

DOI: 10.7524/AJE.1673-5897.20210318002

郭松明, 余海波, 袁龙义. 近20年我国重金属超积累植物种质资源筛选研究进展[J]. 生态毒理学报, 2022, 17(2): 96-108

Guo S M, Yu H B, Yuan L Y. Research progress of screening of germplasm resources of heavy metal hyperaccumulator in recent 20 years in China [J]. Asian Journal of Ecotoxicology, 2022, 17(2): 96-108 (in Chinese)

近20年我国重金属超积累植物种质资源筛选研究进展

郭松明^{1,2}, 余海波^{1,2}, 袁龙义^{1,2,*}

1. 长江大学植物生态与环境修复研究所, 荆州 434025

2. 长江大学园艺园林学院, 荆州 434025

收稿日期: 2021-03-18 录用日期: 2021-08-01

摘要: 土壤重金属污染已成为环境问题的研究热点, 而植物修复技术是一种致力于修复土壤重金属污染的新方法, 其中超积累植物修复是治理土壤重金属污染的关键方法和便捷技术, 是实现人类社会可持续发展的重要手段之一。笔者对我国近20年来的重金属超积累植物的种质资源进行了收集归纳, 对农作物同超积累植物间套作种植的修复应用实例进行了分析列举, 且对超积累植物修复推广的限制因素进行了总结, 并在此研究与应用现状的基础上对超积累植物的界定、应用、筛选和相关试验等一系列研究工作进行了展望, 以期对超积累植物种质资源的筛选与应用提供理论依据和实例参考。

关键词: 重金属污染; 超积累植物; 种质资源; 筛选及应用

文章编号: 1673-5897(2022)2-096-13 中图分类号: X171.5 文献标识码: A

Research Progress of Screening of Germplasm Resources of Heavy Metal Hyperaccumulator in Recent 20 Years in China

Guo Songming^{1,2}, Yu Haibo^{1,2}, Yuan Longyi^{1,2,*}

1. Institute of Plant Ecology and Environment Rehabilitation, Yangtze University, Jingzhou 434025, China

2. College of Horticulture and Landscape Architecture, Yangtze University, Jingzhou 434025, China

Received 18 March 2021 accepted 1 August 2021

Abstract: Nowadays, soil heavy metal pollution has become a major part of environmental problems. Phytoremediation technology is a new method dedicated to the remediation of soil heavy metal pollution, among which hyperaccumulator phytoremediation is a green, scientific key method and convenient technology to control soil heavy metal pollution. It is one of the important means to realize the sustainable development of human society. In this paper, the germplasm resources of heavy metal hyperaccumulators in recent 20 years in China were collected and summarized, and the basic restoration application example of inter-cropping crops with hyperaccumulators was analyzed and listed, and the limiting factors for the restoration and popularization of hyperaccumulators were summarized. On the basis of this research situation and application status, the definition, application, selection and a series of related experiments of hyperaccumulators were prospected, in order to provide theoretical basis and practical reference for the further selection and application of germplasm resources of hyperaccumulators.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31170400, 31460132)

第一作者: 郭松明(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为植物生态与环境修复, E-mail: 1732604646@qq.com

* 通讯作者(Corresponding author), E-mail: yly35@qq.com

Keywords: heavy metal pollution; hyperaccumulator; germplasm resources; screening and application

钻井挖矿、金属冶炼等活动过程中,重金属污染物的大量排放导致土壤污染,而重金属污染具有隐蔽性、不可逆性和不可降解性等特点,致使生态环境面临着巨大的挑战。目前,物理、化学和生物等对污染土壤的修复方法各有优点,但也存在着一定的局限性。植物修复是生物修复的一部分,具有成本较低、不破坏土壤肥力和二次污染率低等优点^[1-3]。通常是利用自然植物或者遗传工程培育植物的生命代谢活动对土壤中的重金属进行吸收、降解、挥发或固定,从而降低重金属在土壤中的有效态含量或生物毒性,进而达到污染土壤环境进化或部分恢复原初标准稳定状态的目的^[4-6]。本文对我国近 20 年来的重金属超积累植物的种质资源进行了收集归纳,对农作物同超积累植物间套作种植这一基础修复应用实例进行了分析列举,且对超积累植物修复推广的限制因素进行了总结,并在此研究与应用现状基础上对超积累植物的界定、应用、种质资源的筛选和相关试验等一系列研究工作进行了展望,以期对超积累植物修复土壤重金属污染的进一步开发和应用提供实例参考和理论依据。

1 植物修复研究概述及超积累植物界定 (Overview of phytoremediation research and the definition of hyperaccumulators)

1.1 植物修复研究概述

植物修复是近些年来在国内外逐渐兴起的一种低成本、有潜力的以太阳光为能源的绿色修复技术^[7],利用植物来修复重金属污染的土壤可以根据治理机理和过程将其大概分为 5 种技术,分别为植物挥发技术、植物萃取技术、植物稳定技术、根际圈生物降解和根系过滤^[8-9]。这些技术中植物萃取是目前研究最多且认可程度越来越高,而且是具有发展前景的植物修复方式,适合于植物萃取的理想植物就成了研究的重点和热点^[10]。超积累植物的首要特点有:其根部吸收能力较强、且根系具有向茎叶的转移能力、同时叶片有解毒和固定能力。超积累植物是植物修复的理想对象。1977 年,Brooks 首先提出的超积累植物的概念,1983 年美国科学家 Chaney 等提出运用植物来吸收去除土壤中重金属污染物的想法,1991—1992 年,McGrath 和 Sidoli 首次在野外进行植物修复工作。植物修复重金属污染土壤开始作为一种治理新技术被逐渐研究、应用和推广^[11]。

1.2 超积累植物界定

区分超积累植物与相关的非超积累植物较为公认的基本界定如下。(1)地上部(主要指茎和叶)重金属含量特征:植物地上部重金属含量是普通植物在同一生长条件下的 100 倍,广泛采用的富集重金属临界含量参考值,Au 为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Cd 为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Sb、Cu、Ni、Pb、Co 和 As 为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,Zn 和 Mn 为 $10000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。(2)转移特征:植物地上部分重金属含量大于该植物地下部(根部)重金属含量。(3)耐性特征:植物对重金属具有较强的耐性;在实验条件由人为控制的情况下植物能正常生长,至少在土壤中重金属的含量使植物地上部重金属含量达到超积累植物应达到的临界含量时,地上部生物量(植物的茎、叶和籽实等地上部分干质量之和)没有下降。(4)富集系数特征:植物地上部富集系数 > 1 ,至少在出现植物富集重金属含量达到临界含量与土壤中重金属的含量相当时,植物地上部富集系数 > 1 ^[12-14]。

2 种质资源 (Germplasm resources)

植物修复重金属污染土壤,有着效率高、安全经济且与生态环境相协调等优点,对现有超积累或积累植物的探索和筛选是其应用的前提。我国地域广阔、地形多样,植物类型十分丰富,为超积累植物的筛选提供了有利条件^[14]。虽然在这方面我国研究探索起步较晚,但近 20 年也是循序渐进,同时也取得了一系列成果。黄会一和蒋德明^[15]对某种旱柳品系可富集大量 Cd 的研究报道,是对植物富集重金属的初探。陈同斌等^[16]提出世界上存在 As 超积累植物的猜想,并随后开展调查研究,最终在中国境内首先发现 As 超积累植物蜈蚣草。唐世荣^[17]、束文圣等^[18]在矿石堆、古冶炼渣堆中发现并获得 Cu 的超积累植物鸭跖草,2000 年之后国内学者逐渐拉开探索筛选超积累植物的序幕,表 1 中列出了近 20 年中国学者发现的超积累植物与其主要富集的重金属,以及地上部富集的重金属含量。

由表 1 可知,现有超积累植物特点为富集某一种金属的居多,富集 2 种及以上的比较少,呈现出大部分超积累植物修复能力具有专一性这一特点;草本植物居多,乔木、灌木及藤本植物较少;菊科超积累植物最多占总表的 22.4%。张柏清发现的美洲商陆同薛生国等在 2003 年发现的商陆是同一种植物,

