

伴矿景天修复农田土壤镉污染的研究进展

熊娟, 王依涵, 陈畅, 侯静涛, 许运, 汪明霞, 谭文峰

引用本文:

熊娟, 王依涵, 陈畅, 侯静涛, 许运, 汪明霞, 谭文峰. 伴矿景天修复农田土壤镉污染的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 441-454.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0909>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响

邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 孙丽娟, 蔡润众, 彭曦, 柏佳, 黄硕霏, 周青

农业环境科学学报. 2020, 39(12): 2762-2770 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0605>

不同增强试剂对二维电场下伴矿景天修复镉污染土壤的影响

樊广萍, 姚澄, 周东美, 张振华, 童非, 史高玲, 张维国, 陈未, 李江叶, 刘丽珠, 李云涛, 高岩

农业环境科学学报. 2021, 40(12): 2669-2680 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0398>

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>

植物修复重金属和抗生素复合污染 土壤微生物数量和酶活性的变化

周显勇, 刘鸿雁, 刘艳萍, 刘青栋, 涂宇, 顾小凤, 吴龙华

农业环境科学学报. 2019, 38(6): 1248-1255 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0029>

覆膜对伴矿景天生长和吸镉动态影响研究

殷志遥, 和君强, 秦华, 刘代欢, 邓林, 常海伟, 桂娟, 李柱, 周通

农业环境科学学报. 2019, 38(5): 1043-1050 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1022>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

熊娟, 王依涵, 陈畅, 等. 伴矿景天修复农田土壤镉污染的研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 441–454.

XIONG J, WANG Y H, CHEN C, et al. Research progress on the remediation of *Sedum plumbizincicola* in cadmium-contaminated farmland soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 441–454.



开放科学 OSID

伴矿景天修复农田土壤镉污染的研究进展

熊娟^{1,2}, 王依涵^{1,2}, 陈畅^{1,2}, 侯静涛^{1,2}, 许运^{1,2}, 汪明霞^{1,2}, 谭文峰^{1,2*}

(1. 国家环境保护土壤健康诊断与绿色修复重点实验室, 武汉 430070; 2. 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 430070)

摘要:我国土壤镉污染区与水稻种植区在空间分布上基本吻合,这严重威胁了粮食安全与人体健康,是亟需解决的土壤环境问题。伴矿景天是我国近年发现的镉超富集植物,是修复土壤镉污染的理想植物。本文以“伴矿景天”和“*Sedum plumbizincicola*”为关键词,从中国知网和 Web of Science 数据库共收集文献 280 篇,采用文献计量分析软件 VOSviewer 分析国内外研究现状,分别从伴矿景天对镉的吸收转运和富集机制、解毒机理、田间修复现状、修复效果强化措施和产后处理技术 5 个方面综述了现阶段的主要研究成果,并进一步阐述了伴矿景天田间修复推广应用面临的问题和挑战,提出未来研究应集中探索伴矿景天的修复效率提升和实际推广应用。

关键词:伴矿景天;土壤;镉;污染;植物修复

中图分类号:X53;X173 **文献标志码:**A

文章编号:1672-2043(2022)03-0441-14 **doi:**10.11654/jaes.2021-0909



Research progress on the remediation of *Sedum plumbizincicola* in cadmium-contaminated farmland soils

XIONG Juan^{1,2}, WANG Yihan^{1,2}, CHEN Chang^{1,2}, HOU Jingtao^{1,2}, XU Yun^{1,2}, WANG Mingxia^{1,2}, TAN Wenfeng^{1,2*}

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Soil Health and Green Remediation, Wuhan 430070, China; 2. College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: The spatial distribution of soil cadmium pollution in China overlaps dramatically with rice cultivation. Cadmium contamination has become one of the most serious problems in food safety and human health. To maintain healthy soils, it is urgent to remediate the cadmium-contaminated soil. *Sedum plumbizincicola*, a cadmium hyperaccumulator recently found by Chinese scientists, is an ideal plant for remediating cadmium soil contamination. In the present study, 280 papers were retrieved from the CNKI and Web of Science with the keywords ‘*Sedum plumbizincicola*’ and analyzed by the software VOSviewer. We discussed the results from the perspectives of physiological and biochemical properties, molecular remediation mechanism, field application mode, and repairing efficiency improvements. After explaining the main problems in field application, future challenges in promoting the field application repairing efficiency were proposed.

Keywords: *Sedum plumbizincicola*; soil; cadmium; pollution; phytoremediation

收稿日期: 2021-08-12 录用日期: 2021-10-25

作者简介: 熊娟(1985—), 女, 博士后, 主要从事土壤典型元素界面行为模拟研究。E-mail: jeryxiong@mail.hzau.edu.cn

*通信作者: 谭文峰 E-mail: tanwf@mail.hzau.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41977023, 41601231, 41807137)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41977023, 41601231, 41807137)

我国耕地重金属污染形势严峻,生态环境部发布的《2020年全国生态环境质量简况》^[1]指出镉是我国农用地重金属污染的首要污染物。镉易富集于水稻等粮食作物之中,我国约10%的稻米镉含量超标^[2]。土壤镉污染已成为实现粮食安全的重要限制性因素。为保障我国粮食安全,大量镉污染土壤亟待修复。目前主要的土壤修复方法包括物理修复、化学修复和生物修复3类。生物修复包括植物修复和微生物修复,与物理修复和化学修复相比,生物修复适用于轻、中度镉污染的农田生态系统修复^[3]。植物修复以其成本低、易操作、环境友好等特点而更易被公众接受,且自然界存在的大量镉超富集植物也为植物修复提供了良好的原材料^[4]。

国内外已发现的镉超富集植物主要有印度芥菜、圆锥南芥、宝山堇菜、伴矿景天等20余种^[5-8]。其中,伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)^[9]的镉耐受性极高,在地上部镉含量高达 $587 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时其也未表现出毒害症状^[10],是近年的研究热点。伴矿景天具有很高的镉富集系数和转移系数,低浓度镉甚至可促进其生长,是修复土壤镉污染的理想植物^[11]。伴矿景天喜阴^[12],有一定耐旱性^[13],春冬季均能正常生长,可扦插种植,与农作物轮间作时可不中断常规农业生产。然而,伴矿景天修复效率极易受下述因素限制:(1)土壤镉生物有效性低,不利于伴矿景天吸收转运;(2)伴矿景天生物量小,修复效率低;(3)生长环境条件复杂,如土壤pH、养分、质地等均可影响伴矿景天的生长和修复效率。因此,如何提高土壤镉的生物有效性和伴矿景天的生物量,进而提高镉修复效率是目前研究的

热点。

通过分析中国知网(CNKI)和Web of Science数据库收录的与伴矿景天相关的中、英文文献发现,已有研究多关注伴矿景天的生理特性、修复机理和修复效果,部分研究关注修复效果改良,但相关研究表明现有改良方法仍缺乏潜力,不同研究间缺少相互联系,难以综合地评估修复效率,从而阻碍了伴矿景天田间修复的推广应用。本研究梳理了国内外伴矿景天修复土壤镉污染的相关文献,通过文献对比分析,综述了伴矿景天土壤镉污染修复的研究现状和存在问题,并对伴矿景天修复效果改良、田间修复推广等未来发展方向进行展望。

1 文献调研和可视化分析

分别以“伴矿景天”和“*Sedum plumbizincicola*”为关键词,检索CNKI数据库和Web of Science数据库的中、英文文献发现,最早研究发表于2006年,相关中、英文文献数分别为116篇和164篇。CNKI和Web of Science中出现3次及以上的关键词分别为29个和65个,以此为数据源,利用文献计量分析软件VOSviewer可视化分析该领域关键词密度和共现网络,结果如图1所示。

图1a和图1b分别是CNKI和Web of Science中伴矿景天关键词的可视化图,二者前10位高频关键词如表1所示。CNKI的高频词是:伴矿景天、重金属、植物修复、镉、间作等,表明相关研究注重伴矿景天的实际应用,即研究伴矿景天修复农田镉污染土壤的实际效果。Web of Science的高频词是:heavy metal、up-

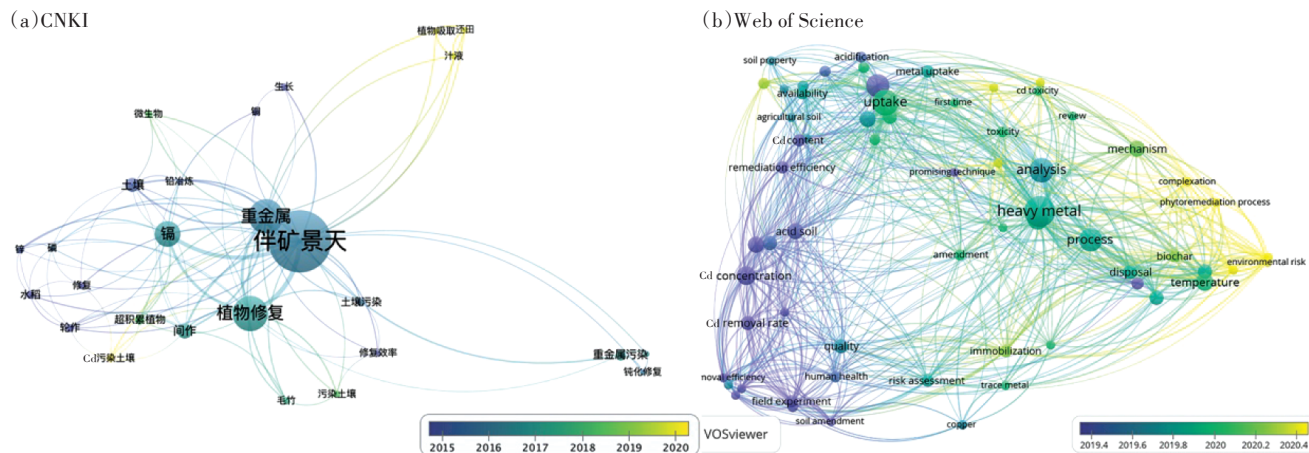


图1 CNKI和Web of Science中伴矿景天相关研究的关键词共现密度与网络可视化分析

Figure 1 Visualization of keyword density and network of the studies for cadmium-contaminated soil remediation with *Sedum plumbizincicola* in the database of CNKI and Web of Science

