中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture
中文核心期刊
中国科技核心期刊
中国精品科技期刊
百种中国杰出学术期刊
中国科学引文数据库源刊

重金属污染土壤间作修复的研究进展

郭思宇，王海娟，王宏镔

引用本文:
郭思宇, 王海娟, 王宏镔. 重金属污染土壤间作修复的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 890–902.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.200635

(向下翻页，阅读全文)

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

续断菊与玉米间作的铅累积及根系低分子量有机酸分泌特征研究

Lead accumulation and low–molecular–weight organic acids secreted by roots in *Sonchus asper* L.–*Zea mays* L. intercropping system

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 867–875 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190841

紫花苜蓿、黑麦草和狼尾草对Cu、Pb复合污染土壤修复能力的研究

Phytoremediation of single and combined pollution of Cu and Pb by Medicago sativa, Lolium perenne, and Pennisetum alopecuroides

中国生态农业学报. 2018, 26(2): 303–313 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170363

重金属污染农田安全利用:进展与展望

Safe utilization of farmland contaminated with heavy metals in China:Progress and outlook

中国生态农业学报. 2018, 26(10): 1555–1572 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.180573

铅胁迫下小花南芥与玉米间作对根系分泌物有机酸的影响

Effects of Arabisalpina L. var. parviflora Franch and Zea mays L. intercropping system on root–exudated organic acids under lead stress

中国生态农业学报. 2016(3): 365–372 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150931

重金属超富集植物龙葵对镉响应的蛋白组学分析

Proteomic analysis of Cd–responsive proteins in hyper–accumulator Solanum nigrum

中国生态农业学报. 2015(11): 1429–1436 https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.150245

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 5 月 第 29 卷 第 5 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, May 2021, 29(5): 890−902

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.200635

郭思宇, 王海娟, 王宏镔. 重金属污染土壤间作修复的研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 890−902
GUO S Y, WANG H J, WANG H B. Advances in the intercropping remediation of heavy metal polluted soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(5): 890−902

重金属污染土壤间作修复的研究进展*

郭思宇, 王海娟, 王宏镔**

(昆明理工大学环境科学与工程学院/云南省土壤固碳与污染控制重点实验室 昆明 650500)

摘 要: 种植单一的超富集植物修复重金属污染土壤, 不但中断农业生产导致经济收益降低, 而且因生物量较低、修复周期长等诸多弊端导致修复效果不甚理想。间作作为一种传统的农艺管理方式, 利用生态位和生物多样性原理等能提高农作物对资源的有效利用, 对共植的农作物种类增量提质。在中、轻度污染土壤修复中利用间作体系, 通过调控超富集植物与农作物的生长发育, 促进超富集植物根系低分子量有机酸(LMWOAs)的分泌, 降低其根际土壤 pH, 增加重金属活性, 从而增加超富集植物对重金属的吸收, 同时抑制农作物根系 LMWOAs 的分泌, 以减少农作物对重金属的吸收, 提高其产量和品质, 实现"边生产边修复", 提高土地利用率, 并增加经济效益。本文根据近几年来国内外相关文献, 综述了间作条件下超富集植物和农作物生物量、生理生化响应、重金属吸收、转运、富集等方面的变化, 以及间作对土壤环境质量的影响, 并对间作修复重金属污染土壤领域的发展趋势, 如超富集植物和农作物间作的信号转导和分子生物学机制、间作体系下两类植物根际微生物类群的差异及其功能机制, 以及构建高效间作体系提高重金属污染土壤的修复效率等方面进行了展望。

关键词: 超富集植物; 间作; 重金属; 农作物; 土壤修复

中图分类号: X53 开放科学码(资源服务)标识码(OSID):

Advances in the intercropping remediation of heavy metal polluted soil*

GUO Siyu, WANG Haijuan, WANG Hongbin**

(Faculty of Environmental Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology / Yunnan Key Lab of Soil Carbon Sequestration and Pollution Control, Kunming 650500, China)

Abstract: Phytoextraction is an efficient, novel, economic, green, and low-risk method for metal-polluted soil remediation that harvests metal hyperaccumulators to remove heavy metals from the soil. The cultivation of a single hyperaccumulator for the remediation of heavy metal-polluted soil not only interrupts agricultural production, leading to economic loss, but also results in low remediation efficiency owing to many disadvantages, such as low biomass and long remediation cycle. As a traditional agronomic management method, intercropping can improve the utilization efficiency of resources and increase the quality of co-planted crop species by using the principles of ecological niche and biodiversity. For the remediation of moderately or lightly metal-polluted soil, an intercropping system can be used to increase the concentrations of heavy metals in hyperaccumulators by regulating the growth and development of the hyperaccumulators and crops. Furthermore, the antioxidative ability of the hyperaccumulators and crops is also improved, which decreases the contents of peroxidation products, such as malondialdehyde and reactive oxygen species, in the cell membrane lipids. Intercropping generally enhances low molecular weight organic acid (LMWOA) secretion from the roots of heavy metal hyperaccumulators, decreases the pH value of

* 国家自然科学基金项目(31960264)资助
** 通信作者: 王宏镔, 主要研究方向为污染环境的生物修复。E-mail: whb1974@126.com
郭思宇, 主要研究方向为污染环境的植物修复。E-mail: 597791412@qq.com
收稿日期: 2020-08-02 接受日期: 2020-10-17
* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31960264).
** Corresponding author, E-mail: whb1974@126.com
Received Aug. 2, 2020; accepted Oct. 17, 2020