表1 我国近20年已发现的重金属超积累植物
Table 1 Hyperaccumulation plants found in China in the past 20 years

超积累植物 Hyperaccumulator	科 Family	类型 Type	富集的重金属 Enriched heavy metals	地上部金属元素含量 Metallic element content of aboveground	参考文献 References
鸭跖草 <i>Commelina communis</i>	鸭跖草科 Commelinaceae	草本 Herb	Cu	1 034 mg·kg ⁻¹	[18]
蜈蚣草 <i>Pteris vittata</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	As	4 384 mg·kg ⁻¹	[16,18-19]
大叶井口边草 <i>Pteris cretica</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	As	2 789 mg·kg ⁻¹	[20]
东南景天 <i>Sedum alfredii</i>	景天科 Crassulaceae	草本 Herb	Zn	19 674 mg·kg ⁻¹	[21]
宝山堇菜 <i>Viola lucens</i>	堇菜科 Violaceae	草本 Herb	Cd	4 825 mg·kg ⁻¹	[22]
土荆芥 <i>Dysphania ambrosioides</i>	苋科 Amaranthaceae	草本 Herb	Pb	3 888 mg·kg ⁻¹	[23]
金钗凤尾蕨 <i>Pteris fauriei</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	As	3 224 mg·kg ⁻¹	[24]
斜羽凤尾蕨 <i>Pteris oshimensis</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	As	1 335 mg·kg ⁻¹	[24]
井栏边草 <i>Pteris multifida</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	As	3 890 mg·kg ⁻¹	[24]
圆锥南芥 <i>Arabis paniculata</i>	十字花科 Brassicaceae	草本 Herb	Pb、Zn、Cd	14 769 mg·kg ⁻¹ 77 442 mg·kg ⁻¹ 3 509 mg·kg ⁻¹	[25]
龙葵 <i>Solanum nigrum</i>	茄科 Solanaceae	草本 Herb	Cd	101.1 mg·kg ⁻¹	[26]
李氏禾 <i>Leersia hexandra</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	Cr	P(Y 1 786.9 mg·kg ⁻¹)	[27]
美洲商陆 <i>Phytolacca americana</i>	商陆科 Phytolaccaceae	草本 Herb	Mn	Y 47 060 mg·kg ⁻¹	[28]
球果堇菜 <i>Rorippa globosa</i>	十字花科 Brassicaceae	草本 Herb	Cd	130 mg·kg ⁻¹	[29]
短萼灰叶 <i>Tephrosia candida</i>	豆科 Fabaceae	灌木状草本 Shrubby herb	Pb	2 200 mg·kg ⁻¹	[30]
水麻柳 <i>Debregeasia longifolia</i>	荨麻科 Urticaceae	小乔木 Small arbor	Pb	2 000 ~ 4 000 mg·kg ⁻¹	[31]
叶用红苋菜 <i>Beta vulgaris cicla</i>	苋科 Amaranthaceae	草本 Herb	Cd	159.79 mg·kg ⁻¹	[32]
水蓼 <i>Polygonum hydropiper</i>	蓼科 Polygonaceae	草本 Herb	Mn	Y 24 447.17 mg·kg ⁻¹ J 10 343.52 mg·kg ⁻¹	[33]
长柔毛委陵菜 <i>Potentilla griffithii velutina</i>	蔷薇科 Rosaceae	草本 Herb	Zn	27 600 mg·kg ⁻¹	[34]
堇叶碎米荠 <i>Cardamine circaeoides</i>	十字花科 Brassicaceae	草本 Herb	Cd、Se	550 mg·kg ⁻¹ 995 mg·kg ⁻¹	[35]
小鳞苔草 <i>Carex gentiles</i>	莎草科 Cyperaceae	草本 Herb	Pb	1 834.17 mg·kg ⁻¹	[36]
紫轴凤尾蕨 <i>Pteris aspericaulis</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	As	4 036 mg·kg ⁻¹	[37]
齿翅井栏边草 <i>Pteris multifida serrulata</i>	凤尾蕨科 Pteridaceae	蕨类 Fern	As	3 634 mg·kg ⁻¹	[37]
紫茉莉 <i>Mirabilis jalapa</i>	紫茉莉科 Nyctaginaceae	草本 Herb	Cd	539.87 mg·kg ⁻¹	[38]
苋菜 <i>Amaranthus tricolor</i>	苋科 Amaranthaceae	草本 Herb	Cd	212 mg·kg ⁻¹	[39]
蓖麻 <i>Ricinus communis</i>	大戟科 Euphorbiaceae	草本或草质灌木 Herb or herbaceous shrub	Cu	2 186.41 mg·kg ⁻¹	[40]
小飞扬草 <i>Euphobia thymifolia</i>	大戟科 Euphorbiaceae	草本 Herb	Cd	J 202.086 mg·kg ⁻¹ Y 189.365 mg·kg ⁻¹	[41]
缨绒花 <i>Emilia jaranica</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	404.23 mg·kg ⁻¹	[42]
三叶鬼针草 <i>Bidens pilosa</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	119.1 mg·kg ⁻¹	[43]
续断菊 <i>Sonchus asper</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	387.5 mg·kg ⁻¹	[44]
孔雀草 <i>Tagetes erecta</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	345.75 mg·kg ⁻¹	[42]
杨桃 <i>Averrhoa carambola</i>	酢浆草科 Oxalidaceae	乔木 Arbor	Cd	615 mg·kg ⁻¹	[45]
艾蒿 <i>Artemisia argyi</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	105.59 mg·kg ⁻¹	[46]