表1 CNKI和Web of Science中伴矿景天修复镉污染土壤研究的高频关键词

Table 1 High-frequency keywords of the studies for cadmium-contaminated soil remediation with *Sedum plumbizincicola* in the database of CNKI and Web of Science

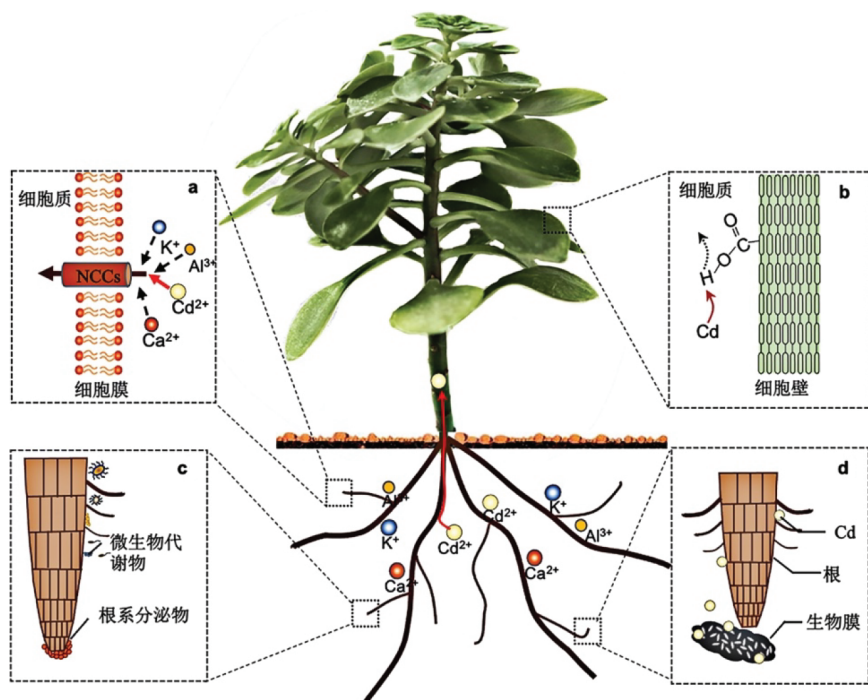
CNKI	频次 Frequency	Web of Science	频次 Frequency
伴矿景天	87	heavy metal	18
重金属	37	uptake	14
植物修复	39	analysis	13
镉	33	process	12
间作	11	<i>Sedum plumbizincicola</i>	12
土壤	10	increase	10
轮作	5	Cd concentration	9
超积累植物	6	temperature	8
土壤污染	5	mechanism	7
毛竹	4	growth	7

take、analysis、process、*Sedum plumbizincicola*等,表明相关研究多关注伴矿景天的修复机理和对重金属吸收的过程。CNKI库关键词较少,网络简单,近年出现较多的关键词分别为植物吸取、还田、汁液,表明相关研究多关注伴矿景天产后处理问题。Web of Science库关键词较多,网络复杂,近年出现较多的关键词分

别为 phytoremediation process、complexation、environment risk,表明相关研究多聚焦于伴矿景天修复过程中的相关环境风险问题。综上所述,伴矿景天的相关研究一方面关注实际应用,通过田间实验研究伴矿景天的修复模式、修复强化方法,另一方面则从微观机制出发,探究伴矿景天的生理特性和富集解毒机理,且近年较多关注生物炭或微生物的强化修复作用,以及产后处理技术的环境风险问题。

2 伴矿景天的镉吸收转运机制

分析Web of Science库的高频词可知,伴矿景天的生理特性和吸收转运机制是研究热点之一。伴矿景天能将大量镉富集至地上部并隔离,而不影响其自身正常的生长代谢,镉从土壤到植株的迁移路径如图2所示。根毛区是伴矿景天植株主要的镉吸收部位,其细胞质膜中分布着丰富的离子转运蛋白^[14]。镉由非选择性阳离子通道主动吸收进入伴矿景天根部,并通过共质体途径运至植株其他部位(图2a)。在此过程中,土壤中的钙、钾、铝均与镉竞争非选择性阳离子通道的吸附位点,从而抑制伴矿景天对镉的吸收^[15-17]。伴矿景天茎、叶细胞壁果胶酯化程度较低,富含羧基,能有效络合镉,缓解镉对植物组织的毒害,



NCCs代表非选择性阳离子通道
NCCs indicate nonselective cation channels

图2 伴矿景天的镉吸收运输机制

Figure 2 Mechanisms of cadmium uptake and transportation by *Sedum plumbizincicola*

是镉进入伴矿景天体内的主要储存部位(图2b),各部位结合镉的能力不同,水培镉浓度为 $112\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 条件下,伴矿景天茎细胞壁镉浓度约为叶细胞壁镉浓度的1.13倍^[18-20]。

伴矿景天根际特性极大地影响着其对镉的富集。如图2c所示,伴矿景天通过根系分泌小分子有机酸和大量吸收钙离子导致根际土壤酸化,从而增加了根际土壤中镉的生物有效性^[21-24]。因此,种植伴矿景天后,有必要考虑镉活化后的淋失风险问题。同时,一些根际促生微生物可在根际形成生物膜来吸附镉(图2d),并分泌生长素、ACC脱氢酶和铁载体等促生物质,通过代谢活化伴矿景天根际的镉和磷等^[25-28],使伴矿景天生物量和镉积累量增加^[29-30]。

伴矿景天的镉超富集能力还与土壤理化性质,如共存离子、pH等密切相关。土壤中的 Al^{3+} 一方面能影响伴矿景天根系生长,另一方面因其根表对 Al^{3+} 的亲合能力明显强于 Cd^{2+} ,从而可显著抑制根系对镉的吸收转运^[31-32]。当土壤铝含量达到 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,伴矿景天生物量、镉积累量分别降低80%和93%^[33]。伴矿景天生长最适pH约为5.5,此条件下其对土壤镉的活化及抵抗酸性毒害的综合效应最大。综合以上伴矿景天根际富集特性,可通过施加活化剂、有机酸等方法增加土壤镉有效性,增施碱性肥料和石灰等方法调节土壤pH改善生长条件,从而增强伴矿景天修复效果。

3 伴矿景天的镉富集和解毒机制

作为镉超富集植物,伴矿景天对镉有着超强的耐受能力和富集作用。如表2所示,伴矿景天体内存在*SpMTL*、*SepPCS*和*SpHMA*等一系列镉的调控基因,合成的相关功能蛋白能络合降低镉的活性或将镉转移至生理活性较低的组织以缓解镉的毒害。伴矿景天体内相关功能蛋白包括(类)金属硫蛋白^[34-36]、植物螯

合肽酶^[37-39]与膜转运蛋白^[40-43]等,分别通过巯基络合作用降低镉活性、调控镉向地上部运输至特定部位累积隔离来实现镉毒害的缓解(图3)。

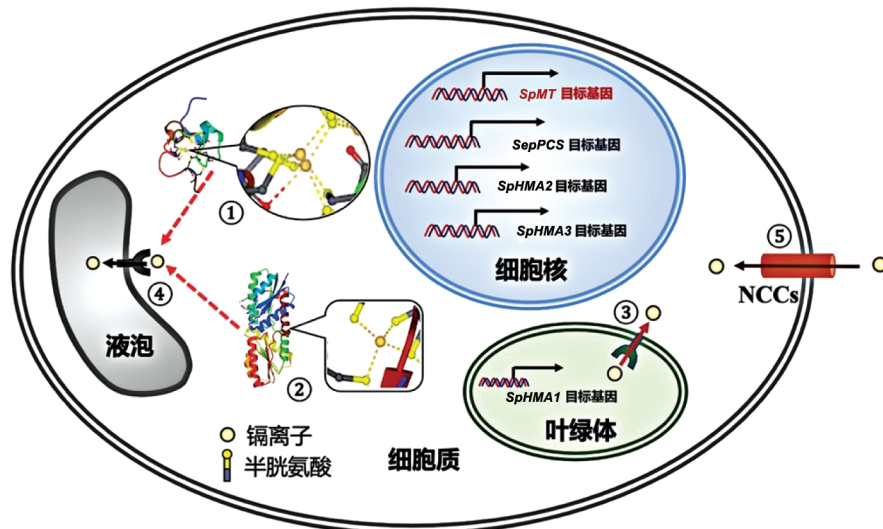
巯基对镉的亲合能力高,极易络合游离态镉。伴矿景天通过调控含巯基蛋白的表达,能有效降低体内活性镉浓度,提高对镉的超耐受能力。伴矿景天体内调控表达巯基蛋白的基因包括*SpMTL*、*SpMT*和*SepPCS*3种^[34-36]。*SpMTL*和*SpMT*表达的(类)金属硫蛋白含半胱氨酸残基,其巯基与游离态镉结合,调控镉在植株体内的运输(图3①)。伴矿景天根系中*SpMTL*基因的表达高于茎叶,其能够减少根部细胞液泡对镉的截留,促使镉向地上部长距离运输,增强伴矿景天地上部对镉的富集。如图3②所示,*SepPCS*^[37]表达的螯合肽酶能催化谷胱甘肽合成植物螯合肽(Phytochelatins, PCs)^[45],其分子亦富含巯基,能将细胞质中的镉以PCs-镉螯合物形式转运进液泡中隔离解毒^[46]。当镉有效浓度大于 $45\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,*SepPCS*基因表达显著增加,表明PCs仅在镉浓度高时起应急作用,并不是伴矿景天的主要解毒机制^[39]。

