil via *sedum* and maize intercropping system[J]. *Bulletin of Science and Technology*, 2019, 35(2): 205-212, 219.
- [71] 安玲瑶. 作物间作对重金属吸收的影响及其机制的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- AN Ling-yao. The effect and mechanism of crop intercropping on heavy metal absorption[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [72] 廖红, 严小龙. 高级植物营养学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- LIAO Hong, YAN Xiao-long. Advanced plant nutrition[M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [73] Zhang F, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrient-use efficiency[J]. *Plant and Soil*, 2003, 248(1/2): 305-312.
- [74] Li L, Sun J, Zhang F, et al. Wheat/maize or wheat/soybean strip intercropping: I. Yield advantage and interspecific interactions on nutrients[J]. *Field Crops Research*, 2001, 71(2): 123-137.
- [75] Wu Q T, Samake M, Mo C H. Simultaneous sludge stabilization and metal removal by metal hyperaccumulator plants[C]// Transactions of 17th World Congress of Soil Science, 2002.
- [76] 邓林. 镉污染土壤的田间植物连续修复研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- DENG Lin. Research on the continuous field phytoremediation of zinc and cadmium contaminated soil[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- [77] 邱丹, 杜芮萍, 孟德凯, 等. 玉米套作蜈蚣草修复砷污染农田土壤的效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(1): 101-107.
- QIU Dan, DU Rui-ping, MENG De-kai, et al. Effect of maize (*Pteris vittata* L.) intercropping on remediation of As-contaminated farmland soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 101-107.
- [78] Jiang C A, Wu Q T, Sterckeman T, et al. Co-planting can phytoextract similar amounts of cadmium and zinc to mono-cropping from contaminated soils [J]. *Ecological Engineering*, 2010, 36(4): 391-395.
- [79] Su D, Lu X, Wong J. Could cocropping or successive cropping with Cd accumulator oilseed rape reduce Cd uptake of sensitive Chinese cabbage[J]. *Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management*, 2008, 12(3): 224-228.
- [80] 周建利, 邵乐, 朱凰榕, 等. 间套种及化学强化修复重金属污染酸性土壤——长期田间试验[J]. *土壤学报*, 2014, 51(5): 1056-1065.
- ZHOU Jian-li, SHAO Le, ZHU Huang-rong, et al. Phytoremediation of intercropping with chemical enhancement of heavy metal contaminated acid soil: A long-time field experiment [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(5): 1056-1065.
- [81] 肖伟, 唐俊杰, 席江, 等. 单种与蒜苗套种下黑麦草吸收重金属镉铅的比较[J]. *中国农学通报*. 2018, 34(5): 74-77.
- XIAO Wei, TANG Jun-jie, XI Jiang, et al. Absorbing cadmium and lead by perennial ryegrass: Under single planting and intercropping

- with garlic[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(5): 74–77.
- [82] Liu X M, Wu Q T, Banks M K. Effect of simultaneous establishment of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on heavy metal accumulation in plants [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, 7(1): 41–53.
- [83] 黑亮, 吴启堂, 龙新宪, 等. 东南景天和玉米套种对Zn污染污泥的处理效应[J]. *环境科学*, 2007, 28(4): 852–858.
HEI Liang, WU Qi-tang, LONG Xin-xian, et al. Effect of co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge [J]. *Environmental Science*, 2007, 28(4): 852–858.
- [84] Whiting S N, Leake J R, McGrath S P, et al. Hyperaccumulation of Zn by *Thlaspi caerulescens* can ameliorate Zn toxicity in the rhizosphere of cocropped *Thlaspi arvense*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, 35(15): 3237–3241.
- [85] Wieshammer G, Unterbrunner R, Banares García T, et al. Phytoextraction of Cd and Zn from agricultural soils by *Salix* spp. and intercropping of *Salix caprea* and *Arabidopsis halleri*[J]. *Plant Soil*, 2007, 298: 255–264.
- [86] Chen Z, Setagawa M, Kang Y, et al. Zinc and cadmium uptake from ametailiferous soil by amixed culture of *Athyrium yokoscense* and *Arabis flagellosa*[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2009, 55: 315–324.
- [87] 居述云, 汪洁, 宓彦彦等. 重金属污染土壤的伴矿景天/小麦-茄子间作和轮作修复[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(8): 2181–2186.
JU Shu-yun, WANG Jie, MI Yan-yan, et al. Phytoremediation of heavy metal contaminated soils by intercropping with *Sedum plumbizincicola* and *Triticum aestivum* and rotation with *Solanum melongena* [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2181–2186.
- [88] Hauggaard-Nielsen H, Ambus P, Jensen E S. Interspecific competition, N use and interference with weeds in pea-barley intercropping [J]. *Field Crops Research*, 2001, 70(2): 101–109.
- [89] 唐明灯, 艾绍英, 李盟军, 等. 轮间作对伴矿景天和菟菜生物量及Cd含量的影响[J]. *广东农业科学报*, 2012(13): 35–37.
TANG Ming-deng, AI Shao-ying, LI Meng-jun, et al. Effects of interplanting-rotation on growth and Cd concentration of *Sedum plumbizincicola* and *Amaranthus cruetus*[J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2012(13): 35–37.
- [90] 沈丽波, 吴龙华, 谭维娜, 等. 伴矿景天-水稻轮作及磷修复剂对水稻镉吸收的影响[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(11): 2952–2958.
SHEN Li-bo, WU Long-hua, TAN Wei-na, et al. Effects of *Sedum plumbizincicola*-*Oryza sativa* rotation and phosphate amendment on Cd and Zn uptake by *O. sativa*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(11): 2952–2958.