续表1

超积累植物 Hyperaccumulator	科 Family	类型 Type	富集的重金属 Enriched heavy metals	地上部金属元素含量 Metallic element content of aboveground	参考文献 References
滇苦菜 <i>Picris divaricate</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd、Zn	3 919 mg·kg ⁻¹ 12 472 mg·kg ⁻¹	[47]
白莲蒿 <i>Artemisia stechmanniana</i>	菊科 Asteraceae	半灌木状草本 Semi shrubby herb	Pb	1 511.96 mg·kg ⁻¹	[48]
密毛白莲蒿 <i>Artemisia sacrorum messerschmidiana</i>	菊科 Asteraceae	半灌木状草本 Semi shrubby herb	Pb	2 857.86 mg·kg ⁻¹	[48]
金丝草 <i>Pogonatherum crinitum</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	Pb	3 789.84 mg·kg ⁻¹	[49]
柳叶箬 <i>Isachne globosa</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	Pb	3 411.56 mg·kg ⁻¹	[49]
假苍耳 <i>Iva xanthifolia</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	474.30 mg·kg ⁻¹	[50]
铁皇冠 <i>Microsorium pteropus</i>	水龙骨科 Polypodiaceae	蕨类 Fern	Cd	G (10 652.53±2 477.74) mg·kg ⁻¹ Y (3 738.39±348.03) mg·kg ⁻¹ J (3 086.10±749.29) mg·kg ⁻¹ J ₂ (2 511.93±285.47) mg·kg ⁻¹	[51]
五色梅 <i>Lantana camara</i>	马鞭草科 Verbenaceae	灌木或蔓性灌木 Shrub or trailing shrub	Cd	105.91 mg·kg ⁻¹	[52]
杠板归 <i>Polygonum perfoliatum</i>	蓼科 Polygonaceae	草本 Herb	Mn	41 540 mg·kg ⁻¹	[53]
一年蓬 <i>Erigeron annuus</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	159.6 mg·kg ⁻¹	[54]
牛膝 <i>Achyranthes bidentata</i>	苋科 Amaranthaceae	草本 Herb	Mn	18 809.91 mg·kg ⁻¹	[55]
壶瓶碎米荠 <i>Cardamine hupingshanensis</i>	十字花科 Brassicaceae	草本 Herb	Cd	131 mg·kg ⁻¹	[56]
短毛蓼 <i>Polygonum pubescens</i> Blume	蓼科 Polygonaceae	草本 Herb	Mn	15 207 mg·kg ⁻¹	[57]
伴矿景天 <i>Sedum plumbizincicola</i>	景天科 Crassulaceae	肉质草本 Succulent herb	Cd、Zn	9 609 mg·kg ⁻¹	[58]
野古草 <i>Arundinella anornala</i> Steud	禾本科 Poaceae	草本 Herb	Sn	124.2 mg·kg ⁻¹	[59]
芝麻 <i>Sesamum indicum</i>	芝麻科 Pedaliaceae	草本 Herb	Cu	J 480 mg·kg ⁻¹ Y 580 mg·kg ⁻¹	[60]
狗尾草 <i>Setaria viridis</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	Sb	12 270 mg·kg ⁻¹	[61]
豨薟 <i>Sigesbeckia orientalis</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	192.92 mg·kg ⁻¹	[62]
忍冬 <i>Lonicera japonica</i>	忍冬科 Caprifoliaceae	半常绿藤本 Semi evergreen vine	Cd	≈300 mg·kg ⁻¹	[63]
萹草 <i>Arthraxon hispidus</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	Sb	1 336 mg·kg ⁻¹	[64]
红果黄鹌菜 <i>Youngia erythrocarpa</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	317.87 mg·kg ⁻¹	[65]
一点红 <i>Emilia sonchifolia</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd、Pb	114.5 mg·kg ⁻¹ 1 315.5 mg·kg ⁻¹	[66]
牛筋草 <i>Eleusine indica</i>	禾本科 Poaceae	草本 Herb	Sb	2 120 mg·kg ⁻¹	[67]
牛膝菊 <i>Galinsoga parviflora</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	205.62 mg·kg ⁻¹	[68]
藿香蓟 <i>Ageratum conyzoides</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Cd	121.50 mg·kg ⁻¹	[69]
垫状卷柏 <i>Selaginella pulvinata</i>	卷柏科 Selaginellaceae	草本 Herb	Pb	1 061.65 mg·kg ⁻¹	[70]
巨尾桉 <i>Eucalyptus grandis</i> × <i>urophylla</i>	桃金娘科 Myrtaceae	乔木 Arbor	Mn	J 29 018 mg·kg ⁻¹ Y 5 676 mg·kg ⁻¹	[71]
聚合草 <i>Symphytum officinale</i>	紫草科 Boraginaceae	草本 Herb	Pb、Zn	1 388 mg·kg ⁻¹ 17 795 mg·kg ⁻¹	[72]

续表1

超积累植物 Hyperaccumulator	科 Family	类型 Type	富集的重金属 Enriched heavy metals	地上部金属元素含量 Metallic element content of aboveground	参考文献 References
小藜 <i>Chenopodium ficifolium</i>	苋科 Amaranthaceae	草本 Herb	Cd	179.73 mg·kg ⁻¹	[73]
雪里蕻 <i>Brassica juncea</i>	十字花科 Brassicaceae	草本 Herb	Ni、Zn	1 515 mg·kg ⁻¹ 18 823 mg·kg ⁻¹	[72]
蔓长春花 <i>Vinca major</i>	夹竹桃科 Apocynaceae	草本 Herb	Cd	190.82 mg·kg ⁻¹	[74]
黄腺香青 <i>Anaphalis aureopunctata</i>	菊科 Asteraceae	草本 Herb	Pb	P 1 863.2 mg·kg ⁻¹	[75]
西南木荷 <i>Schima wallichii</i>	山茶科 Theaceae	乔木 Arbor	Mn	10 946.3 mg·kg ⁻¹	[76]
盐肤木 <i>Rhus chinensis</i>	漆树科 Anacardiaceae	小乔木 Small arbor	Cr	J 298.33 mg·kg ⁻¹ Y 36.48 mg·kg ⁻¹	[77]

注:根据 Baker 和 Brooks^[78]提出的参考值及公认界定筛选收集;地上部金属元素含量均为自然生长或人工试验等所得的满足公认界定条件的最高值,其中 P 为平均值, J 为茎或叶柄, J₂ 为根状茎, Y 为叶片或羽片, G 为不定根。

Note: Select and collect according to the reference value and recognized definition proposed by Baker and Brooks^[78]; metallic element content of aboveground is the highest value of aerial parts obtained by natural growth or artificial test and other research methods that meet the recognized and defined conditions, in which “P” is the average value, “J” is the stem or petiole, “J₂” is the rhizome, “Y” is the blade or pinnae, and “G” is the adventitious root.

均为垂序商陆(*Phytolacca americana* L.),是 Mn 的超积累植物^[79];2007 年邵树勋发现的当时定名为遏蓝菜的植物,于 2018 年更名为碎米荠,向极钎等^[80]对不同产区碎米荠进行 DNA 序列分析和亲缘关系鉴定,最终确定其为堇叶碎米荠(*Cardamine circacoides* Hook. f. et Thoms.)。

3 重金属超积累植物推广限制因素 (Limiting factors for the promotion of hyperaccumulators)

虽然国内超积累植物的探索和研究取得了一定的成果,但是超积累植物推广使用仍存在着以下的限制因素。

(1)首先重金属超积累植物种类相对较少,而且植物修复的普遍特点就是修复周期长。大多数的超积累植物植株矮小,生长缓慢,生物量低,个体修复率低,耗时长。现已经发现的超积累植物以草本为主,根系不够发达,所以深入修复的范围有限,难修复土壤深层,且不易机械化作业。对于时间与植物自身条件的考量就成为大面积推广的限制因素^[81-82]。

(2)目前发现的超积累植物大多对某一种重金属具有超积累性,还未大量发现具有广谱重金属超积累特性的植物。超积累植物往往会对重金属具有选择性,但是土壤的污染大多是 2 种或 2 种以上重金属共存的复合污染。如果使用单一植物修复,则达不到效果;如果使用多种植物修复,则实际操作性降低。所以对于土壤污染的特点与超积累植物资源

的考量成为使用的限制因素^[83-84]。

(3)超积累植物多为野生型植物,对环境因素与生物因素的要求相对比较严格,区域性分布较强,影响引种成功率。新区域的各种不可控因素可能使得植物无法正常运行超积累机制。如果重金属污染的浓度过高,超积累植物无明显的修复效果。对于不同环境的不稳定性考量成为推广的限制因素^[85-86]。

(4)超积累植物存在一定的隐患,有部分超积累植物可以食用,可能会导致食物链污染。植物完成超积累后,在其生命周期里如果不及时收割处理,叶片掉落也会产生二次污染^[87]。

(5)针对其“生长缓慢、生物量低”所采用的基因克隆技术发展较为缓慢,人工培育理想新品种需要更多的时间。虽已开发多种诱导剂提高植物对污染土壤修复的有效性,但在生态环境安全方面未得到保证。其次植物回收后,处理方式单一,重新提纯的技术成本比较高,技术不够成熟^[88]。

4 农作物同超积累植物间套作应用现状 (Application status of inter-cropping crops with hyperaccumulators)

我国重金属污染较为严重,土壤污染导致粮食减产或出现粮食安全问题。但直接利用超积累植物来修复污染土壤耗时较长,土壤修复期间农民不能继续农业生产,导致农业生产中断,农田资源被浪费,不符合我国的基本国情,随着我国对超积累植物的研究取得一定成果,我国研究者则尝试利用超积

累植物与农作物间套作或混作以提高其修复效率^[89-90]。例如,采用粮食作物玉米、水稻,经济作物向日葵、烟草等与超积累植物间套作来实现对重金属-有机物复合污染的土壤修复。间套作是运用了群落的空间结构原理,充分利用水能、光能等自然资源,同时充分利用植物生长的空间和时间,从而提高农作物的产量。间套作体系应用于土壤修复且获取符合国家标准农产品的方法,是一条符合可持续发展战略同时立足于我国人多地少、只能边生产边修复国情的新途径。