镉超富集植物通过调控镉转运蛋白的表达,促使镉向地上部运输,故能超富集镉^[40-41]。伴矿景天体内编码膜上镉转运蛋白的基因包括*SpHMA1*、*SpHMA2*和*SpHMA3*。*SpHMA1*表达叶绿体被膜上的镉转运蛋白(图3③),其能够将镉从叶绿体内输出,保护叶绿体免受镉毒害,维持伴矿景天光合系统正常功能^[43]。*SpHMA2*和*SpHMA3*表达液泡膜上的镉转运蛋白(图3④),能够将 Cd^{2+} 从细胞质运输到液泡内隔离解毒。伴矿景天根中*SpHMA2*基因的表达量高出茎叶中数十倍,从而促使镉向地上部长距离运输。伴矿景天茎叶中*SpHMA3*基因的表达量高出根中8~15倍,从而促使镉在茎和叶中富集^[42]。伴矿景天体内的富集转运基因使大量镉富集到地上部,未来可基于分子生物和基因工程技术进一步研究其基因库,提升伴矿景天富

表2 伴矿景天缓解镉毒害的调控基因

Table 2 Regulatory genes to mitigate the toxicity of cadmium in *Sedum plumbizincicola*

基因 Gene	功能蛋白 Functional protein	表达位置 Expression site	调控机理 Regulatory mechanism	调控效果 Regulatory effect
<i>SpMTL</i> ^[36]	类金属硫蛋白	根系	巯基络合	减少根部截留,促使长距离运输
<i>SpMT</i> ^[34-35]	金属硫蛋白	植物体	巯基络合	减少根部截留,促使长距离运输
<i>SepPCS</i> ^[37-39]	植物螯合肽酶	植物体	巯基络合	催化螯合肽合成,形成金属螯合物转运进液泡
<i>SpHMA1</i> ^[40-43]	膜转运蛋白	叶绿体被膜	镉离子泵	从叶绿体输出镉,缓解镉对叶绿体的毒害
<i>SpHMA2</i> ^[44]	膜转运蛋白	液泡膜(根部)	镉离子泵	运输到液泡内隔离,缓解镉对植物体的毒害
<i>SpHMA3</i> ^[41-42]	膜转运蛋白	液泡膜(地上部)	镉离子泵	运输到液泡内隔离,缓解镉对植物体的毒害



① *SpMT*:伴矿景天金属硫蛋白;② *SepPCS*:伴矿景天螯合肽合酶;③ *SpHMA1*:伴矿景天金属转运蛋白1;
④ *SpHMA2*:伴矿景天金属转运蛋白2;*SpHMA3*:伴矿景天金属转运蛋白3;⑤ NCCs:非选择性阳离子通道

① *SpMT*:*Sedum plumbizincicola* metallothionein;② *SepPCS*:*Sedum plumbizincicola* phytochelatin synthase;③ *SpHMA1*:*Sedum plumbizincicola* heavy metal ATPase1;④ *SpHMA2*:*Sedum plumbizincicola* heavy metal ATPase2;*SpHMA3*:*Sedum plumbizincicola* heavy metal ATPase3;
⑤ NCCs:nonselective cation channels

图3 伴矿景天镉富集和解毒的分子机制

Figure 3 Molecular mechanism of accumulation and detoxification in *Sedum plumbizincicola* for cadmium

集能力或开发更多转基因超富集植物。

4 伴矿景天修复镉污染土壤现状

2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤镉点位超标率达到7%,而耕地点位超标率达到19.4%,主要污染物为镉^[47]。为严守耕地红线,保证粮食生产安全,构建高效修复与安全生产的植物修复模式至关重要^[48]。针对轻中度的镉污染农田土壤,实施伴矿景天-农作物间套轮作,并配施钝化剂的修复模式(表3),可实现边生产边修复^[49]。文献计量分析结果表明,CNKI库的高频词有植物修复、间作、轮作等(表1),说明伴矿景天修复农田污染土壤的模式是科研工作者目前关注的热点之一。

伴矿景天与低积累农作物间作,可有效提高其修复效率,并保证农产品质量安全。间作时,伴矿景天的根系分泌物扩散到与其间作植物的根际从而活化重金属^[50],为保证农作物安全生产,需配施钝化剂以减少农作物对镉的吸收。如表3所示,盆栽条件下,伴矿景天与玉米间作一季,可配施复配制剂^[49]、生物炭(10~50 g·kg⁻¹)^[51]等钝化剂,提升伴矿景天镉积累量,同时使玉米茎叶镉含量降至《饲料卫生标准》(GB 13078—2017)中的限量以下。大田实验中,伴矿景天连续与玉米间套作,可增加土壤镉去除量,并保证玉米籽粒镉含量降至《食品安全国家标准 食品中污染

物限量》(GB 2762—2017)中的限量以下^[52-54]。加强对低积累粮食作物的筛选,并与伴矿景天配套种植,对提高伴矿景天修复效率、保证粮食生产安全具有重要意义^[48]。

伴矿景天与作物轮作时,因其根系对土壤镉有活化作用,故修复后有效态镉浓度存在超标风险。因此种植后茬农作物时,需通过施加钝化剂、调控土壤氧化还原状况等措施降低土壤镉的有效性。如表3所示,将伴矿景天与水稻轮作,并在水稻换茬期施海泡石、生石灰^[55]和钙镁磷肥^[56-57]等钝化剂,可使土壤镉含量降低、伴矿景天的镉积累量提升、水稻糙米镉含量低至0.17~0.24 mg·kg⁻¹。轮作时还可辅以施加硫养分(0.5~2 g·kg⁻¹)、水分管理等措施,从而调控土壤氧化还原状况,改变镉的有效性^[58-59]。例如,伴矿景天种植期间控制田间水分使土壤处于氧化状态,硫氧化过程导致土壤酸化,从而提高土壤有效态镉含量,使伴矿景天植株内镉含量提高67%~167%。水稻种植期间,淹水使土壤处于还原状态,此时还原态硫与镉形成硫化镉,镉的有效性降低,水稻对镉的吸收减少,糙米镉含量降至0.04~0.09 mg·kg⁻¹,降低了34%~72%^[59]。

目前,伴矿景天对土壤镉污染修复的研究多集中于实验室研究,田间应用推广有限,目前还在示范修复环节,未形成完整的修复应用技术体系;田间多配

表3 伴矿景天与农作物间套作和轮作的修复效果

Table 3 Remediation efficiency of intercropping and rotation of *Sedum plumbizincicola* with crops

作物 Crop	种植模式 Planting mode	田间调控措施 Regulatory measure in the field	全镉 Total Cd/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	pH	修复效果 ^a Remediation efficiency	作物镉含量 Content of Cd/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	安全利用 ^b Safe application
玉米 ^[49]	盆栽间作一季	石灰、海泡石、腐植酸、 钙镁磷肥	4.18	6.42	植株镉积累量提升13%~ 67%	茎叶 0.25~0.78	饲用
玉米 ^[51]	盆栽间作一季	生物炭(10~50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	5.87	7.25	玉米生物量提升12%~ 19%	茎叶 1.01~3.58	超标
玉米 ^[54]	田间连续套作八季	—	3.50	7.24	土壤镉去除量提升18%	籽粒 0.02~0.09	食用
小麦 ^[60]	盆栽间作	—	1.56	8.09	—	茎叶 0.60	饲用
水稻 ^[55]	田间轮作两季	海泡石(3.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 生石灰(0.3 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.68	5.00	土壤全镉含量下降59%	糙米 0.17	食用
水稻 ^[56-57]	盆栽轮作	钙镁磷肥(4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 磷矿粉(50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.85	7.28	植株镉积累量提升36%~ 58%	糙米 0.21~0.24	饲用
水稻 ^[59]	盆栽轮作	硫酸(0.5~2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 水分管理	1.33	6.50	土壤镉去除率提升15%~ 40%	糙米 0.04~0.09	食用
小白菜 ^[61]	盆栽轮作三季	海泡石(10~20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、 石灰(2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	0.58	4.97	地上部镉含量下降52%~ 71%	地上部 0.11	食用

注:^a间套作种植模式中指间套作与非间套作相比修复效果提升;轮作种植模式中指调控剂施加使修复效果提升。^b食用标准参照《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017),籽粒Cd $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,谷类Cd $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,叶菜类Cd $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$;茎叶饲用标准参照《饲料卫生标准》(GB 13078—2017),Cd $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