rhizospheric soil, increases the activity of heavy metals, and consequently promotes heavy metal uptake by hyperaccumulators. However, LMWOA secretion from the crop roots is inhibited, resulting in decreased heavy metal uptake and improved crop yield and quality. Decreased heavy metal uptake by crops reduces the risk to human health, and the increased metal accumulation in hyperaccumulators enhances the removal of heavy metals from the soil. Moreover, the benefits to farmers are not affected or may even increase when using intercropping remediation technology. Therefore, the land utilization rate and economic benefits increase based on the "production while remediated" approach. This study systematically reviewed changes in biomass, physiological and biochemical responses, heavy metal uptake, translocation, and accumulation in hyperaccumulators and crops, as well as the effects of intercropping on soil environmental quality. While many studies examining the effects of intercropping systems on heavy metal hyperaccumulators and crops had focused on growth and development, metal uptake, translocation, accumulation, and physiological and biochemical responses to heavy metal stress, little information was available on the underlying molecular mechanisms of the physiological and biochemical processes. Additionally, the effects of intercropping on the microbial composition of the rhizosphere of heavy metal hyperaccumulators and crops and the related ecological implications and main function mechanisms remained unclear. From these unsolved questions, future perspectives in this field, such as the signal transduction and molecular mechanisms of the intercropping system of hyperaccumulators and crops, the different and functional mechanisms of rhizosphere microorganisms of two plants, and how to construct an efficient intercropping system to improve the remediation efficiency of heavy metal-polluted soil, were also proposed.

Keywords: Hyperaccumulator; Intercropping; Heavy metals; Crops; Soil remediation

当前我国所要解决的生态危机不是单方面的环境污染, 而是人口激增、资源破坏和短缺等多方面综合效应。植物修复(phytoremediation)一般所采用的方法是利用超富集植物超强的重金属富集能力, 吸收土壤重金属后及时收获植株, 从而降低土壤中重金属含量[1]。然而超富集植物在修复过程中往往存在中断农业生产、生长周期长、生物量低等缺点, 加之目前发现的重金属超富集植物往往具有经济价值低的特点, 单一种植超富集植物难以激发农民的种植积极性, 且当前农作物种植中, 品种单一化不仅导致病虫害严重, 而且杂草丛生, 大量化学物质投入也造成土壤、水体和农产品的严重污染。在环境保护过程中, 应以有限的资源为基础, 生产出更多的产品, 以满足经济和社会的发展需要, 力求达到生态、社会和经济效益的协调统一。因此, 为达到农业生产和土壤重金属污染治理的双重目的, 做到"边生产边修复", 因地制宜建设良性的社会-经济-自然复合生态系统, 超富集植物与农作物的间作修复应运而生。除了合理利用资源、获得良好的经济和社会效益外, 还能促进农业生态环境的保护和修复。在超富集植物-农作物-土壤构成的间作体系中, 各组分究竟发生了什么变化是一个值得深入总结和探讨的重要科学问题。本文综述了间作条件下超富集植物和农作物生物量、生理生化响应、重金属吸收、转运、富集等方面的变化, 以及间作对土壤环境质量的影响, 并对间作修复重金属污染土壤领域的发展趋势进行展望。

1　重金属污染土壤间作修复的生态学意义

间作是我国精耕细作的农艺管理方式之一, 利用人工调控物种共生原理, 结构与功能相协调原则分层多级利用物质, 对发挥土地生产力具有重要的生态经济价值。共生期内的两种作物种植可以增加同一地块的生物多样性并调节种间关系, 通过协调种植过程中的物种配置和组合关系, 使每种作物或品种在空间和营养生态位上互补扩大[2], 实现作物对光、气、热、水、肥等资源的最大限度有效利用, 减少病虫害的发生, 同时增加土壤中一些酶的活性进而使土壤微生物生存环境得到改善, 最终提高农作物产量和品质[3-4]。

在植物修复过程中应用间作体系, 具有显著的生态学意义。通常采用高的农作物与矮的超富集植物间作, 高农作物[如玉米(*Zea mays* L.)等]为超富集植物提供了遮荫环境, 在充分利用生态位的同时改善了超富集植物生长的小气候, 增加物种多样性并减少病虫害的发生。此外, 待修复完成后, 及时收获富集了大量重金属的超富集植物并进行妥善处理, 农作物的根和茎叶腐烂后, 可以增加土壤有机质的含量, 从而提高土壤肥力。总之, 在种植超富集植物对土壤进行修复的过程中, 通过与农作物间作进行可持续的农业生态系统设计, 不需要停耕原来种植的农作物, 可实现边生产边修复, 从而提高了土地利用效率, 产生显著的经济收益。玉米和铅超富集植物土荆芥(*Chenopodium ambrosioides* L.)[5]、镉/锌超富集植物伴矿景天(*Sedum plumbizincicola* X. H. Guo et S. B. Zhou sp. nov.)与玉米[6]、镉超富集植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)与大葱(*Allium fistulosum* L.)[7]等众多间作试验结果均表明, 间作在不影响农作物长势、生物量的情况下, 对土壤进行了修复。

间作体系在强化植物修复效率的同时未损害农民的经济收益，并降低了土壤中重金属的含量，具有较强可行性与公众可接受性。

2 间作修复条件下的超富集植物

2.1 间作对超富集植物生物量的影响

超富集植物修复重金属污染土壤的原理是利用其根系选择性吸收重金属并运输至地上部，土壤所去除的重金属总量是植物组织的金属含量乘以生物量的积，较高的生物量意味着土壤中较多重金属被去除，取得更好的修复效果[8-9]。

农作物类别和品种对超富集植物的生长发育具有促进与抑制的双重作用。在砷超富集植物大叶井口边草(*Pteris cretica* var. *nervosa* Thunb.)与不同品种玉米[10]、锌/镉超富集植物东南景天(*Sedum alfredii* H.)与蓖麻(*Ricinus communis* L.)[11]、苜蓿(*Medicago sativa* L.)[12]、镉(Cd)富集植物龙葵[13]与茄子(*Solanum melongena* L.)间作系统中，超富集植物的生长均受到抑制，其中与茄子间作的龙葵根、茎、叶及地上部生物量较龙葵单作显著减少 6.78%、29.77%、43.38%和 37.38%[13]。产生这种现象的原因可能是由于此类农作物与超富集植物对资源的需要或利用方式相同，形成了种间竞争，而农作物的竞争能力更强，可以更多地利用土壤中的氮、磷和有机质等，超富集植物在竞争中则处于劣势地位，导致其生物量显著降低[13]。但是，也有一些相反的结果。铅超富集植物土荆芥和蚕豆(*Vicia faba* L.)、玉米间作，伴矿景天与玉米间作[6]，都不同程度提高了超富集植物的生物量，例如土荆芥地上部和根部生物量分别显著增加 166%和 134%。几种重金属超富集植物与部分农作物间作后的生物量变化情况如表 1 所示。从表中可以看出，选择生长习性合适的超富集植物与农作物间作、产生较高生物量从而更好地进行重金属提取对于间作体系至关重要。