4.1 超积累植物同农作物间套作在农田中的应用

4.1.1 单一重金属污染应用参考性实例

陈同斌研究团队^[91-92]先后将蜈蚣草(*Pteris vittata*)与桑树、甘蔗和柑橘进行间作,研究表明,间作后经济作物产量与没有污染区域产量基本持平,而产出桑叶、蚕丝和蔗汁的重金属含量均达标,达标率均超过95%,柑橘果实重金属含量未超过国家食品重金属含量标准,同时促进了蜈蚣草对土壤中As的吸收。2012年邓华^[57]研究发现,玉米与超积累植物短毛蓼(*Polygonum pubescens* Blume)间种,首先,在一定程度上提高短毛蓼的生物量,其次,还能够促进短毛蓼对土壤中重金属Mn的吸收,体内Mn累积量增2倍多。王秀娟^[93]利用玉米和伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)进行间作,研究表明,玉米籽粒Cd含量低于国家食品镉含量标准,而且伴矿景天对土壤中Cd的去除率达到35.20%,对农田的Cd修复效果显著。李素霞等^[94]通过利用苋菜(*Amaranthus mangostanus*)与小白菜混作,不仅能够降低小白菜体内的重金属含量,同时一定程度上提高质量和产量,对土壤中Cd的吸收也非常显著。魏树和等^[95]通过将龙葵(*Solanum nigrum*)与大葱进行间作,既能修复Cd污染土壤,同时产出符合我国农产品安全无公害质量标准的大葱。王吉秀等^[96]利用超积累植物小花南芥(*Arabis paniculata*)与玉米间作体系,不仅促进超积累植物小花南芥富集Pb,同时减少农作物玉米植株体内Pb含量,提升玉米的产量,是一种可行的修复模式。

4.1.2 复合重金属污染应用参考性实例

武帅等^[97]利用伴矿景天(*Sedum plumbizincicola*)与雷竹间作来修复Zn-Cd复合污染的土壤,将Zn-Cd复合污染的土壤修复至国家土壤质量环境二级标准所需要的时间大大缩短,同时这种“边修复、边生产”的模式不仅能稳步降低土壤中的重金属污

染,而且增加了农作物的产量。宓彦彦^[98]将超积累植物伴矿景天与茄子进行间作试验发现,伴矿景天地上部Zn、Cd吸收量显著增加,分别上升54.7%和16.9%,且植物修复效率较高,Zn为3.17%,Cd为28.4%。同时,在该处理下,茄子果实Cd浓度为0.08 mg·kg⁻¹。秦丽等^[99]利用超积累植物土荆芥(*Dysphania ambrosioides*)和农作物玉米、蚕豆进行间作,结果显示,土荆芥体内Cd含量上升了21%~134%,Pb的含量增加10%~85%,3种植物的生物量都有所提高。此间作方法既抑制了农作物吸收重金属,同时提高了超积累植物的重金属吸收量。杨崎峰等^[100]利用重金属超积累草本植物与木本花卉间作修复污染土壤,刺槐和柔毛堇菜(*Viola fargesii*)经过间作修复后,农田中Cd、As、Pb、Cu、Zn等的降解率分别为96.37%、72.56%、75.45%、46.28%、50.59%,同理腊肠树与野菊(*Chrysanthemum indicum*)间作对农田中重金属元素的降解率显著提高,此修复方式既降低了土壤中的金属含量,同时也具有一定的经济效益。姚春霞等^[101]将玉米秸秆加进Pb-Cd复合污染土壤中得到基质,再在此基础上间作蓖麻与伴矿景天,结果显示,蓖麻地上部的重金属含量未超出食品中污染限量,且可达到3 686.7 kg每公顷一季,伴矿景天对土壤中的重金属去除率也比较显著。

4.2 超积累植物同农作物间套作在城市中的应用(城市湖泊、河道等的污泥处理)

Wu和Jiang^[102]采用遏蓝菜(*Thlaspi caeulescens*)与玉米修复城市中Cd或Zn超标的污泥,经过半年的处理,污泥体积变小为原来的1/4,通过EDTA浸取测定,Zn含量明显降低,而且产出的玉米经过多次试验检测,符合食品卫生标准。刘颂颂^[103]通过玉米与东南景天套种的处理方式,使污泥中的Zn含量明显降低。黑亮等^[104]通过超积累植物东南景天和玉米套种对污泥进行修复试验,结果表明,套种显著提高了超积累植物东南景天提取Zn和Cd的效率,其中,东南景天中Zn含量达9 910 mg·kg⁻¹,是单种的1.5倍,而且玉米的籽粒重金属含量符合食品卫生标准。丘锦荣^[105]采用香芋和东南景天套种方式修复城市污泥,发现城市污泥中的全Zn和全Cd的含量有显著降低(Zn下降了16.32%,Cd下降了8.54%),且收获的香芋总产量是18.1 t·hm⁻²,此方法可以将城市污泥中的Zn、Cd和K富集在不同植物体内从而回收利用。

5 展望 (Prospects)

5.1 超积累植物的界定

超积累植物一直在比较公认的界定范围内进行筛选,但还没有精确的界定。有研究表明,Cd超积累植物相对比较少,Cd超积累植物的临界含量标准应降为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[26];魏树和等^[106]认为超积累植物的界定还应当加上:(1)植物体内富集的重金属含量一定要大于土壤中的重金属含量,即富集系数(enrichment coefficient, EC)要 >1 ; (2)超积累植物必须具有较强的耐性特征。2005年聂发辉^[107]发表对超积累植物新的理解,认为传统超积累植物定义只考虑植物体内的重金属含量和转运系数这2点存在缺陷,随后提出2项新的评价指标——生物的富集系数(吸收系数)和转运量系数,新指标将传统超积累植物的定义扩大了,即某植物富集质量分数虽未达某一水平,但生物量达到要求也可定义为超积累植物。综上,应该对超积累植物的界定进行多层次深入研究,进行标准统一划分,最终筛选出更具实际应用价值的超积累植物。

5.2 超积累植物的修复对象

超积累植物的研究绝大多数是对土壤的重金属污染进行修复,但是国内水体的重金属污染也非常严重,水是动植物和人类不可或缺的资源,水体的污染更容易进入食物链造成污染,直接威胁人体健康。在超积累植物筛选中,水生植物或湿生植物作为试验对象的研究相对较少,表1中的超积累植物筛选中有水蓼、野古草和铁皇冠可作为水体修复的植物。其中,野古草^[59]在修复Cr污染水体中表现出比修复土壤更强的富集能力。综上,应该关注水体重金属污染情况,对水生植物超积累植物进行充分的探寻筛选以及合理利用,为水体的重金属污染修复提供新的思路和方法,从而适当避免传统修复方式的弊端。

5.3 土壤修复与土地利用的矛盾

中国地少人多的情况显著,本文中列举的超积累植物同农作物、经济作物套间作不仅达到修复目的,同时收获了安全的作物,这样的治理方法既能满足人民的需求带来实际效益,又在一定程度上缓解了土壤修复与土地利用的矛盾。在城市中的土壤修复与土地利用矛盾更为突出,我国学者针对此类情况进行了探索研究,如周睿人等^[108]利用四季春(*Ligustrum malongense* B. S. Sun)来修复重金属污染的土壤,四季春是一种观赏植物,能够修复Cd、Pb和As单一污染或复合污染的土壤,同时达到一定的景

观效应,具有广泛的应用前景。魏朝丹等^[109]利用观赏植物白雪姬(*Tradescantia sillamontana*)来修复重金属Pb污染的土壤,对Pb的污染表现出极强的耐性和良好的富集作用,同时产生一定的景观效益。综上,推广此类重金属污染土壤修复方式,对缓解土壤修复与土地利用的矛盾具有指导意义。

5.4 高富集植物的处理处置

从许多植物修复的应用文献中发现,非超积累植物具有重金属超积累的能力,甚至富集量超过了超积累植物。例如,荣伟英等^[110]发现千屈菜(*Lythrum salicaria*)是类似Cr超积累植物,能降低水体中Cr的浓度来达到净化水体的效果。宁平等^[111]发现密蒙花(*Buddleja officinalis* Maxim)对Pb具有超积累特性以及较强的耐性,对轻度或重度Pb污染土壤的治理修复具有良好的应用前景。综上,对重金属土壤修复效果显著的植物我们应该注重应用试验,而不是判定试验。