Note:^a refers to the restoration effect of intercropping is improved compared with non-intercropping in the intercropping planting mode; the restoration effect of the regulator is improved in the rotation planting mode. ^b refers to the food standard referring to the GB 2762—2017, grain Cd $\leq 0.1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, cereal Cd $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, leafy vegetables Cd $\leq 0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; stem and leaf feeding standard refers to the GB 13078—2017, Cd $\leq 1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

施活化剂、钝化剂,且与低积累作物间作、轮作,同时结合相应田间农艺措施进行修复。由于田间条件复杂、土壤有效镉含量多变,上述修复技术实际推广时仅依据实验室修复结果推测田间修复效果的误差会较大,需加强伴矿景天田间修复的相关研究^[62]。

5 伴矿景天修复镉污染土壤的效果强化

我国农田土壤镉污染程度相对较轻,植物可利用的有效态镉较少,且伴矿景天生物量较小,严重制约了修复效率的提升,延长了修复周期。如何增加土壤有效态镉含量、增大伴矿景天生物量是提高修复效果的关键。为进一步提升伴矿景天修复土壤镉污染技术的实用性,目前分别从物理、化学和生物措施等方面展开相关研究(图4)。

5.1 物理措施

物理措施主要通过调控伴矿景天生长的水、肥、光、热、气等,有效提升其生物量,强化其修复效果^[63]。例如,当土壤水分含量达到最大田间持水量的70%时,伴矿景天地上部生物量最大^[13];光照强度亦可影响伴矿景天生长,光照强度小于 $400 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,伴矿景天地上部生长受限,修复效率显著下降^[12];覆膜处理可保持温度、减少土壤水分蒸发,使其地上部

生物量提高25%^[64],秸秆覆盖也能使伴矿景天生物量提高10%~12%、镉积累量提高14%~21%^[54,65]。土壤紧实度不同程度地限制了伴矿景天的根系生长,与现状土相比,低、高压实处理使其地上部生物量分别下降67%和84%,从而降低镉修复效率^[66]。影响伴矿景天生物量的农艺因素很多,目前并未研究不同措施综合影响的结果,还需通过田间实验进一步评估农艺调控措施的改良效果。

5.2 化学措施

化学措施主要通过调节土壤中镉和营养元素的有效性,促进伴矿景天生长和对镉的吸收,强化其修复效果。向土壤中添加活化剂、改良剂(表4),可增加土壤有效镉浓度,强化修复效果。常见的镉活化剂有柠檬酸、草酸、EDTA等,其能使土壤有效态镉含量增加8%~13%,伴矿景天镉积累量增加21%~33%^[67-70]。有机肥是常用的土壤改良剂,能使伴矿景天镉积累量提高23%~95%^[62,71]。羟基磷灰石和钙镁磷肥不仅可为伴矿景天提供生长必需的磷元素,前者还能将土壤有效镉含量降低50%^[72],后者能将伴矿景天镉积累量提高60%^[73]。向土壤中添加活化剂或改良剂虽简单有效,但实际应用中需考虑成本和后续稳定效果,以及活化剂、改良剂对土壤质量的影响。

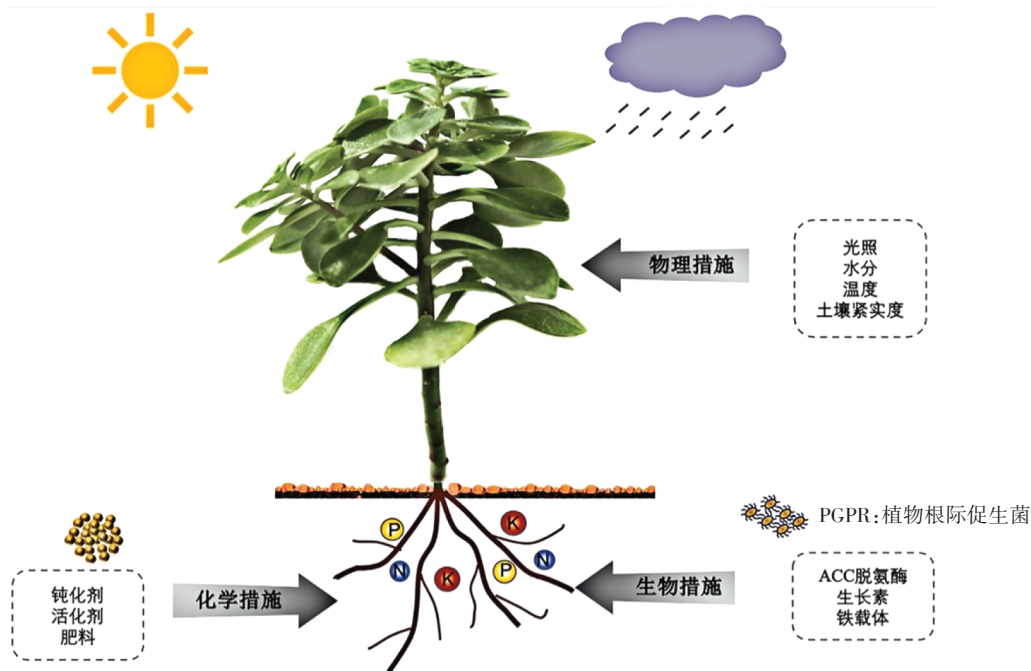


图4 伴矿景天农田镉污染修复效果的强化措施

Figure 4 Technologies to promote the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola* for the cadmium contaminated farmland soils

合理配施肥料可促进伴矿景天生长,并增加镉的有效性,提升修复效果。修复时配施氮磷肥(N 200 mg·kg⁻¹、P 60 mg·kg⁻¹)可使伴矿景天地上部干质量提升215%;施加钾肥(160 mg·kg⁻¹)时地上部镉含量增加28%^[74]。氮肥形态也会影响伴矿景天的修复效果^[75]。施用硝态氮肥能够促进镉从根到地上部的吸收和转运^[76],施用铵态氮肥导致根际pH下降,土壤镉有效性增强^[77]。水培条件下施用硝态氮后伴矿景天的修复效率较施用铵态氮更高。这是由于NH₄⁺与

Cd²⁺竞争吸附根表位点,从而降低了根对镉的吸收^[78]。盆栽条件下施用硝态氮的伴矿景天修复效率低于施用铵态氮,这是由于伴矿景天能快速吸收利用NH₄⁺而促进自身生长,生物量明显高于硝态氮处理^[76]。综上所述,田间修复时应考虑合理配施不同形态肥料,强化伴矿景天修复效果。

5.3 生物措施

某些特定动物或微生物与伴矿景天共生,能提高伴矿景天根系对土壤养分的吸收利用,增加植物生物

表4 伴矿景天修复镉污染土壤效果强化的化学措施及其强化效果

Table 4 Chemical technologies and its remediation efficiency promotion of *Sedum plumbizincicola* for the cadmium contaminated soils

添加剂 Amendment	pH	总镉 Total Cd/(mg·kg ⁻¹)	施用量 Application	土壤有效态镉 ^a Available Cd	修复效果 ^a Remediation efficiency
EDTA ^[79]	5.37	3.91	1~5 mmol·L ⁻¹ 溶液	升高8%~59%	植株镉积累量提升75%~139%
柠檬酸 ^[67]	4.96	1.85	1 mmol·L ⁻¹ 溶液	升高14%	修复效率提升9%
草酸 ^[67]	4.96	1.85	1 mmol·L ⁻¹ 溶液	升高16%	修复效率提升14%
FeCl ₃ 、柠檬酸 ^[80]	5.59	1.77	20 mmol·L ⁻¹ FeCl ₃ 淋洗 40 mmol·L ⁻¹ 柠檬酸	降低56%	土壤镉去除率提升32%
水稻秸秆粉 ^[71]	4.73	0.75	10~30 g·kg ⁻¹	降低13%~38%	植株镉积累量提升23%~95%
羟基磷灰石 ^[72]	4.35	1.32	20 g·kg ⁻¹	降低50%	—
硫肥 ^[58]	6.78	28.30	1.8~2.8 g·kg ⁻¹	升高32%~137%	土壤镉去除率提升107%~118%
硫肥 ^[81]	6.85	1.33	0.75~3.00 g·kg ⁻¹	升高850%~2 550%	土壤镉去除率提升8%~46%
钙镁磷肥 ^[73]	4.69	2.91	2.35~9.39 g·kg ⁻¹	降低12%~19%	植株镉积累量提升60%

注:^a指施加调控剂与空白相比,伴矿景天修复效果变化。

Note:^a refers to the improvement of the repairing effect of *Sedum plumbizincicola* while the amendments compared with the blank.