表 1 间作条件下几种重金属超富集植物与农作物的生物量变化

Table 1 Changes of plant biomass in several heavy metal hyperaccumulators and crops under intercropping condition

超富集植物 Hyperaccumulator		农作物 Crop		生物量 Biomass		参考文献 Reference
名称 Name	特性 Characteristics	名称 Name	特性 Characteristics	超富集植物 Hyperaccumulator	农作物 Crop	
伴矿景天 *Sedum plumbizincicola* X. H. Guo et S. B. Zhou sp. nov.	喜日光充足、温暖，超富集镉、锌 It prefers to enough daylight and warm, and hyperaccumulating Cd and Zn	玉米 *Zea mays* L.	一年生禾本植物，喜温暖 Annual grass, preferring to warm condition	显著上升 20.3%~73.4% Increased significantly by 20.3%−73.4%	显著上升 12.2%~52.4% Increased significantly by 12.2%−52.4%	[6]
东南景天 *Sedum alfredii* H.	喜日光充足、温暖，超富集镉、锌 It prefers to enough daylight and warm condition, and hyperaccumulates Cd and Zn	蓖麻 *Ricinus communis* L.	一年生或多年生草本，喜高温，不耐霜，酸碱适应性强 Annual or perennial grass, preferring to high temperature, not tolerant to frost, but strongly adaptive to acid and alkali conditions	生物量变化不显著 The variation was not significant	/	[11]
		苜蓿 *Medicago Sativa* L.	耐干旱，耐冷热 Tolerant to drought, cold and heat	生物量变化不显著 The variation of biomass was not significant	/	[12]
龙葵 *Solanum nigrum* L.	一年生草本植物，喜光、温暖，超富集镉 It is an annual grass, prefers to light and warm condition, and hyperaccumulates Cd	番茄 *Solanum lycopersicum* L.	一年生或多年生草本植物，喜温喜光 Annual or perennial grass, preferring to warm and light condition	根系、茎秆、叶片及地上部分生物量显著提高 28.88%、24.11%、11.75%和 17.20% The biomasses of roots, stems, leaves and shoots increased significantly by 28.88%, 24.11%, 11.75% and 17.20%, respectively.	根系、茎秆、叶片及地上部分生物量显著提高 26.93%、23.29%、35.32%和 30.27% The biomasses of roots, stems, leaves and shoots increased significantly by 26.93%, 23.29%, 35.32% and 30.27%, respectively.	[13]
		茄子 *Solanum melongena* L.	喜高温，对光照时间、强度要求较高 Preferring to high temperature and with a high demand for light duration and intensity	根系、茎秆、叶片及地上部分生物量显著减少 6.78%、29.77%、43.38%和 37.38% The biomasses of roots, stems, leaves and shoots decreased significantly by 6.78%, 29.77%, 43.38% and 37.38%, respectively.	根系、茎秆、叶片及地上部分生物量显著减少 40.82%、43.33%、41.13%和 41.97% The biomasses of roots, stems, leaves and shoots decreased significantly by 40.82%, 43.33%, 41.13% and 41.97%, respectively.	[13]

续表 1

超富集植物 Hyperaccumulator		农作物 Crop		生物量 Biomass		参考文献 Reference
名称 Name	特性 Characteristics	名称 Name	特性 Characteristics	超富集植物 Hyperaccumulator	农作物 Crop	
龙葵 *Solanum nigrum* L.	一年生草本植物，喜光、温暖，超富集镉 It is an annual grass, prefers to light and warm condition, and hyperaccumulates Cd	大葱 *Allium fistulosum* L.	喜氮、钾肥 Preferring to N and K fertilizers	不影响生长 The growth of was not affected.	不影响生长 The growth of was not affected.	[7]
		大白菜 *Brassica pekinensis* L.	耐寒，喜好冷凉 Tolerant to cold, and preferring to cool	不影响生物量 The plant biomass was not affected	不影响生物量 The plant biomass was not affected	[14]
		玉米 *Zea mays* L.	一年生禾本，喜温暖 Annual grass, preferring to warm condition	根、茎、叶、籽粒生物量分别下降 39.7%、23.3%、22.8%、36.3% The biomasses of roots, stems, leaves and grains decreased by 39.7%, 23.3%, 22.8% and 36.3%, respectively.	/	[15]
蜈蚣草 *Pteris vittata* L.	喜阴，超富集砷 It prefers to shading condition, and hyperaccumulates As	玉米 *Zea mays* L.	一年生禾本，喜温暖 Annual grass, preferring to warm condition	/	不影响产量 The yield was not affected	[16]
		桑树 *Morus alba* L.	喜温暖湿润，稍耐荫 Preferring to warm and humid climate, and lightly tolerant to shading	总生物量显著提高 115.42%，根、根茎和叶生物量分别提高 58.2%、94.8%和 175.4% The total biomass increased by 115.42%, and the biomasses of roots, rhizomes and leaves increased by 58.2%, 94.8% and 175.4%, respectively.	生物量略低于单作处理 The intercropping biomass was slightly lower than that of monoculture	[17]
		蓖麻 *Ricinus communis* L.	一年生或多年生草本，喜高温，不耐霜，酸碱适应性强 Annual or perennial grass, preferring to high temperature, sensitive to frost, but strongly adaptive to acid and alkali conditions	促进根系和枝条生长，生物量变化不显著 The growth of roots and shoots was promoted, but the variation of plant biomass was not significant.	产量变化不显著 The variation of yield was not significant	[18]
		构树 *Broussonetia papyrifera* (L.) Vent.	喜光，耐干旱瘠薄，也能生于水边 Preferring to light and tolerant to drought and barren, also growing at waterside	生物量未显著提高 The biomass did not increase significantly	生物量略低于单作处理 The intercropping biomass was slightly lower than that of monoculture	[17]