5.5 多金属复合污染土壤修复中的植物品种选择

在目前发现的超积累植物中,对某一种重金属具有超积累性的植物占大多数,但是土壤的重金属污染大多是2种或2种以上产生的复合污染^[83]。已有学者发现有些植物对复合重金属污染的土壤具有良好修复作用。张少卿^[112]发现野苘蒿(*Crassocephalum crepidioides* (Benth.) S. Moore)具有超积累能力,对Pb和Zn具有一定的耐性和富集能力,对此类复合重金属污染土壤具有一定的修复作用。祝鹏飞等^[113]通过对钴形紫苑(*Aster subulatus*)地上部分重金属的富集系数和体内重金属含量研究发现,在复合污染的土壤中钴形紫苑具备As-Pb-Cd超积累植物的基本特征。综上,对于多金属复合污染的土壤,可以合理选择具有良好修复作用的植物品种进行修复,从而达到一定的治理效果。

5.6 修复效率和修复周期问题

植物修复的普遍特点就是效果慢并且修复周期长^[81]。姚春霞等^[101]发现玉米秸秆加进Pb-Cd复合污染土壤中制成基质,通过玉米秸秆的协同修复作用,能够在一定程度上提高伴矿景天对土壤中重金属的修复效率。铁皇冠在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd浓度下暴露仅3d,植物体内Cd富集量就趋于最大值,对水体Cd的净化能力达到40%~60%,具有净化能力强、修复周期短等显著优点^[51]。综上,充分利用植物的协同修复或利用植物在修复中显著优势来达到提高修复效率、缩短修复周期的目的。

5.7 超积累植物的资源探索

自然环境中的稀土元素由土壤和水进入食物链从而进入人体。儿童在生长发育阶段,生理屏障还未完全成熟,身体里的解毒、代谢功能还未完善,对有毒物质的吸收率高,敏感性也比其他年龄段强,摄入稀土元素将导致儿童发育障碍、儿童智力和记忆力下降等,如果长期摄入稀土元素或者低剂量暴露,可能会造成儿童神经系统、消化系统等多方面的损害,尤其是中枢神经系统,即使低剂量的稀土暴露也会导致中枢神经或周围神经系统的损伤^[14]。目前可以利用的修复稀土元素污染土壤的植物资源较少,且可利用植物也表现出生物量小、生长缓慢和修复范围窄等问题。张世熔等^[15]利用巨桉(*Eucalyptus grandis*)修复稀土元素La污染土壤,巨桉表现出很强的耐性,在土壤中La浓度为 $350\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,巨桉对La的富集量最大为 $10\ 883\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,富集效果显著。综上,可以发掘稀土元素的富集植物或超积累植物资源,从而降低稀土元素对人类健康的危害。

通讯作者简介:袁龙义(1971—),男,博士,教授,主要研究方向为湿地生态与水生植物生物学。

参考文献(References):

- [1] Li Z, Zhou J W, Wu L H. Hot spots of soil heavy metal pollution and remediation research in 2017 [J]. Science & Technology Review, 2018, 36(1): 189-198
- [2] Zhuang P, McBride M B, Xia H P, et al. Health risk from heavy metals via consumption of food crops in the vicinity of Dabaoshan Mine, South China [J]. The Science of the Total Environment, 2009, 407(5): 1551-1561
- [3] 黄科文, 山诗瑶, 陆春艳, 等. 喷施烯效唑(S3307)对2种生态型鬼针草镉积累的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(9): 1190-1196
Huang K W, Shan S Y, Lu C Y, et al. Effects of spraying uniconazole (S3307) on cadmium accumulation of two ecotypes of *Bidens pilosa* [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2019, 35(9): 1190-1196 (in Chinese)
- [4] 王庆海, 却晓娥. 治理环境污染的绿色植物修复技术[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(2): 261-266
Wang Q H, Que X E. Phytoremediation: A green approach to environmental clean-up [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(2): 261-266 (in Chinese)
- [5] Sun L N, Zhang Y F, He L Y, et al. Genetic diversity and characterization of heavy metal-resistant-endophytic bacteria from two copper-tolerant plant species on copper mine wasteland [J]. Bioresource Technology, 2010, 101(2): 501-509
- [6] Xie H L, Jiang R F, Zhang F S, et al. Effect of nitrogen form on the rhizosphere dynamics and uptake of cadmium and zinc by the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* [J]. Plant and Soil, 2009, 318(1-2): 205-215
- [7] 杨启良, 武振中, 陈金陵, 等. 植物修复重金属污染土壤的研究现状及其水肥调控技术展望[J]. 生态环境学报, 2015, 24(6): 1075-1084
Yang Q L, Wu Z Z, Chen J L, et al. Research status of phytoremediation of heavy metals contaminated soil and prospects of water and fertilizer regulating technology [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(6): 1075-1084 (in Chinese)
- [8] le X H, Franco C M M, Ballard R A, et al. Isolation and characterisation of endophytic actinobacteria and their effect on the early growth and nodulation of lucerne (*Medicago sativa* L.) [J]. Plant and Soil, 2016, 405(1-2): 13-24
- [9] Boechat C L, Pistóia V C, Gianelo C, et al. Accumulation and translocation of heavy metal by spontaneous plants growing on multi-metal-contaminated site in the Southeast of Rio Grande do Sul State, Brazil [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2016, 23(3): 2371-2380
- [10] 邢轶兰. 重金属污染农田植物萃取效果评价系统的可视化研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2015: 1-8
Xing Y L. Evaluation system on efficiency of phytoremediation for heavy metal contaminated farmland [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2015: 1-8 (in Chinese)
- [11] 宋玉婷, 雷泞菲, 李淑丽. 植物修复重金属污染土地的研究进展[J]. 国土资源科技管理, 2018, 35(5): 58-68
Song Y T, Lei N F, Li S L. Advances in phytoremediation of heavy-metal-contaminated land [J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 2018, 35(5): 58-68 (in Chinese)
- [12] 陈一萍. 重金属超积累植物的研究进展[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(3): 20-24
Chen Y P. Research trends on heavy metals hyperaccumulators [J]. Environmental Science and Management, 2008, 33(3): 20-24 (in Chinese)
- [13] Wei S H. A newly-discovered Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(1): 33
- [14] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选[J]. 自然科学进展, 2003, 13(12): 1259-1265
- [15] 黄会一, 蒋德明. 木本植物对土壤中镉的吸收, 积累和