量。同时,生物也通过自身生长代谢分泌小分子有机酸增加土壤有效态镉含量,促进伴矿景天对镉的富集,提升污染土壤镉修复效率。土壤动物(如蚯蚓)是土壤生物的重要组成部分,蚯蚓的生长代谢活动能有效改善土壤结构,加快养分循环,增强伴矿景天的养分吸收,使生物量提高106%、镉积累量提高72%,显著强化了修复效果^[82]。

土壤微生物可促进富集植物生长,并增加土壤镉有效性,提升修复效率,现已明确与伴矿景天共生的微生物如表5所示^[83]。伴矿景天根际土壤中分离的本土促生微生物主要通过分泌促生物质、活化土壤养分和镉来提高伴矿景天生物量,从而促进镉的吸收;从伴矿景天体内分离的E2S2和E6S菌株及从根际土壤中分离的SC2b和RC6b菌株,均能分泌ACC脱氨酶和吡啶乙酸等物质,不但可促进伴矿景天生长,且能活化镉和磷酸盐,增加有效镉浓度的同时改善磷营养状况,使伴矿景天干质量分别提高32%、28%、42%、22%,镉含量分别提高44%、32%、14%、57%,修复效果显著增强^[30,84-86]。伴矿景天根际土壤中分离的耐镉真菌NSE1菌株的细胞壁能够吸附钝化镉从而降低镉有效性,同时能分泌促生物质、活化磷促进伴矿景天生长,使伴矿景天干质量和镉含量分别提高46%和6%^[87]。另一种景天科植物*Sedum X Graptosedum*根际分离的NSX2菌株与伴矿景天共生,显著提高了根际微生物群落活性,使叶片总叶绿素含量提高了25%,伴矿景天镉积累量增加了22%^[88]。目前根际微生物联合超富集植物修复土壤镉污染的研究是以单

个微生物菌株为主,而越来越多的研究表明,除了根际促生菌外,本土微生物种群也是影响伴矿景天修复效率的关键,但二者交互作用对修复效率的影响尚不明确^[89]。

除接种本土促生微生物强化伴矿景天修复效果外,接种其他具有促生作用的微生物也可强化伴矿景天的修复效果。如木霉菌(*Trichoderma reesei*)与伴矿景天联合修复镉污染土壤时,木霉菌的代谢物能溶解难溶态铁、钙、锰、磷等,增加养分元素的生物有效性,提高伴矿景天对养分元素的利用效率^[90];木霉菌也可分泌生长素、ACC脱氨酶和铁载体^[91],显著提高土壤微生物数量和代谢活性^[92],提高伴矿景天生物量,使镉积累量提升26%~49%。伴矿景天与耐镉菌(Cadmium-tolerant strain m6)联合修复时,耐镉菌不但提高了土壤微生物活性和群落结构多样性,而且能活化土壤中的残渣态镉,使有效态镉含量增加了11%^[93]。接种巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*)后,土壤有效镉、磷、钾含量分别提高15%~45%、8%~19%、1%~31%,伴矿景天镉积累量增加41%~169%^[94]。伴矿景天接种微生物可极大提升修复效果,并改善土壤生态,是一种绿色高效的修复方法。未来需进一步加强对耐镉、促生微生物的筛选,为植物-微生物联合修复提供理论依据和实验支撑。

6 伴矿景天产后处理技术

随着植物修复技术进入田间示范和应用阶段,超富集植物的产后处理问题亟待解决。每公顷伴矿景

表5 强化伴矿景天修复镉污染土壤效果的微生物

Table 5 Microorganisms for promoting the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola* for the cadmium contaminated soils

微生物 Microorganism	最低镉抑制 浓度 Minimum inhibitory concentration/ (mg·L ⁻¹)	强化机理 Enhancing mechanism	pH	镉全量 Total Cd/ (mg· kg ⁻¹)	接种微生物的修复效果提升 Remediation efficiency*/%		
					干质量 Dry weight	镉含量 Cd concentration	镉积累量 Cd uptake
<i>Bacillus pumilus</i> E2S2 ^[80]	400	分泌 ACC 脱氨酶、吡啶乙酸和铁载体;活化磷、镉	8.1	5.9	32	44	—
E6S ^[85]	300	分泌 ACC 脱氨酶、吡啶乙酸;活化磷、镉	8.1	5.9	28	32	—
<i>Bacillus</i> sp. SC2b ^[86]	300	分泌 ACC 脱氨酶、吡啶乙酸和铁载体;活化磷、镉	8.1	5.9	42	14	—
<i>P. myrsinacearum</i> RC6b ^[84]	350	分泌 ACC 脱氨酶,吡啶乙酸和铁载体;活化磷、镉	8.1	5.9	22	57	—
<i>Cryptococcus</i> sp. NSE1 ^[87]	1 000	分泌 ACC 脱氨酶;活化磷、镉;细胞壁钝化镉	4.53	0.7	46	6	—
<i>Rhodococcus</i> sp. NSX2 ^[88]	—	增加伴矿景天叶绿素含量和根际微生物活性	5.16	10.2	0	22	—
<i>Trichoderma reesei</i> ^[90-92]	300	分泌吡啶乙酸、赤霉素和铁载体;活化钙、铁、锰、磷	5.38	15	—	—	26~49
Cadmium-tolerant strain m6 ^[93-95]	—	活化镉和增强根际微生物活性	7.0	3.1	—	21	—
<i>Bacillus megaterium</i> ^[94]	—	活化磷、钾、镉	4.95	0.69	36~67	34~60	41~169

注:*指接种微生物与不接种微生物相比的修复效果强化。
Note: * refers to the enhanced repairing effect of inoculating microorganisms compared with non-inoculating microorganisms.

天生物质产量高达 $12\text{ t}^{[96]}$,其不仅富含大量重金属,同时也是潜在的生物质能源。伴矿景天生物质再利用不合理,不仅会导致巨大的环境风险,而且会造成资源的浪费。因此,大量富含重金属的生物质的处理技术应基于减量化、无害化和资源化原则,将重金属从生物质中提取出来,并将生物质转化为能源。

基于减量化原则,可通过破碎压榨、焚烧法等处理伴矿景天生物质。破碎压榨法是将伴矿景天鲜样分成残渣和汁液,再加入聚合氯化铝絮凝、NaOH碱化、三硫三嗪钠盐络合,该方法可将汁液中的镉含量降低至 $0.07\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,低于《污水综合排放标准》(GB 8978—1996)^[97-98]。焚烧法可降低生物质质量,使灰分中镉生物有效态含量和浸出毒性分别降低25%和56%。上述两种方法工艺简单、成本较低,但未实现生物质资源化,且处理过程易导致二次污染^[99]。

基于无害化原则,可通过共燃烧法处理伴矿景天生物质^[100-102]。温度、氧气含量、共燃烧物质配比均可影响镉在燃烧产物中的分布,其中温度的影响最大。伴矿景天与煤在高温条件下可形成 CdSO_4 、 CdO 等固体底灰,在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 、10%煤炭比、21%含氧量条件下可将74%的镉固定在底灰中;伴矿景天与污泥在高温条件下可形成 CdSiO_3 、 CdO 等固体底灰,且污泥中的 SiO_2 、 Al_2O_3 也可吸附镉,在 $650\text{ }^\circ\text{C}$ 、30%污泥比条件下可将98%的镉固定在底灰中,最大程度降低了挥发和飞灰形态镉的损失。共燃烧法虽工艺简单、能处理多种废弃物,但其能耗较高,且未实现生物质资源化。

基于资源化原则,可通过热解、水热液化、超临界水气化等方法处理伴矿景天生物质。伴矿景天热解后镉生物有效态含量和浸出毒性分别降低35%和62%,产生的生物炭负载硫制成的 $\text{CdS}@\text{C}$ 纳米光催化材料,可作为高效光催化剂用于有机污染物的光降解^[103-104]。水热液化法则可将伴矿景天分解为生物质油、重油和水热炭,镉主要分布在水热炭中,在重油中含量小于10%^[105-107]。超临界水气化法则是将伴矿景天分解为氢气、生物质油和生物炭,99%的镉固定在生物炭中^[108-109]。上述方法可实现生物质资源的高效安全利用,但缺点是工艺相对复杂,推广难度较大,后续研究应进一步关注生物炭中镉的安全性。

近年来伴矿景天产后处理技术发展迅速,基本可以实现减量化、无害化处理。目前虽已掌握将其转化为高性能燃料、生物炭和生物质油等资源化的方法,但应用推广仍受到以下因素制约:(1)大量的生物质收集与处理极其费时费力,包括收割、运输、干燥、粉

碎等基本回收步骤,尚未形成完整处理流程;(2)干物质处理成本高,现有的分解生物质所需的设备和技术体系并不符合低能耗、高效率和无污染的要求;(3)生物质处理工艺流程需简单、易操作,且保证资源化产物安全无污染,确保回收工艺不产生粉尘等二次污染物,且回收的生物质油和生物炭镉含量达到安全利用标准。因此,有必要继续开发伴矿景天产后处理资源化技术,完善生物质回收处理流程,加大低能耗、高效率、易操作设备的研发力度,完善工艺处理链,加强生产过程和产物再利用的环境风险评估,以实现伴矿景天田间修复技术的大范围推广和应用。

7 展望

植物修复作为经济有效的方法在农田土壤重金属修复领域受到广泛关注。当前,我国农田土壤镉污染的伴矿景天修复技术理论相对成熟,但仍存在不足之处:

(1)伴矿景天根际特性、富集解毒机理已基本明确,未来可基于分子技术和基因工程技术等生物学手段,一方面加强伴矿景天对环境的适应性,拓宽其适宜种植区域,另一方面开发更多具有高生物量和高累积量的超富集植物,提高植物修复效率。

(2)田间修复中,伴矿景天可与农作物间作或轮作,并配施钝化剂、活化剂等,达到修复效果的同时实现农产品安全生产,但其推广应用仍相对薄弱。结合我国不同地域的土壤、气候特征和农业发展趋势,应筛选适合与伴矿景天间套作的低积累作物,并建立适宜的种植模式,真正实现镉污染土壤的边生产边修复。

(3)伴矿景天可通过焚烧法、热解法、水热液化法、超临界水气化等方法制成高性能的生物炭和生物质油,实现生物质资源的高效安全利用。现有处理技术仍受成本高、效率低、工艺复杂、易产生二次污染等因素的制约。未来需进一步拓宽伴矿景天生物质高附加值资源化利用途径,完善资源化工艺处理链,加强产后处理过程和产物再利用的环境风险评估,实现农田土壤镉污染的绿色可持续修复。