将 4 个镉超富集植物孔雀草(*Tagetes patula* L.)的不同品种(矮秆红花、矮秆黄花、高秆红花和高秆黄花)与油菜(*Brassica chinenesis* L.)[19]间作后，发现超富集植物的根系和地上部分的生物量较单作显著增加，增幅分别为 57.4%~89.9%、39.2%~57.5%。砷、汞胁迫对超富集植物生长都表现出一定的“低促高抑”作用，当砷和汞浓度累积到一定值时，会扰乱植物体内正常的新陈代谢，导致植物叶片坏死和枯萎、生物量降低甚至死亡[20]。间作所增加的植物地上部生物量能为重金属提供更多的蓄积位置，避免重金属过多聚集在某一部分，从而降低对植物生理生化造成的负面影响[21]。

2.2　间作对超富集植物生理生化的影响

植物体内的活性氧(reactive oxygen species, ROS)与抗氧化酶如超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和过氧化氢酶(catalase, CAT)等的活性之间存在动态平衡，是植物及时清除体内 ROS 并保持正常生长的内源保护机制[22]。然而重金属胁迫下，ROS 在植物细胞内的过度积累将打破这种平衡从而导致蛋白质变性、DNA 损伤、细胞酶失活以及膜脂过氧化损伤等，甚至会导致细胞死亡[23-24]。与番茄(*Solanum lycopersicum* L.)[13]间作后，镉超富集植物龙葵叶片 SOD 活性与单作相比无显著差异，但 POD 和 CAT 活性分别显著提高 68.71%和 5.66%。SOD 催化超氧阴离子自由基歧化生成 O_2 和 H_2O_2; POD 能调控植物体内吲哚乙酸(IAA)含量水平，免除机体内产生 H_2O_2 的毒害作用; CAT 则将 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2，参与谷胱甘肽-抗坏血酸循环，从而将细胞中的 H_2O_2 去除[25]。间作体系中超富集植物体内抗氧化酶

活性的增加降低了 ROS 的含量，缓解重金属带来的植物细胞过氧化程度，减轻了过氧化作用，从而在一定程度上缓解了细胞膜结构和功能的损伤，提高植物对重金属胁迫的耐性。

可溶性糖和可溶性蛋白在植物适应重金属胁迫的渗透调节中发挥着重要作用。龙葵与番茄间作[13]中龙葵叶片的可溶性蛋白含量显著增加，植株根系、茎秆、叶片及地上部分可溶性糖含量较龙葵单作分别显著提高 89.06%、82.30%、79.76%和 81.77%。这些结果表明，间作通过增强抗氧化酶活性、可溶性蛋白和可溶性糖含量，提高了超富集植物自身对重金属的耐受程度。

2.3 间作对超富集植物富集重金属的影响

间作体系影响超富集植物对重金属的富集和转运。间作桑树(*Morus alba* L.)[26]、构树[*Broussonetia papyrifera* (L.) Vent.][17]提高了蜈蚣草(*Pteris vittata* L.)体内砷的积累；在镉胁迫下，龙葵间作葡萄(*Vitis vinifera* L.)幼苗[27]、牛膝菊(*Galinsoga parviflor* Cav.)间作生菜(*Lactuca sativa* L.)[28]能显著增加超富集植物体内的镉含量。通过提高重金属在土壤中的生物有效性促进超富集植物地下部的吸收和地上部的积累，玉米间作使镉富集植物续断菊(*Sonchus asp*er L. Hill)[29]植株中镉含量提高，各镉浓度处理下(0~50 mg·kg^{-1}、200 mg·kg^{-1})间作与单作续断菊相比，间作续断菊体内镉含量显著提高 31.4%~79.7%，这与黑亮等[30]对间作玉米增加东南景天锌含量的结果相类似。这些结果表明间作体系提高了超富集植物对重金属的吸收和富集系数(植物体内重金属含量与土壤中重金属含量的比值)，因此间作体系能更好地增加超富集植物对重金属的富集，提高土壤修复效果。

由于外部形态及内部结构的差异，植物吸收重金属元素的生理生化机制不同，不同部位对重金属的富集量也存在显著差异。从拔节期到成熟期，间作续断菊[31]的根部及地上部镉含量分别增加 16.88 mg·kg^{-1}、15.45 mg·kg^{-1}，但单作仅分别增加 5.5 mg·kg^{-1}和 10.09 mg·kg^{-1}，两种不同种植方式的镉含量增幅存在显著差异。根是与土壤或水体直接接触的器官，作为吸收土壤中重金属的主要部位，根系状态(例如根长、根表面积、根体积、侧根数和根系活力等)影响着超富集植物吸收土壤中养分和重金属的能力。与单作相比，间作续断菊地上部和根部生物量、根长、根内径和根系体积均显著增加[32]。提高超富集植物根系发达程度有助于超富集植物吸收更多营养物质，增加更多的重金属储蓄位置从而增加重金属富集量。根系对土壤重金属的吸收能力较强但生物量较低，地上部拥有大的生物量意味着重金属含量的增加即更高的修复效率。

针对超富集植物间作后重金属含量与单作时存在差异这一结果，研究者用间作后的根际微环境变化来解释相关机理。秦丽等[32]发现间作增加了续断菊对铅的吸收和富集量，原因是间作体系中超富集植物根系分泌的低分子量有机酸(LMWOAs)增加了土壤有效态铅含量。续断菊根系所分泌的低分子量有机酸如柠檬酸是三元酸，具有良好的配位(络合)作用，能活化土壤中的重金属从而提高 Pb^{2+}活度。当两种植物间作时，超富集植物根系柠檬酸、草酸的分泌量增加，进而活化铅并促进对铅的吸收和富集。这与铅超富集植物小花南芥(*Arabis alpina* L.var. *parviflora* Franch)、锌/镉超富集植物东南景天地上部分铅、锌含量在间作条件下均增加的研究结果相似[33-34]。对于间作条件下农作物正常生长、超富集植物对重金属的提取能力增加，还可能与超富集植物对离子吸收运输的通道密切相关。例如 Sasaki 等[35]克隆出的耐铝基因 *ALMTI* 可以编码苹果酸转运子，在植物体内表达从而增加苹果酸的分泌量，活化重金属从而增加超富集植物的富集量。不同重金属胁迫、植物种类以及所分泌的各种低分子量有机酸对植物产生各种影响，表明有机酸分泌可能与离子通道有关。了解植物根系分泌通道与有机酸分泌的差异，对提高超富集植物对重金属的富集、降低农作物对重金属的吸收和转运，最终提高农作物的品质具有重要的现实意义。