- 耐性[J]. 中国环境科学, 1989(5): 323-330
- [16] 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, 47(3): 207-210
- [17] 唐世荣. 重金属在海州香薷和鸭跖草叶片提取物中的分配[J]. 植物生理学通讯, 2000, 36(2): 128-129
- [18] 束文圣, 杨开颜, 张志权, 等. 湖北铜绿山古铜矿冶炼渣植被与优势植物的重金属含量研究[J]. 应用与环境生物学报, 2001, 7(1): 7-12
Shu W S, Yang K Y, Zhang Z Q, et al. Flora and heavy metals in dominant plants growing on an ancient copper spoil heap on Tonglushan in Hubei Province, China [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2001, 7(1): 7-12 (in Chinese)
- [19] 陈同斌, 黄泽春, 黄宇营, 等. 砷超富集植物中元素的微区分布及其与砷富集的关系[J]. 科学通报, 2003, 48(11): 1163-1168
- [20] 韦朝阳, 陈同斌, 黄泽春, 等. 大叶井口边草: 一种新发现的富集砷的植物[J]. 生态学报, 2002, 22(5): 777-778
Wei C Y, Chen T B, Huang Z C, et al. Cretan brake (*Pteris cretica* L.): An arsenic-accumulating plant [J]. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(5): 777-778 (in Chinese)
- [21] Yang X E, Long X X, Ni W Z, et al. *Sedum alfredii* H.: A new Zn hyperaccumulating plant first found in China [J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(19): 1634-1637
- [22] 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
- [23] 吴双桃, 吴晓芙, 胡曰利, 等. 铅锌冶炼厂土壤污染及重金属富集植物的研究[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 156-157, 160
Wu S T, Wu X F, Hu Y L, et al. Studies on soil pollution around Pb-Zn smelting factory and heavy metals hyperaccumulators [J]. Ecology and Environment, 2004, 13(2): 156-157, 160 (in Chinese)
- [24] 王宏宾. 凤尾蕨属植物对砷的富集特征及有关机理探讨[D]. 广州: 中山大学, 2005: 90-110
Wang H B. Arsenic accumulation and possible mechanisms in fern species belonging to *Pteris* genus [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2005: 90-110 (in Chinese)
- [25] 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 (in Chinese)
- [26] 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(24): 2568-2573
- [27] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 一种新发现的湿生铬超积累植物: 李氏禾 (*Leersia hexandra* Swartz) [J]. 生态学报, 2006, 26(3): 950-953
Zhang X H, Luo Y P, Huang H T, et al. *Leersia hexandra* Swartz: A newly discovered hygrophyte with chromium hyper-accumulator properties [J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(3): 950-953 (in Chinese)
- [28] Tie B Q, Yuan M, Tang M Z. *Phytolacca americana* L.: A new manganese accumulator plant [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(2): 340-343
- [29] 周启星, 魏树和. 一种利用十字花科植物修复镉污染土壤的方法: CN200410020981.2 [P]. 2006-01-18
- [30] 刘晓海, 高云涛, 贺彬, 等. 一种利用超富集植物短萼灰叶修复铅污染土壤的方法: CN200610011078.9 [P]. 2007-01-24
- [31] 刘晓海, 高云涛, 贺彬, 等. 利用超富集植物水麻柳修复铅污染土壤的方法: CN200610011088.2 [P]. 2007-01-31
- [32] 李玉双, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 超富集植物叶用红苜蓿 (*Beta vulgaris* var. *cicla* L.) 及其对 Cd 的富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(4): 1386-1389
Li Y S, Sun L N, Sun T H, et al. Cadmium hyperaccumulator *Beta vulgaris* var. *cicla* L. and its accumulating characteristics [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2007, 26(4): 1386-1389 (in Chinese)
- [33] 王华, 唐树梅, 廖香俊, 等. 锰超积累植物: 水蓼 [J]. 生态环境, 2007, 16(3): 830-834
Wang H, Tang S M, Liao X J, et al. A new manganese-hyperaccumulator: *Polygonum hydropiper* L. [J]. Ecology and Environment, 2007, 16(3): 830-834 (in Chinese)
- [34] 方晓航. 长柔毛委陵菜 (*Potentilla griffithii* Hook. f. var. *velutina*. Card) 超富集锌的机理研究 [D]. 广州: 中山大学, 2006: 44-55
Fang X H. Mechanism of zinc hyperaccumulation in *Potentilla griffithii* Hook [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2006: 44-55 (in Chinese)
- [35] 刘亚峰, 龙胜桥, 邵树勋. 碎米荠对硒、镉超富集特性研究[J]. 地球与环境, 2018, 46(2): 173-178
Liu Y F, Long S Q, Shao S X. A study on hyperaccumulation of Se and Cd in *Cardamine violifolia* [J]. Earth and Environment, 2018, 46(2): 173-178 (in Chinese)
- [36] 杨远祥. 小鳞苔草 (*Carex gentiles* Franch) 铅锌富集特性及生理机制初步研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2007: 18-51
Yang Y X. Study on Pb-Zn accumulation characteristics and physiological mechanism of *Carex gentiles* Franch

- [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2007: 18-51 (in Chinese)
- [37] 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
- [38] 周启星, 刘家女. 一种利用紫茉莉花卉植物修复重金属污染土壤的方法: CN200610046244.9[P]. 2007-10-10
- [39] 范洪黎. 苋菜超积累镉的生理机制研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007: 15-26
- Fan H L. Physiological mechanism of cadmium hyperaccumulation in amaranth (*Amaranthus mangostanus* L.) [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007: 15-26 (in Chinese)
- [40] 黄华. 小飞扬草(*Euphorbia thymifolia* L.)吸收积累镉的机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2008: 17-25
- [41] 刘晓海, 高云涛, 贺彬, 等. 超富集植物修复铅污染土壤的应用及其方法: CN200610011046.9[P]. 2007-01-03
- [42] 王林. 超积累观赏植物筛选及生态修复强化技术研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2008: 105-106
- Wang L. Identification of hyperaccumulating ornamentals and strengthening technology of ecological remediation [D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2008: 105-106 (in Chinese)
- [43] Sun Y B, Zhou Q X, Wang L, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Bidens pilosa* L. as a potential Cd-hyperaccumulator [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2-3): 808-814
- [44] 李元, 方其仙, 祖艳群. 2种生态型续断菊对Cd的累积特征研究[J]. *西北植物学报*, 2008, 28(6): 1150-1154
- Li Y, Fang Q X, Zu Y Q. Accumulation characteristics of two ecotypes *Sonchus asper* (L.) Hill. to Cd [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2008, 28 (6): 1150-1154 (in Chinese)
- [45] 李金天, 杨桃(*Averrhoa carambola*)对Cd富集特征与Cd污染土壤植物修复[D]. 广州: 中山大学, 2008: 107-110
- Li J T. Cadmium accumulation in *Averrhoa carambola* and its potential for phytoextraction of cadmium [D]. Guangzhou: Sun Yat-sen University, 2008: 107-110 (in Chinese)
- [46] 李法云, 张营, 李霞, 等. 一种利用菊科植物修复镉污染土壤的方法: CN200810228226.1[P]. 2009-03-18
- [47] 汤叶涛, 吴好都, 仇荣亮, 等. 滇苦菜(*Picris divaricata* Vant.)对锌的吸收和富集特性[J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 1823-1831
- Tang Y T, Wu Y D, Qiu R L, et al. Zinc uptake and accumulation in *Picris divaricata* Vant. [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 1823-1831 (in Chinese)
- [48] 赵磊. 白音诺尔铅锌矿铅超富集植物筛选及其耐性研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009: 15-28
- Zhao L. Screening of hyperaccumulators and tolerance research in Baiyinuoer lead-zinc mine [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009: 15-28 (in Chinese)
- [49] 侯晓龙, 常青山, 刘国锋, 等. 铅的超富集植物金丝草(*Pogonatherum crinitum*)、柳叶箬(*Isache globosa*)[C]. 中国林学会. 第九届中国林业青年学术年会论文摘要集. 成都: 中国林学会, 2010: 42
- [50] 赵修华, 任之光, 祖元刚, 等. 入侵植物假苍耳对镉的富集特征[J]. *森林工程*, 2010, 26(4): 39-43
- Zhao X H, Ren Z G, Zu Y G, et al. Characteristics of cadmium accumulation by invasive plant *Iva xanthifolia* [J]. *Forest Engineering*, 2010, 26(4): 39-43 (in Chinese)
- [51] 王军军. 沉水植物铁皇冠对镉的超富集能力与抗性生理[D]. 北京: 北京大学, 2010: 32-39
- [52] 孙约兵, 周启星, 刘睿, 等. 一种利用镉超富集植物五色梅修复重金属污染土壤的方法: CN102085527A[P]. 2011-06-08
- [53] 王钧. 杠板归的锰超富集机制研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011: 9-20
- Wang J. Research on the accumulation mechanisms of manganese by *Polygonum perfoliatum* L. [D]. Changsha: Central South University, 2011: 9-20 (in Chinese)
- [54] 程功林, 江德开, 李守勤, 等. 利用菊科植物修复镉污染土壤方法: CN201010220034.3[P]. 2012-01-11
- [55] 郝庆菊, 江长胜, 黄小娟. 一种利用锰超富集植物牛膝修复重金属污染土壤的方法: CN201210116611.3[P]. 2012-08-15
- [56] 白宏锋, 李晓明. 超积累植物壶瓶碎米荠的镉富集[J]. *江苏农业学报*, 2012, 28(1): 76-79
- Bai H F, Li X M. Cadmium accumulation in hyper accumulator *Cardamine hupingshanensis* [J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2012, 28(1): 76-79 (in Chinese)
- [57] 邓华. 短毛蓼超富集锰的机理及对锰污染土壤的修复效应研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012: 18-27
- Deng H. Mechanism of Mn hyperaccumulation in *Polygonum pubescens* Blume and its effects on remediation of Mn contaminated soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012: 18-27 (in Chinese)
- [58] 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
- [59] 高志强, 周启星. 一种利用野古草植物修复锡污染土壤和浅水水体的方法: CN201210562073.0[P]. 2013-03-27
- [60] 曾清如, 杨洋, 彭亮, 等. 一种利用超富集植物: 芝麻修