参考文献:

- [1] 生态环境部. 生态环境部发布2020年全国生态环境质量简况[EB/OL]. (2021-03-02) [2021-09-14]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202103/t20210302_823100.html. Ministry of Ecology and Environment. The Ministry of Ecology and Environment released a summary of China's ecological and environmental quality in

- 2020 [EB/OL]. (2021-03-02)[2021-09-14]. http://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk15/202103/t20210302_823100.html.
- [2] 徐建明, 孟俊, 刘杏梅, 等. 我国农田土壤重金属污染防治与粮食安全保障[J]. 中国科学院院刊, 2018, 33(2): 153–159. XU J M, MENG J, LIU X M, et al. Control of heavy metal pollution in farmland of China in terms of food security[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 153–159.
 - [3] 赵首萍, 叶雪珠, 张祺, 等. 重金属污染土壤几种生物修复方式比较[J]. 中国农学通报, 2020, 36(20): 83–91. ZHAO S P, YE X Z, ZHANG Q, et al. Soil contaminated by heavy metals: Comparison of bioremediation methods[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2020, 36(20): 83–91.
 - [4] 卢红玲, 肖光辉, 刘青山, 等. 土壤镉污染现状及其治理措施研究进展[J]. 南方农业学报, 2014, 45(11): 1986–1993. LU H L, XIAO G H, LIU Q S, et al. Advances in soil Cd pollution and solution measures[J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2014, 45(11): 1986–1993.
 - [5] 何启贤. 镉超富集植物筛选研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2013, 33(1): 46–49. HE Q X. Advances in research on screening of cadmium hyperaccumulators[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2013, 33(1): 46–49.
 - [6] 蒋先军, 骆永明, 赵其国. 重金属污染土壤的植物修复研究Ⅲ. 金属富集植物 *Brassica juncea* 对镉的吸收和积累[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 664–670. JIANG X J, LUO Y M, ZHAO Q G. Study on phytoremediation of heavy metal polluted soils Ⅲ. Cadmium and zinc uptake and accumulation by indian mustard (*Brassica juncea*) [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2002, 39(5): 664–670.
 - [7] 刘威, 束文圣, 蓝崇钰. 宝山堇菜 (*Viola baoshanensis*)——一种新的镉超富集植物[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2046–2049. LIU W, SHU W S, LAN C Y. *Viola baoshanensis*: A new cadmium hyperaccumulator[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2003, 48(19): 2046–2049.
 - [8] 汤叶涛, 仇荣亮, 曾晓雯, 等. 一种新的多金属超富集植物——圆锥南芥 (*Arabis paniculata* L.) [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2005, 44(4): 135–136. TANG Y T, QIU R L, ZENG X W, et al. A new found Pb/Zn/Cd hyperaccumulator: *Arabis Paniculata* L. [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(4): 135–136.
 - [9] 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 L H, ZHOU S B, BI D, et al. *Sedum plumbizincicola*, a new species of the Crassulaceae from Zhejiang, China [J]. *Soil*, 2006, 38(5): 632–633.
 - [10] WU L H, LI Z, AKAHANE I, et al. Effects of organic amendments on Cd Zn and Cu bioavailability in soil with repeated phytoremediation by *Sedum plumbizincicola* [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(10): 1024–1038.
 - [11] 李思亮, 李娜, 徐礼生, 等. 不同生境下镉在伴矿景天不同叶龄叶中的富集与分布特征[J]. 土壤, 2010, 42(3): 446–452. LI S L, LI N, XU L S, et al. Characters of Zn and Cd accumulation and distribution in leaves of *Sedum plumbizincicola* at different ages [J]. *Soil*, 2010, 42(3): 446–452.
 - [12] 李娜, 唐明灯, 崔立强, 等. 光照强度对伴矿景天生长和镉吸收性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 370–373. LI N, TANG M D, CUI L Q, et al. Effects of light intensity on plant growth and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola* [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(2): 370–373.
 - [13] 崔立强, 吴龙华, 李娜, 等. 水分特征对伴矿景天生长和重金属吸收性的影响[J]. 土壤, 2009, 41(4): 572–576. CUI L Q, WU L H, LI N, et al. Effects of soil moisture on growth and uptake of heavy metals of *Sedum plumbizincicola* [J]. *Soils*, 2009, 41(4): 572–576.
 - [14] LU L, TIAN S, ZHANG M, et al. The role of Ca pathway in Cd uptake and translocation by the hyperaccumulator *Sedum alfredii* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 183(1): 22–28.
 - [15] 曹雪莹, 谭长银, 谢雨呈, 等. 土壤 pH 和 Cd 含量对伴矿景天修复效率的影响[J]. 环境科学研究, 2019, 32(9): 1604–1612. CAO X Y, TAN C Y, XIE Y C, et al. Effect of soil pH and total cadmium concentration of soil on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola* [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(9): 1604–1612.
 - [16] 李造煌, 杨文毅, 邹佳玲, 等. 钙镁磷肥对土壤 Cd 生物有效性和糙米 Cd 含量的影响[J]. 环境科学学报, 2017, 37(6): 2322–2330. LI Z H, YANG W T, ZOU J L, et al. Effects of calcium magnesium phosphate fertilizer on Cd bioavailability in soil and Cd contents in rice [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(6): 2322–2330.
 - [17] LI L Z, TU C, WU L H, et al. Pathways of root uptake and membrane transport of Cd²⁺ in the zinc/cadmium hyperaccumulating plant *Sedum plumbizincicola* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2017, 36(4): 1038–1046.
 - [18] 莫基浩. 拟南芥根细胞壁中的果胶含量对植物抗镉胁迫的影响[D]. 杭州: 浙江大学, 2010. MO J H. The effect of pectin content in root cell wall of *Arabidopsis* on its resistant to cadmium stress [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2010.
 - [19] ANDRADE L R, LEAL R N, NOSEDA M, et al. Brown algae overproduce cell wall polysaccharides as a protection mechanism against the heavy metal toxicity [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2010, 60(9): 1482–1488.
 - [20] PENG J S, WANG Y J, DING G, et al. A pivotal role of cell wall in cadmium accumulation in the Crassulaceae hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. *Molecular Plant*, 2017, 10(5): 771–774.
 - [21] HUANG R, DONG M L, MAO P, et al. Evaluation of phytoremediation potential of five Cd(hyper)accumulators in two Cd contaminated soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 721: 137581.
 - [22] ZHOU J W, LI Z, LI M S, et al. Cadmium isotopic fractionation in the soil-plant system during repeated phytoextraction with a cadmium hyperaccumulating plant species [J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(21): 13598–13609.
 - [23] SUN L J, CAO X Y, TAN C Y, et al. Analysis of the effect of cadmium stress on root exudates of *Sedum plumbizincicola* based on metabolomics [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 205: 111152.
 - [24] LUTTGE U. Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM) [J]. *Annals of Botany*, 2004, 93(6): 629–652.
 - [25] CUI H B, FAN Y C, YANG J, et al. *In situ* phytoextraction of copper and cadmium and its biological impacts in acidic soil [J]. *Chemosphere*, 2016, 161: 233–241.
 - [26] HE H D, YE Z H, YANG D J, et al. Characterization of endophytic *Rahnella* sp. JN6 from *Polygonum pubescens* and its potential in pro-