3 间作修复条件下的农作物

3.1 间作对农作物产量的影响

产量是反映植物生长状况和经济收益的一个重要指标。对与镉超富集植物间作的十字花科(Brassicaceae)蔬菜的研究结果表明，与单作相比，水菠菜(*Ipomoea aquatica* Forsk)[36]根、茎、叶生物量分别显著增长 28.72%、45.90%和 7.74%，且根茎比(根生物量与茎生物量之比)也比单作提高。生菜与矿穗生态型牛膝菊(矿山生态型牛膝菊为接穗进行嫁接)间作[28]，既能显著降低生菜可食用部位镉含量，还能促进其生长。在间作体系中蔬菜作物的地下部和地上部生物量均有增加，显著提高了作物的产量进而增加了经济价值。龙葵与玉米[37]、续断菊与玉米间作后，间作玉米籽粒产量显著高于单作，且与续断菊间作的玉米籽粒产量的收获指数与单作相比

具有显著差异[31]。

植物通过光合作用合成有机物, 是农作物产量形成的基础。间作之所以能够提高玉米的产量, 是因为间作存在的植物株高差能改变冠层内的光分布并增加光能利用效率, 从而增加叶片光合能力和干物质积累并分配到籽粒中[38-39]。间作体系中冠层内的小气候环境, 特别是太阳辐射或光能利用效率对作物生产力至关重要, 玉米需要更多光能, 为其下生长的砷超富集植物蜈蚣草创造了喜阴环境, 从而加快了蜈蚣草的生长发育。Singh 等[40]发现砷、汞能取代叶绿素分子中的镁离子并降低叶绿素合成酶的活性, 使叶绿素合成降低, 同时增加叶绿素分解酶的活性, 使叶绿素含量减少, 从而降低了光合色素的含量和比例, 光合参数的变化反映了光合作用的强弱, 从而影响有机质的合成。Tang 等[36]发现与单作相比, 间作水菠菜的叶绿素 a、总叶绿素和类胡萝卜素含量均显著增加, 间作缓解了重金属带来的抑制, 在加强农作物自身抵抗力的同时增加干物质的积累。

间作体系中作物生物量的变化是地上部与地下部综合作用的结果, 且地下部作用大于地上部。间作小花南芥[33]使玉米分根条数、根表面积和根密度与单作相比分别显著增加 60%、15%和 42%, 干重增加 108%。作为固定、运输和吸收营养物质的重要器官, 发达的根系能提高植株对土壤中营养物质的吸收利用, 从而增加作物的生物量。

3.2　间作对农产品品质的影响

不同间作方式下玉米籽粒砷积累水平均较低, 能满足《食品安全国家标准　食品中污染物限量》(GB 2762—2017)中玉米籽粒砷含量限值[16]。谭建波等[31]认为间作增加了农作物的生物量, 更大的生物量意味着重金属在籽粒浓度上产生了所谓的“稀释效应”, 这与 Feil 等[41]、夏海勇等[42]发现氮肥施用提高玉米籽粒产量、降低重金属吸收量的结果相似。但在蜈蚣草与蓖麻[18]共植中, 虽未对蓖麻产量产生显著影响, 却降低了蓖麻籽粒的砷含量。这是由于间作使作物砷从营养器官向籽粒的转移速率受到抑制, 从而籽粒的砷含量低于单作玉米。在单作或间作方式下, 玉米吸收镉的主要部位均在根部, 但间作显著降低了玉米的转运系数(植物地上部重金属含量与地下部重金属含量的比值), 降低了玉米向地上部转运重金属的能力, 所以籽粒中镉含量降低[29]。关于转运系数的变化可以从植物根系之间的“根际对话”研究得到解释。农作物体内重金属含量降低的一个主要原因是土壤胶体、土壤有机质特别是超富集植物的根系分泌物等吸附、固定了一部分游离的重金属。Yang 等[43]发现一些植物分泌的磷酸盐可与铅结合生成难溶的 $Pb_3(PO_4)_2$, 使土壤中的铅被钝化, 降低了铅的生物有效性和移动性; 间作系统中植物根系之间的相互作用进一步改变了根系分泌低分子量有机酸的组成和比例, 超富集植物抑制了农作物根系分泌的低分子量有机酸的数量和类型, 致使土壤中更少的重金属被活化, 从而降低了农作物对重金属的吸收。间作续断菊体系发现玉米根系柠檬酸含量降低, 更少的 Pb^{2+}被活化, 根际土壤有效态铅含量降低, 转运系数平均为 0.56, 显著降低 12.51%[32]。另一个原因是超富集植物对重金属的吸收能力强于农作物, 其根系能优先吸收和转运土壤中的重金属, 减少了农作物根际土壤的重金属含量, 从而降低主栽农作物对重金属的吸收。龙葵与玉米间作体系中[15], 玉米根际镉含量和转运系数均显著降低, 可食部分(籽粒)中的重金属含量显著减少, 也说明由于根系间的一系列作用使植物根际环境发生变化, 超富集植物发生类似向肥性的重金属“觅食”现象, 抑制了玉米对重金属的吸收, 通过对人体每天摄入镉量的安全值计算得出间作后土壤中镉全量低于 2.26 $mg\cdot kg^{-1}$, 土壤有效态镉含量低于 0.88 $mg\cdot kg^{-1}$。该污染农田在间作模式下, 食用玉米镉暴露对居民健康不存在风险。总体而言, 间作系统能有效降低土壤中重金属含量, 且收获作物的品质符合国家相关食品中污染物限量标准。