- 复铜污染土壤的方法: CN201310026580.7[P]. 2013-04-10
- [61] 周春财, 刘桂建, 方婷. 一种利用植物修复镉污染土壤的方法及其应用: CN201210371134.5[P]. 2013-01-16
- [62] Zhang S R, Lin H C, Deng L J, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *Siegesbeckia orientalis* L. [J]. *Ecological Engineering*, 2013, 51: 133-139
- [63] 刘周莉, 何兴元, 陈玮. 忍冬: 一种新发现的镉超富集植物[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(4): 666-670
Liu Z L, He X Y, Chen W. *Lonicera japonica* Thunb.: A newly discovered Cd hyper-accumulator [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(4): 666-670 (in Chinese)
- [64] 袁艺宁, 卢明. 一种利用超富集植物苘草治理镉、砷、铅及锌污染土壤或水体的方法: CN201310201011.1[P]. 2014-12-03
- [65] 宁博. 红果黄鹌菜(*Youngia erythrocarpa*)对 Cd 的超富集机理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014: 11-31
Ning B. Accumulation characteristics to Cd of *Youngia erythrocarpa* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014: 11-31 (in Chinese)
- [66] 周睿人, 刘维涛, 周启星. 一种利用超积累花卉一点红修复镉、铅单一或复合污染土壤的方法: CN201310474040.5[P]. 2014-01-01
- [67] 袁艺宁, 卢明. 一种利用超富集植物牛筋草治理镉污染土壤和水体的方法: CN201310189584.7[P]. 2014-12-03
- [68] 金倩. 镉超富集植物牛膝菊(*Galinsoga parviflora*)的抗氧化酶活性变化与光合特性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2014: 29-30
Jin Q. Study on antioxidant enzyme activity and photosynthetic characteristics of Cd-hyperaccumulator *Galinsoga parviflora* [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2014: 29-30 (in Chinese)
- [69] 孙园园, 徐玲玲, 冯旭东, 等. 藜香蓟的镉积累、生物量及叶绿素荧光参数对不同梯度镉胁迫的响应[J]. *广西植物*, 2015, 35(5): 679-684
Sun Y Y, Xu L L, Feng X D, et al. Biomass, cadmium accumulation and chlorophyll fluorescence parameters response of *Ageratum conyzoides* to different concentrations of cadmium stress [J]. *Guihaia*, 2015, 35(5): 679-684 (in Chinese)
- [70] 刘强, 朱雪梅, 邵继荣, 等. 旱生复苏植物垫状卷柏对铅的超富集特性研究[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(2): 248-252
Liu Q, Zhu X M, Shao J R, et al. Lead hyperaccumulation of xerophytic resurrection plant *Selaginella pulvinata* [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2): 248-252 (in Chinese)
- [71] 谢清清. 巨尾桉超富集锰的机理及拟南芥转运蛋白对金属转运和信号转导的作用研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2015: 28-51
- [72] 张增强, 李荣华, 沈锋, 等. 利用超富集植物聚合草修复重金属污染土壤或水体的方法: CN201610138319.X [P]. 2016-06-22
- [73] 张鑫, 葛芳芳, 王学锋, 等. 一种利用镉超富集植物小藜修复镉污染土壤的方法: CN201610559041.3 [P]. 2016-09-28
- [74] 张增强, 李荣华, 沈锋, 等. 利用超富集植物雪里蕻修复重金属污染土壤或水体的方法: CN201610138321.7 [P]. 2016-07-13
- [75] 周杰良, 葛大兵, 李树战, 等. 藤本植物中具镉超积累特征植物的筛选[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(4): 515-520
Zhou J L, Ge D B, Li S Z, et al. Selection for Cd-hyperaccumulator plant from 25 lianas species [J]. *Forest Research*, 2016, 29(4): 515-520 (in Chinese)
- [76] 金政. 锰超富集植物西南木荷对锰胁迫的生理响应及代谢组和转录组分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2017: 11-22
Jin Z. Physiological response of Mn hyperaccumulator *Schima wallichii* to Mn stress and metabolics and transcriptomics analysis [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017: 11-22 (in Chinese)
- [77] 罗劲松, 闵运江, 陈玉, 等. 模拟盆栽条件下盐肤木对3种重金属胁迫的耐受性及其富集作用研究[J]. *皖西学院学报*, 2020, 36(2): 48-53
Luo J S, Min Y J, Chen Y, et al. Simulation investigation the impact of three heavy metals on the *Rhus chinensis* in potting [J]. *Journal of West Anhui University*, 2020, 36(2): 48-53 (in Chinese)
- [78] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements: A review of their distribution, ecology and phytochemistry [J]. *Biorecovery*, 1989, 1: 811-826
- [79] 薛生国, 叶晟, 周菲, 等. 锰超富集植物垂序商陆(*Phytolacca americana* L.)的认定 [J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6344-6347
Xue S G, Ye S, Zhou F, et al. Identity of *Phytolacca americana* L.(Phytolaccaceae), pokeweed: A manganese hyperaccumulator plant [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6344-6347 (in Chinese)
- [80] 向极钎, 李锡香, 王萌, 等. 不同产区碎米荠 nrDNA ITS 序列分析及亲缘关系鉴定[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(19): 4737-4740
Xiang J Q, Li X X, Wang M, et al. nr DNA ITS se-