- moting growth and Cd, Pb, Zn uptake by *Brassica napus*[J]. *Chemosphere*, 2013, 90(6):1960–1965.
- [27] HOU J Y, LIU W X, WU L H, et al. Modulation of the efficiency of trace metal phytoremediation by *Sedum plumbizincicola* by microbial community structure and function[J]. *Plant and Soil*, 2017, 421(1/2): 285–299.
- [28] LI M R, GUO J F, JIANG M, et al. Effects of hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* intercropped with maize and castor on soil microbes and enzyme activities under field conditions[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2020, 1549(2):22–28.
- [29] 柏佳. 伴矿景天内生菌提取及其在镉污染土壤修复中的作用[D]. 长沙:湖南师范大学, 2020. BAI J. Extraction of endophytic bacteria in *Sedum plumbizincicola* and its role in cadmium contaminated soil remediation[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020.
- [30] MA Y, OLIVEIRA R S, NAI F, et al. The hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* harbors metal-resistant endophytic bacteria that improve its phytoextraction capacity in multi-metal contaminated soil [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 152:62–69.
- [31] JOSE F, JOSE C, PAULO R, et al. Aluminum effect on organic acid production and accumulation in *Sorghum*[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(3):507–520.
- [32] ZHANG S, SONG J, GAO H, et al. Improving prediction of metal uptake by Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.) based on a soil-plant stepwise analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 569/570:1595–1605.
- [33] ZHOU J W, LI Z, ZHOU T, et al. Aluminum toxicity decreases the phytoextraction capability by cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in acid soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 711:134591.
- [34] 居述云. 伴矿景天金属硫蛋白基因 *SpMT2a* 和 *SpMT2b* 的克隆及功能分析[D]. 南京:南京农业大学, 2015. JU S Y. Cloning and functional analysis of *SpMT2a* and *SpMT2b*, two metallothionein genes from *Sedum plumbizincicola*[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [35] 彭佳师, 易红英, 龚继明. 超积累植物伴矿景天镉耐受基因 *SpMT2* 的分离及功能鉴定[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3):541–548. PENG J S, YI H Y, GONG J M. Isolation and characterization of cadmium tolerant gene *SpMT2* in the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):541–548.
- [36] PENG J S, DING G, MENG S, et al. Enhanced metal tolerance correlates with heterotypic variation in *SpMTL*, a metallothionein-like protein from the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2017, 40(8):1368–1378.
- [37] 彭佳师, 丁戈, 易红英, 等. 伴矿景天植物螯合肽合酶基因的克隆及功能分析[J]. 植物生理学报, 2014, 50(5):625–633. PENG J S, DING G, YI H Y, et al. Cloning and functional analysis of phytochelatin synthase gene from *Sedum plumbizincicola*[J]. *Plant Physiology Journal*, 2014, 50(5):625–633.
- [38] 张军, 束文圣. 植物对重金属镉的耐受机制[J]. 植物生理与分子生物学学报, 2006, 32(1):1–8. ZHANG J, SHU W S. Tolerance mechanism of plant to heavy metal cadmium[J]. *Physiology and Molecular Biology of Plants*, 2006, 32(1):1–8.
- [39] HUANG J, ZHANG Y, PENG J S, et al. Fission yeast *HMT1* lowers seed cadmium through phytochelatin-dependent vacuolar sequestration in *Arabidopsis*[J]. *Plant Physiology*, 2012, 158(4):1779–1788.
- [40] 常娜, 姚舜禹, 陈德光, 等. 重金属镉的转运蛋白研究进展[J]. 生命的化学, 2018, 38(3):483–490. CHANG N, YAO S Y, CHEN D G, et al. Research progress on the mechanisms of cadmium transport [J]. *Chemistry of Life*, 2018, 38(3):483–490.
- [41] ZHANG J, ZHANG M, SHOHAG M J I, et al. Enhanced expression of *SaHMA3* plays critical roles in Cd hyperaccumulation and hypertolerance in Cd hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance[J]. *Planta*, 2016, 243(3):577–589.
- [42] LIU H, ZHAO H, WU L, et al. Heavy metal ATPase 3 (*HMA3*) confers cadmium hypertolerance on the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *New Phytologist*, 2017, 215(2):687–698.
- [43] ZHAO H, WANG L, ZHAO F J, et al. *SpHMA1* is a chloroplast cadmium exporter protecting photochemical reactions in the Cd hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2019, 42(4):1112–1124.
- [44] 韩煦. 重金属抗性相关基因 *SpHMA2* 与 *CusF* 在伴矿景天中的功能研究[D]. 北京:中国林业科学研究院, 2019. HAN X. Functional study of heavy metal resistance-related genes *SpHMA2* and *CusF* in *Sedum plumbizincicola*[D]. Beijing: Chinese Academy of Forestry, 2019.
- [45] NAKAMURA S, SUZUI N, NAGASAKA T, et al. Application of glutathione to roots selectively inhibits cadmium transport from roots to shoots in oilseed rape[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(4):1073–1081.
- [46] 张玉秀, 于飞, 张媛雅, 等. 植物对重金属镉的吸收转运和累积机制[J]. 中国生态农业学报, 2008, 16(5):1317–1321. ZHANG Y X, YU F, ZHANG Y Y, et al. Uptake, translocation and accumulation of cadmium in plant[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2008, 16(5):1317–1321.
- [47] 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5):10–11. Report on the national general survey of soil contamination[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5):10–11.
- [48] 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 J J, YOU S H, WU J L, 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.
- [49] 陈国皓, 祖艳群, 湛方栋, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9):2103–2110. CHEN G H, ZU Y Q, ZHAN F D, et al. Effects of passivators on the growth and cadmium accumulation of intercropped maize and *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(9):2103–2110.
- [50] 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 L Y. The effect and mechanism of crop intercropping on heavy metal absorption[D]. Hangzhou: Zhejiang University,

- sity, 2012.
- [51] 武帅, 许佳霖, 张进, 等. 生物质炭协同伴矿景天-玉米间作修复镉镍复合污染土壤研究[J]. 科技通报, 2019, 35(2): 205-212, 219. WU S, XU J L, ZHANG J, 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.
- [52] 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 L. Research on the continuous field phytoremediation of zinc and cadmium contaminated soil[D]. Guiyang: Guizhou University, 2015.
- [53] 彭曦. 镉污染农田土壤植物修复的强化措施及其效果研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2020. PENG X. Study on strengthening measures and effects of phytoremediation of Cd-contaminated farmland soil[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2020.
- [54] 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.
- [55] HU P J, ZHANG Y, DONG B, et al. Assessment of phytoextraction using *Sedum plumbizincicola* and rice production in Cd-polluted acid paddy soils of south China: A field study[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2019, 286: 106651.
- [56] 沈丽波. 伴矿景天-水稻轮作修复镉污染土壤之调控技术及机理初探[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2010. SHEN L B. Control measures and preliminary research on the mechanisms for phytoremediation of zinc, cadmium contaminated soil under *Sedum plumbizincicola*-*Oryza sativa* rotation system[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2010.
- [57] 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 L B, WU L H, TAN W N, 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.
- [58] FAN Y Q, LI Z, ZHOU T, et al. Phytoextraction potential of soils highly polluted with cadmium using the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2019, 21(8): 733-741.
- [59] WU G M, HU P J, ZHOU J W, et al. Sulfur application combined with water management enhances phytoextraction rate and decreases rice cadmium uptake in a *Sedum plumbizincicola* - *Oryza sativa* rotation [J]. *Plant and Soil*, 2019, 440(1/2): 539-549.
- [60] ZHOU J C, SONG F P, LU Y Y, et al. Phytoremediation potential of wheat intercropped with different densities of *Sedum plumbizincicola* in soil contaminated with cadmium and zinc[J]. *Chemosphere*, 2021, 276: 130223.
- [61] 朱上游. Cd污染农田土壤的伴矿景天修复及安全利用研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019. ZHU S Y. Study on the phytoremediation by *Sedum plumbizincicola* and safety utilization for Cd contaminated farmland soil[D]. Changsha: Hunan Normal University, 2019.
- [62] ZHOU J W, ZHOU T, LI Z, et al. Differences in phytoextraction by the cadmium and zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* in greenhouse, polytunnel and field conditions[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2018, 20(14): 1400-1407.
- [63] 冯子龙, 卢信, 张娜, 等. 农艺强化措施用于植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 14-20. FENG Z L, LU X, ZHANG N, et al. Research progress of agronomic enhancement measures for phytoremediation of soil contaminated by heavy metals[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(2): 14-20.
- [64] 殷志遥, 和君强, 秦华, 等. 覆膜对伴矿景天生长和吸镉动态影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(5): 1043-1050. YIN Z Y, HE J Q, QIN H, et al. Effect of film mulching on plant growth and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(5): 1043-1050.
- [65] ZHOU T, WU L H, CHRISTINE P, et al. The efficiency of Cd phytoextraction by *Sedum plumbizincicola* increased with the addition of rice straw to polluted soils: The role of particulate organic matter[J]. *Plant and Soil*, 2018, 429(1/2): 321-333.
- [66] 王丽丽, 周通, 李柱, 等. 土壤紧实度对伴矿景天生长及镉吸收性的影响研究[J]. 土壤, 2017, 49(5): 951-957. WANG L L, ZHOU T, LI Z, et al. Effects of soil compaction on phytoextraction of cadmium and zinc polluted soils by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2017, 49(5): 951-957.
- [67] 柏佳, 谭长银, 曹雪莹, 等. 3种有机酸对伴矿景天修复效率及土壤微生物数量的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(2): 318-324. BAI J, TAN C Y, CAO X Y, et al. Effect of three organic acids on the remediation efficiency of *Sedum plumbizincicola* and soil microbial quantity[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(2): 318-324.
- [68] 吴孟君, 张德馨, 胡宏祥, 等. 不同活化剂对伴矿景天富集镉的影响[J]. 惠州学院学报, 2020, 40(3): 36-41. WU M J, ZHANG D X, HU H X, et al. The effect of different activators on cadmium accumulation in *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Huizhou University*, 2020, 40(3): 36-41.
- [69] HOU S Z, WANG X, SHAFI M, et al. Remediation efficacy of *Sedum plumbizincicola* as affected by intercropping of landscape plants and oxalic acid in urban cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(10): 3512-3520.
- [70] LI Z, JIA M Y, WU L H, et al. Changes in metal availability, desorption kinetics and speciation in contaminated soils during repeated phytoextraction with the Zn/Cd hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 209: 123-131.
- [71] 邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 有机物料对镉污染酸性土壤伴矿景天修复效率的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(12): 2762-2770. DENG Y Q, CAO X Y, TAN C Y, et al. Effect of organic materials on phytoremediation efficiency of Cd-contaminated acid soil by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(12): 2762-2770.
- [72] 孙婷婷, 徐磊, 周静, 等. 羟基磷灰石-植物联合修复对Cu/Cd污染植物根际土壤微生物群落的影响[J]. 土壤, 2016, 48(5): 946-953. SUN T T, XU L, ZHOU J, et al. Effects of combined remediation of hy-