3.3　间作对农作物生理生化的影响

重金属胁迫诱导的细胞膜脂过氧化是体内活性氧(ROS)积累量超过一定的阈值而引起的, 破坏植物各生理生化过程的正常运作, 如植物生长状态、水和养分吸收的调整、光合作用的维持、呼吸和蒸腾作用等, 植物可通过体内存在的 ROS 抗氧化酶促清除系统来减轻胁迫。抗坏血酸-谷胱甘肽循环是植物体内的一个重要代谢过程, 对逆境胁迫下植物发挥抗氧化能力起重要作用。与此同时, SOD、CAT、POD 等抗氧化酶能够保护细胞免受高浓度活性氧的侵害。在镉胁迫下的间作体系中, 超富集植物农穗型牛膝菊(农田生态型作为接穗进行嫁接)及矿穗型牛膝菊间作生菜[28]处理显著提高了生菜叶片 POD 及 CAT 活性, 但对 SOD 活性无显著影响。龙葵与番茄间作后[13], 与番茄单作相比, 地上部 POD 和 CAT 活性显著增加 43.82%和 9.86%。间作通过抗氧化作用不同程度缓解了重金属胁迫下活性氧对农作

物的毒害。活性氧在植物体内积累会造成细胞膜脂过氧化，引起有害过氧化产物丙二醛(malondialdehyde, MDA)的积累，所以其含量通常作为脂质过氧化指标，反映植物受伤害程度。研究发现蜈蚣草与玉米共植后，玉米叶片 MDA 含量显著降低 21.51%，从而减轻膜系统受害程度[44]。该结果与铅、锌胁迫下黑麦草与假繁缕(*Theligonum macranthum* Franch)间作的结论一致[45]。胡容平等[13]还发现番茄可溶性蛋白较单作显著增加 47.06%，并认为这可能与农作物对重金属的耐受性有关，由于间作的此类农作物耐重金属能力较强，重金属的胁迫程度在其耐受范围之内，对重金属浓度表现出更好的“低促高抑”现象，所以间作时表现出良好的生理生化响应。研究还发现[46]一些蛋白质与光合作用密切相关，关于间作对农作物生理生化的影响，有待进一步深入研究。

4 间作修复条件下的土壤

土壤中养分和生物多样性等对植物的生存和保持生态系统的稳定性至关重要，了解植物根系活动(吸收和分泌 2 种方式)对土壤 pH、氮、磷、有机质含量和微生物等的影响，以及土壤中重金属的存在形态变化最终影响到植物对重金属吸收、迁移与富集等过程，是评价土壤修复效果的重要内容。

4.1 间作对超富集植物和农作物根际土壤理化性质的影响

与土壤中重金属生物有效性相关的指标包括土壤酸碱度、有机质含量、土壤重金属含量、土壤阳离子交换量、土壤矿物组成以及土壤中各元素间的交互作用等，通常认为 pH 和有机质是土壤重金属离子吸附、解吸、改变其形态分布和生物有效性的主要因素。

4.1.1 间作对农作物根际土壤理化性质的影响

土壤 pH 通过吸附和沉淀作用影响重金属的生物可利用度，一般情况下土壤中可交换态重金属含量会随 pH 升高而降低，并呈显著负相关。水稻(*Oryza sativa* L.)与再力花(*Thalia dealbata* Fraser)间作体系中，由于再力花吸收土壤中 NH_4-N 和 NO_3-N 后导致水稻根际土壤 pH 升高，土壤镉的生物有效性下降，减少了农作物对重金属的吸收[47]。

土壤有机质是植物生长的重要营养物质，也是一种运用较多的土壤改良剂，它可以改变土壤表面负电荷数量以及与重金属发生络合/螯合反应，进而增加重金属有机结合态含量，降低重金属离子的活性。张亚丽等[48]发现施用有机肥后，土壤有效态镉含量显著降低，降幅达 40%。与单作蚕豆相比，间作体系下的根系作用使蚕豆土壤中有机质较单作相比显著增加 12.64%[49]。有机质含量的增加，还可以提高铁锰氧化物在土壤中的活性，并促进可交换态重金属向有机结合态转化，从而降低了土壤中重金属的生物有效性[48]，因此可利用间作条件下有机质含量变化影响重金属形态提高农产品品质。

植物对土壤重金属的吸收、转运和富集除与其自身有关外，还与环境中土壤重金属的活性以及总量密切相关。间作条件下土壤镉的可交换态含量比单作蚕豆显著下降 21.98%。但碳酸盐结合态、铁锰氧化物结合态和有机物结合态含量未发生显著变化[49]。活性较高的重金属化学形态的降低能减少农作物对其的吸收和富集，重金属总量的降低也能提高后续耕种农作物的品质。

4.1.2 间作对超富集植物根际土壤理化性质的影响

间作玉米使镉富集植物续断菊[50]根际土壤 pH 显著下降，土壤中大量镉进入续断菊根系，再转运至地上部。这与曹顺利等[51]的研究结果一致，pH 降低后，土壤中所固定的铅被溶解，使与碳酸盐结合生成的 $PbCO_3$ 被释放出来。如图 1 所示，在重金属胁迫下，因为间作农作物促进了超富集植物低分子量有机酸的分泌，增加 H^+浓度，降低根际土壤 pH，增加重金属的生物有效性，从而提高超富集植物对重金属的富集量。