- quences analysis and genetic relationship identification of *Cardamine* from different geographical regions [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(19): 4737-4740 (in Chinese)
- [81] Padmavathiamma P K, Li L Y. Phytoremediation technology: Hyper-accumulation metals in plants [J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2007, 184(1-4): 105-126
- [82] 魏树和, 周启星, 王新. 18种杂草对重金属的超积累特性研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2003, 11(2): 152-160
Wei S H, Zhou Q X, Wang X. Characteristics of 18 species of weed hyperaccumulating heavy metals in contaminated soils [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2003, 11(2): 152-160 (in Chinese)
- [83] 黄明煜, 章家恩, 全国明, 等. 土壤重金属的超富集植物研发利用现状及应用入侵植物修复的前景综述[J]. *生态科学*, 2018, 37(3): 194-203
Huang M Y, Zhang J E, Quan G M, et al. Review on research and utilization current status of hyperaccumulation plants for heavy metal contaminated soils and the phytoremediation application prospective of invasive plants [J]. *Ecological Science*, 2018, 37(3): 194-203 (in Chinese)
- [84] 熊国焕, 何艳明, 栾景丽, 等. 龙葵、大叶井口边草和短萼灰叶对 Pb、Cd 和 As 污染农田的修复研究[J]. *生态与农村环境学报*, 2013, 29(4): 512-518
Xiong G H, He Y M, Luan J L, et al. Cd-, As-and Pb-polluted farmland remediation potentials of *Solanum nigrum*, *Pteris cretica* var. *nervosa* and *Tephrosia candida* [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2013, 29(4): 512-518 (in Chinese)
- [85] Chen D M, Wang Y, Lan Z C, et al. Biotic community shifts explain the contrasting responses of microbial and root respiration to experimental soil acidification [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 90: 139-147
- [86] Keymer D P, Lankau R A. Disruption of plant-soil-microbial relationships influences plant growth [J]. *Journal of Ecology*, 2017, 105(3): 816-827
- [87] 郑黎明, 袁静. 重金属污染土壤植物修复技术及其强化措施[J]. *环境科技*, 2017, 30(1): 75-78
Zheng L M, Yuan J. Phytoremediation of soils contaminated by heavy metals and strengthening measures [J]. *Environmental Science and Technology*, 2017, 30(1): 75-78 (in Chinese)
- [88] Rascio N, Navari-Izzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it? And what makes them so interesting? [J]. *Plant Science*, 2011, 180(2): 169-181
- [89] 余涛, 蒋天宇, 刘旭, 等. 土壤重金属污染现状及检测分析技术研究进展[J]. *中国地质*, 2021, 48(2): 460-476
Yu T, Jiang T Y, Liu X, et al. Research progress in current status of soil heavy metal pollution and analysis technology [J]. *Geology in China*, 2021, 48(2): 460-476 (in Chinese)
- [90] 周德春. 植物生态修复技术的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2006: 1-4
Zhou D C. A research on technology of plant ecological restoration [D]. Changchun: Northeast Normal University, 2006: 1-4 (in Chinese)
- [91] 杨军, 郭悦, 杨俊兴, 等. 一种利用超富集植物与经济作物间作修复砷污染土壤的方法: CN201810397900.2 [P]. 2018-10-16
- [92] 陈同斌, 雷梅, 万小铭, 等. 修复一方净土[J]. *人与生物圈*, 2016(5): 74-78
- [93] 王秀娟. 利用低积累玉米/伴矿景天间作实现边生产边修复的方法: CN111011129A [P]. 2020-04-17
- [94] 李素霞, 刘云霞, 韦司棋. 苋菜-小白菜混作对小白菜镉与硝酸盐复合污染的影响[J]. *湖北农业科学*, 2015, 54(20): 5073-5076
Li S X, Liu Y X, Wei S Q. Effect of amaranth-Chinese cabbage intercropping on Chinese cabbage under compound pollution of cadmium and nitrate salt [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2015, 54(20): 5073-5076 (in Chinese)
- [95] 魏树和, 李旭辉, 周启星, 等. 一种镉污染菜地边生产边修复的方法: CN103109651A [P]. 2013-05-22
- [96] 王吉秀, 李元, 祖艳群, 等. 铅胁迫下小花南芥和玉米间作体系对植物生理的影响[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(7): 54-59
Wang J X, Li Y, Zu Y Q, et al. Effects of *Arabis alpina* L. var. *parviflora* Franch and *Zea mays* L in an intercropping system on plant physiology to lead stress [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(7): 54-59 (in Chinese)
- [97] 武帅, 吴胜春, 张进, 等. 一种锌镉复合污染土壤的植物修复方法: CN108326022A [P]. 2018-07-27
- [98] 宓彦彦. 重金属污染土壤的植物联合修复及其农业综合利用技术研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2013: 30-35
Mi Y Y. The research of joint remediation by plants and agricultural comprehensive utilization of heavy metal contaminated soil [D]. Changsha: Hunan Normal University, 2013: 30-35 (in Chinese)
- [99] 秦丽, 湛方栋, 祖艳群, 等. 土荆芥和蚕豆/玉米间作系统中 Pb、Cd、Zn 的累积特征研究[J]. *云南农业大学学报: 自然科学*, 2017, 32(1): 153-160
Qin L, Zhan F D, Zu Y Q, et al. Accumulation characteristics of Pb, Cd and Zn by *Chenopodium ambrosioides* L.

- intercropping with maize and broad bean [J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2017, 32 (1): 153-160 (in Chinese)
- [100] 杨崎峰, 朱红祥, 覃晖, 等. 一种利用重金属超富集草本与木本花卉间作修复污染土壤的方法: CN110576037A[P]. 2019-12-17
- [101] 姚春霞, 毕德, 王青玲, 等. 一种利用玉米秸秆协同伴矿景天间作能源植物修复铅镉复合污染土壤的方法: CN111014279A[P]. 2020-04-17
- [102] Wu Q T, Jiang C A. Bioremediation of heavy metal contaminated biosolids by bacterial biosorption and hyperaccumulator plants [C]. 1st ASEM Conference on Bio-remediation. Hanoi, Vietnam: ASEM, 2002: 9
- [103] 刘颂颂. 东莞市城市污泥植物处理及农林业利用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2012: 17-36
- Liu S S. Safe recycling Dongguan municipal sewage sludge in agriculture and forestry with phyto-treatment and sludge containers [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2012: 17-36 (in Chinese)
- [104] 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): 4852-4858
- Hei L, Wu Q T, Long X X, et al. Effect of co-planting of *Sedum alfredii* and *Zea mays* on Zn-contaminated sewage sludge [J]. Environmental Science, 2007, 28 (4): 4852-4858 (in Chinese)
- [105] 丘锦荣. 城市污泥的植物处理利用研究[D]. 广州: 华南农业大学, 2008: 24-52
- Qiu J R. Phyto-treatment and reuse of municipal sewage sludge [D]. Guangzhou: South China Agricultural University, 2008: 24-52 (in Chinese)
- [106] 魏树和, 周启星, 王新, 等. 某铅锌矿坑口周围具有重金属超积累特征植物的研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004(3): 33-39
- Wei S H, Zhou Q X, Wang X, et al. Hyperaccumulative characteristics of some weeds distributed round a Pb-Zn mining site [J]. Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control, 2004(3): 33-39 (in Chinese)
- [107] 聂发辉. 关于超富集植物的新理解[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 136-138
- Nie F H. New comprehensions of hyperaccumulator [J]. Ecology and Environmnet, 2005, 14(1): 136-138 (in Chinese)
- [108] 周睿人, 刘家女, 周启星. 一种利用四季春花卉修复镉、铅和砷多重污染土壤的方法: CN201310470919.2 [P]. 2013-12-25
- [109] 魏朝丹, 周兰英, 李端平. 利用观赏植物白雪姬修复铅污染的潜力研究[J]. 环境科学学报, 2011, 31(10): 2290-2297
- Wei C D, Zhou L Y, Li C P. Investigation on the reparative potential of Pb pollution by ornamental plant *Tradescantia sillamontana* [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2011, 31(10): 2290-2297 (in Chinese)
- [110] 荣伟英, 周启星, 蔡章. 一种利用水生植物千屈菜修复铬污染水体的方法: CN201110306159.2[P]. 2012-03-21
- [111] 宁平, 曾向, 东贺彬, 等. 一种治理铅污染土壤的植物修复方法: CN200610048663.6[P]. 2007-02-28
- [112] 张少卿. 野苘蒿在铅、锌和镉胁迫下的耐性和富集特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2011: 12-50
- Zhang S Q. Tolerance and accumulation characteristics of *Crassocephalum crepidioides* (Benth) S. Moore under cadmium, lead and zinc stress [D]. Ya' an: Sichuan Agricultural University, 2011: 12-50 (in Chinese)
- [113] 祝鹏飞, 宁平, 曾向东, 等. 有色冶炼污染区土壤污染及重金属超积累植物的研究[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(1): 48-51
- Zhu P F, Ning P, Zeng X D, et al. Soil pollution and heavy metals hyperaccumulators around two sites contaminated by smelting [J]. Safety and Environmental Engineering, 2006, 13(1): 48-51 (in Chinese)
- [114] 王艳敏, 周鸿, 谭洪涛, 等. 江西省某稀土矿区粮食中稀土元素含量及人群健康风险评价[J]. 现代预防医学, 2020, 47(17): 3239-3242
- Wang Y M, Zhou H, Tan H T, et al. Residual levels of rare earth elements in crops and their health risk assessment from mining area, Jiangxi [J]. Modern Preventive Medicine, 2020, 47(17): 3239-3242 (in Chinese)
- [115] 张世熔, 李隆, 夏春兰, 等. 巨桉在修复稀土元素镉污染土壤中的应用: CN102744248A[P]. 2012-10-24 ◆