- droxyapatite-plants on rhizosphere microbial community of Cu/Cd contaminated soil[J]. *Soils*, 2016, 48(5):946-953.
- [73] 陈思宇, 周嘉文, 刘鸿雁, 等. 改良剂对酸性土壤上伴矿景天铅毒缓解作用及镉锌吸收性的影响[J]. *生物工程学报*, 2020, 36(3): 529-540. CHEN S Y, ZHOU J W, LIU H Y, et al. Effects of amendments on the alleviation of aluminum toxicity and cadmium and zinc uptake by *Sedum plumbizincicola* in acid soils[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):529-540.
- [74] 沈丽波, 吴龙华, 韩晓日, 等. 养分调控对超积累植物伴矿景天生长及镉锌吸收性的影响[J]. *土壤*, 2011, 43(2):221-225. SHEN L B, WU L H, HAN X R, et al. Effects of nutrient regulation and control on plant growth and Zn/Cd uptake by hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Soils*, 2011, 43(2):221-225.
- [75] ARNAMWONG S, WU L H, HU P J, et al. Phytoextraction of cadmium and zinc by *Sedum plumbizincicola* using different nitrogen fertilizers, a nitrification inhibitor and a urease inhibitor[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17:382-390.
- [76] 汪洁, 沈丽波, 李柱, 等. 氮肥形态对伴矿景天生长和镉锌吸收性的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11):2118-2124. WANG J, SHEN L B, LI Z, et al. Effects of nitrogen forms on growth and Zn/Cd Uptake of *Sedum plumbizincicola*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11):2118-2124.
- [77] ZACCHEO P, CRIPPA L, PASTA V D. Ammonium nutrition as a strategy for cadmium mobilisation in the rhizosphere of sunflower[J]. *Plant and Soil*, 2007, 301(1/2):325-325.
- [78] HU P, YIN Y G, ISHIKAWA S, et al. Nitrate facilitates cadmium uptake, transport and accumulation in the hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, 20(9):6306-6316.
- [79] XUE Z J, WU M J, HU H X, et al. Cadmium uptake and transfer by *Sedum plumbizincicola* using EDTA, tea saponin, and citric acid as activators[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2021, 23(10): 1052-1060.
- [80] YU X, ZHOU T, ZHAO J, et al. Remediation of a metal-contaminated soil by chemical washing and repeated phytoextraction: A field experiment[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 23(6): 577-584.
- [81] 吴广美, 王青玲, 胡鹏杰, 等. 镉污染中性土壤伴矿景天修复的硫酸强化及其微生物效应[J]. *土壤*, 2020, 52(5):920-926. WU G M, WANG Q L, HU P J, et al. Sulfur assisted cadmium phytoextraction by *Sedum plumbizincicola* and its effect on microbial community in neutral paddy soil[J]. *Soils*, 2020, 52(5):920-926.
- [82] WANG Z N, LI Z, LIU H Y, et al. Effect of *Eisenia foetida* on the metal uptake by *Sedum plumbizincicola* in different types of contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):549-559.
- [83] SULLIVAN T S, MCBRIDE M B, THIES J E. Rhizosphere microbial community and Zn uptake by willow (*Salix purpurea* L.) depend on soil sulfur concentrations in metalliferous peat soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 2013, 67:53-60.
- [84] MA Y, ZHANG C, OLIVEIRA R S, et al. Bioaugmentation with endophytic *Bacterium* E6S homologous to *Achromobacter piechaudii* enhances metal rhizoaccumulation in host *Sedum plumbizincicola*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2016, 7:75.
- [85] MA Y, OLIVEIRA R S, WU L H, et al. Inoculation with metal-mobilizing plant-growth-promoting rhizobacterium *Bacillus* sp. SC2b and its role in rhizoremediation[J]. *Journal of Toxicology and Environmental Health Part A*, 2015, 78(13/14):931-944.
- [86] MA Y, RAJKUMAR M, LUO Y M, et al. Phytoextraction of heavy metal polluted soils using *Sedum plumbizincicola* inoculated with metal mobilizing *Phyllobacterium myrsinacearum* RC6b[J]. *Chemosphere*, 2013, 93(7):1386-1392.
- [87] LIU W X, WANG B B, WANG Q L, et al. Characteristics of metal-tolerant plant growth-promoting yeast (*Cryptococcus* sp. NSE1) and its influence on Cd hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(18):18621-18629.
- [88] HOU J Y, LIU W X, WU L H, et al. *Rhodococcus* sp. NSX2 modulates the phytoremediation efficiency of a trace metal-contaminated soil by reshaping the rhizosphere microbiome[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 133:62-69.
- [89] MUEHE E M, WEIGOLD P, ADAKTYLOU I J, et al. Rhizosphere microbial community composition affects cadmium and zinc uptake by the metal-hyperaccumulating plant *Arabidopsis halleri*[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2015, 81(6):2173-2181.
- [90] 马文亭, 滕应, 凌婉婷, 等. 里氏木霉 FS10-C 对伴矿景天吸取修复镉污染土壤的强化作用[J]. *土壤*, 2012, 44(6):991-995. MA W T, TENG Y, LING W T, et al. Enhancing remediation of *Sedum plumbizincicola* in cadmium contaminated soils by *Trichoderma reesei* FS10-C[J]. *Soils*, 2012, 44(6):991-995.
- [91] KOTASTHANE A, AGRAWAL T, KUSHWAH R, et al. *In-vitro* antagonism of *Trichoderma* spp. against *Sclerotium rolfsii* and *Rhizoctonia solani* and their response towards growth of cucumber, bottle gourd and bitter melon[J]. *European Journal of Plant Pathology*, 2015, 141(3):523-543.
- [92] TENG Y, LUO Y, MA W T, et al. *Trichoderma reesei* FS10-C enhances phytoremediation of Cd-contaminated soil by *Sedum plumbizincicola* and associated soil microbial activities[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 9:220.
- [93] 王京文, 李丹, 柳俊, 等. 耐镉菌株对土壤镉形态及土壤微生物群落结构的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(9):1693-1699. WANG J W, LI D, LIU J, et al. Effects of cadmium tolerant bacteria on soil cadmium forms and microbial community structure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(9):1693-1699.
- [94] 邓月强, 曹雪莹, 谭长银, 等. 巨大芽孢杆菌对伴矿景天修复镉(Cd)污染农田土壤的强化作用[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3111-3118. DENG Y Q, CAO X Y, TAN C Y, et al. Strengthening the effect of *Bacillus megaterium* on remediation of Cd-contaminated farmland soil by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9):3111-3118.
- [95] 周慧芳, 王京文, 李丹, 等. 耐镉菌联合植物吸收对土壤重金属镉污染的修复[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2017, 43(3): 341-349. ZHOU H F, WANG J W, LI D, et al. Remediation of cadmium-tolerant bacteria combined with plant absorption on soil heavy

- metal cadmium pollution[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture and Life Sciences)*, 2017, 43(3):341–349.
- [96] 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 L, WU L H, LI N, et al. Effect of planting densities on yields and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11):3422–3426.
- [97] 王鹏程, 胡鹏杰, 钟道旭, 等. 镉锌超积累植物伴矿景天产后鲜样快速处置技术[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(9):5307–5312. WANG P C, HU P J, ZHONG D X, et al. Rapid disposal technology for fresh biomass of harvested Cd/Zn hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(9):5307–5312.
- [98] 王鹏程. 镉锌超积累植物伴矿景天种苗繁育及产后鲜样快速处置研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. WANG P C. Research on the propagation and rapid disposal for fresh biomass of *Sedum plumbizincicola*: A cadmium and zinc hyperaccumulator[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [99] 武帅. 伴矿景天与经济作物间作修复镉锌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 S. Phytoremediation 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 A&F University, 2018.
- [100] GUO F H, ZHONG Z P, XUE H, et al. Migration and distribution of heavy metals during co-combustion of *Sedum plumbizincicola* and coal[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2018, 9(11):2203–2210.
- [101] GUO F H, ZHONG Z P. Pollution emission and heavy metal speciation from co-combustion of *Sedum plumbizincicola* and sludge in fluidized bed[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 179:317–324.
- [102] GUO F H, ZHONG Z P, XUE H. Partition of Zn, Cd, and Pb during co-combustion of *Sedum plumbizincicola* and sewage sludge[J]. *Chemosphere*, 2018, 197:50–56.
- [103] CHEN Z, XING R Z, TANG J H, et al. Upcycling of Cd hyperaccumulator biomass into a CdS@C nanocomposite with high photocatalytic performance[J]. *Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8:1388–1395.
- [104] 邢睿智. 基于镉超富集植物的CdS@C光催化剂制备及其染料降解性能研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2019. XING R Z. Upcycling of cadmium hyperaccumulators biomass into CdS@C photocatalysts and its application for dye degradation[D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019.
- [105] HE C, ZHANG Z, XIE C D, et al. Transformation behaviors and environmental risk assessment of heavy metals during resource recovery from *Sedum plumbizincicola* via hydrothermal liquefaction[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 410:124588.
- [106] 王夏蕾. 重金属高富集植物水热转化过程研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2018. WANG X L. Studies on the hydrothermal conversion process of heavy-metal highly-accumulated plants[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018.
- [107] ZHONG D X, ZHONG Z P, WU L H, et al. Pyrolysis of *Sedum plumbizincicola*, a zinc and cadmium hyperaccumulator: Pyrolysis kinetics, heavy metal behaviour and bio-oil production[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2016, 18(7):2315–2323.
- [108] SU W, LIU P, CAI C Q, et al. Hydrogen production and heavy metal immobilization using hyperaccumulators in supercritical water gasification[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 402:123541.
- [109] QIAN F, ZHU X D, LIU Y C, et al. Influences of temperature and metal on subcritical hydrothermal liquefaction of hyperaccumulator: Implications for the recycling of hazardous hyperaccumulators[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(4):2225–2234.