氮(N)在农作物产量增加方面起主要作用，但氮肥的施加也会增加农作物的生产成本，而且过量的氮肥施加会造成资源浪费。减少氮素投入的甘蔗(*Saccharum officinarum* L.)与大豆(*Glycine max* L.)间作提高了作物产量，并且减少了碳元素的释放[52]。磷是全球农业系统中的一种关键元素，是农作物生产过程中必需的营养物质，是作物代谢、核酸合成、光合作用、能量转化、结构发育和养分在植株内移动等过程中的关键成分。马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)[53]等作物由于其固定磷的作用，导致使用的磷肥不到 30%，磷利用率低意味着产量的损失，超富集植物与豆科(Leguminosae)植物间作时，豆科植物固氮过程中能通过根际一系列活动活化土壤中难溶性磷，供超富集植物利用，还可以向超富集植物转移部分氮素[54]，改善超富集植物的供氮条件，有利于其生长并提高生物量，从而增加超富集植物对重金属的吸收和富集。豆科植物的生物固氮作用不仅大大降低了氮肥淋失和水污染所造成的环境负面影响，

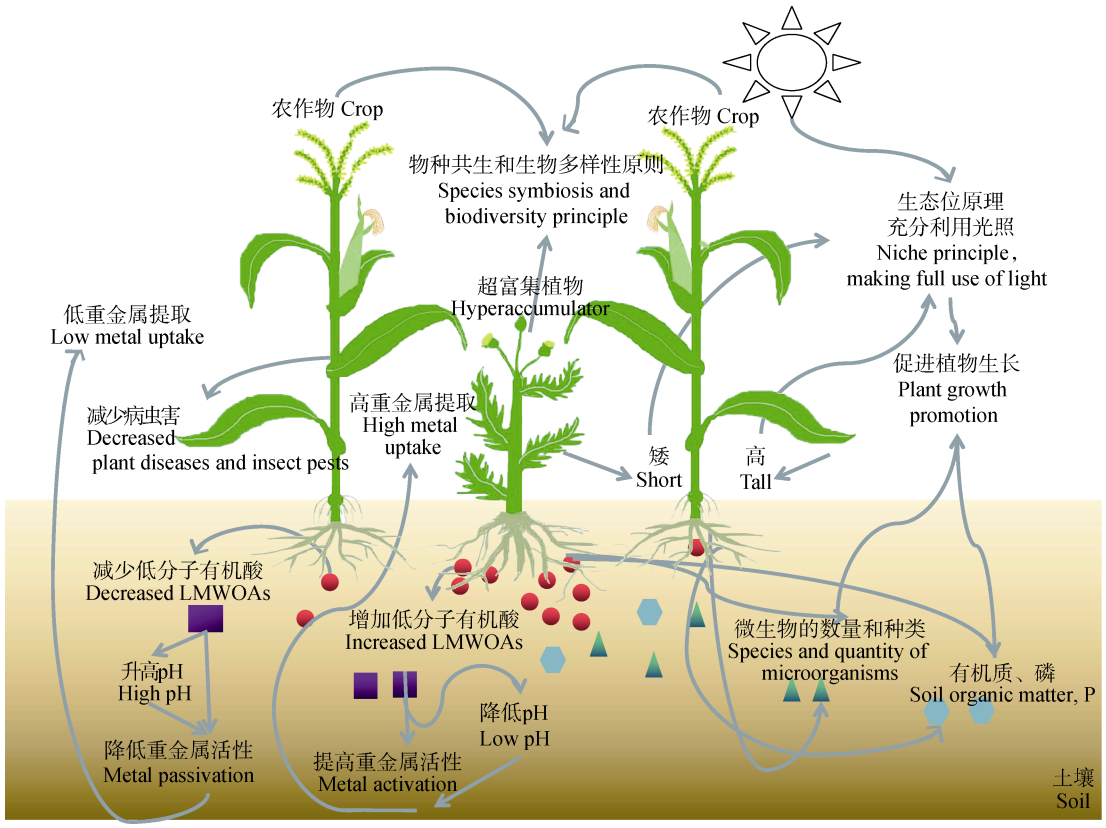

图 1　间作体系下超富集植物、农作物和土壤的关系示意图

Fig. 1　Relationship among hyperaccumulator, crop and soil in intercropping system

间作通过地下部促进超富集植物低分子量有机酸的分泌，降低超富集植物根际土壤 pH，增加重金属的活性和超富集植物对重金属的吸收；与此相反，间作抑制了农作物低分子量有机酸的分泌，增加根际土壤 pH，降低重金属的活性，减少农作物对重金属的吸收。间作还增加光能利用效率、土壤养分、微生物种类和数量等促进超富集植物与农作物生长发育。Under intercropping condition, the secretion of low molecular weight organic acids (LMWOAs) in roots of heavy metal hyperaccumulators is increased, decreasing the pH of their rhizospheric soil and increasing the activity of heavy metals, so the heavy metal uptake by hyperaccumulators is increased. However, the secretion of LMWOAs in roots of crops is inhibited, and the pH of rhizospheric soil is increased and the activity of heavy metals is decreased, so the heavy metal uptake by crops is decreased. The use efficiency of light, soil nutrition, as well as the species and quantity of soil microorganisms are also increased in intercropping system, which promotes the growth and development of heavy metal hyperaccumulators and crops.

形成的根瘤与间作植物竞争促进生物固氮，将大气中的氮转化为氨，保持了土壤肥力。氮素代谢对重金属毒性的响应十分重要，植物在镉胁迫下，会通过氮素代谢合成一组含氮的代谢产物，氮素代谢影响了植物的生长和发育等过程。有研究表明，氮代谢失调是植物受到镉毒害的重要原因，氮在一定程度上减少了锌肥施加下营养器官对铁和锌的吸收和再活化[55]，同时氮素供应充足改善了土壤肥力条件，促进超富集植物的生长并提高重金属富集效率。

4.2　间作对土壤生物学性质的影响

由于间作体系的根系分泌物在数量和质量上发生了差异，可以使微生物群落发生变化。研究土壤生物化学活性和微生物群落分布不仅有助于探索土壤生态过程，而且对生态系统的管理和土壤微生物资源的保护具有重要意义。土壤酶作为土壤有机质分解的主要介质，除了将有机质分解后释放无机养分到土壤中供给植物生长发育外，其活性与土壤微生物特性也密切相关。同时土壤有机质分解的无机养分能影响土壤酶的生化特性，反馈调节酶的分泌。

土壤酶活性显著受到间作的影响，在不施加有机肥条件下的玉米间作与单作相比[56]，土壤中的转化酶活性差异达显著水平；在添加有机肥的情况下，土壤中转化酶和磷酸酶活性在单作和间作中也具有显著差异。景天与油菜间作[57]能显著提高土壤细菌群落的多样性，主要表现在 δ 变形菌、γ 变形菌、拟杆菌带数增加，Shannon-Weiner 指数增大。内生细菌能促进根系发育，扩大土壤与根系的接触面积，从而增加细菌生活的定殖面积。这与沙银花等[58]研究发现雀稗(*Paspalum scrobiculatum* L.)与博落回[*Macleaya cordata* (Willd.) R. Br.]间作中土壤酶活性增强、土壤中酸杆菌门(Acidobateria)等耐受菌比例升高间接增加了植物的生物量、最终增加超富集植物对重金属富集量的结果类似。间作通过根系活动

明显改善土壤微生物和生化性能，促进超富集植物与农作物更好的生长，从而提高土壤修复的效率。

5 间作修复的田间应用

在田间条件下，间作修复不仅对超富集植物富集重金属的能力存在一定要求，较大的生物量、高繁殖力和易收割等特点也是筛选超富集植物时需要考虑的因素。目前，重金属超富集植物与农作物间作修复研究大部分是在室内进行，在室内充足灌溉和精心培育的条件下，有助于植物生长发育，但当受到现实大田复杂多变的因素影响时，超富集植物和农作物的生长、发育、重金属吸收情况等可能会发生变化，因此，将间作修复技术应用到实际工程中是十分重要与必要的。大田试验条件下研究发现，大白菜(*Brassica pekinensis* L.)和龙葵[14]间作对双方生物量无负面影响；随着植物生长发育时间周期的变化，小花南芥和玉米[33]生物量与单作相比均未发生显著变化，但田间间作试验续断菊[32]生物量相比单作显著增加 31.55%，间作玉米生物量比单作显著增加 29.02%。玉米与龙葵 5 种间作模式(玉米宽窄行宽行间作单行龙葵 T1、玉米宽窄行宽行间作双行交错龙葵 T2、玉米等行距间作单行龙葵 T3、玉米等行距间作双行交错龙葵 T4、玉米等 4 行距间作龙葵等 4 行距 T5)下，玉米单株各部位的生物量均高于单作玉米；T3 处理显著增加了玉米产量，增幅为 15.6%[37]。国际上通常用土地当量比(LER)来衡量间作后是否具有产量优势，LER>1 表明有间作优势，而 LER<1 则表现为间作劣势。试验发现 T1-T5 间作模式的土地当量比均大于 1，说明玉米与龙葵间作模式可以提高单位面积的总生物量，两种植物表现为种间促进作用。以上试验说明田间与盆栽结果一致，间作未对农作物和超富集植物生长起到抑制作用，可以作为重金属污染土壤的一种修复方式。

根际微环境研究发现与玉米间作后，铅超富集植物小花南芥根系分泌物增多，铅的生物有效性增加，进而促进小花南芥大量吸收铅[33]。另有研究表明，与拔节期相比，成熟期间作镉富集植物续断菊[32]后，玉米根、茎、叶镉含量分别降低 24.51%、29.06%、55.32%，在不同时期，间作条件下玉米根、叶镉含量以及籽粒镉、铅含量均显著低于单作；龙葵使玉米的富集系数较单作分别下降 68.5%，玉米转运系数下降 24.2%，且差异均达显著水平[15]。转运系数的降低阻控玉米根部镉向地上部(尤其是籽粒)的转移，使污染农田在间作修复模式下，防止重金属通过食物链镉暴露对居民健康产生风险。最好的间作修复体系是在保证作物产量升高情况下，作物可食部位镉含量不变或降低，同时最大限度提高超富集植物单位面积上总镉的提取量，进而实现“边生产边修复”的目的。就作物可食部位镉含量而言，龙葵与玉米 5 种间作模式均未显著改变玉米籽粒中镉含量，单位面积龙葵地上部总镉提取量也显著高于单作龙葵，各间作模式龙葵的根际有效态镉含量均呈增加趋势[37]。说明间作体系总体上促进了龙葵对镉的吸收和富集，且所有种植模式玉米镉含量均显著低于《食品安全国家标准 食品中污染物限量》(GB 2762—2017)所规定的限值。

6 结论与展望

6.1 结论

超富集植物与农作物间作可以调控两者的生长发育，从而增强超富集植物对重金属的耐性并提高其对重金属的吸收和富集，同时增加某些农作物的产量和品质，是一种“互利共赢”模式。超富集植物主要通过间作条件下增加生物量、提升抗氧化酶活性、降低 MDA 生成等机制，以减轻重金属对植物生理生化过程的影响从而吸收更多的重金属；农作物通过光能资源互补提高叶绿素含量和光合速率，并积累更多有机物以提高其可食部位品质。此外，间作增加超富集植物根系分泌的低分子量有机酸的种类与数量，并抑制农作物根系低分子量有机酸的分泌，从而增加超富集植物而减少农作物对重金属的吸收。此外，间作还通过增加氮、磷、土壤酶活性和微生物数量和种类等措施，促进超富集植物与农作物的生长，从而对农作物增产提质，提高超富集植物的土壤修复效率。

6.2 展望

6.2.1 超富集植物和农作物间作的信号转导和分子生物学机制有待深入研究

间作对于超富集植物和农作物的生长发育存在促进和抑制双重作用，目前关于间作对超富集植物和农作物的影响局限于生长发育状况、重金属富集能力和生理生化响应等方面的研究，对生理生化过程背后的分子生物学机制的研究相对较少，例如间作如何调动过氧化与抗氧化酶系统的平衡、其中的信号转导机制如何、是否改变激素参与等问题，目前少见文献报道。植物激素调节是一套复杂的应激系统，遗传物质和各类信号分子均参与其中，如赤霉素(GA_3)能逆转三唑类化合物的形态和胁迫保护

作用，乙烯能影响其信号转导机制，被认为与植物激素之间存在交叉反应[59]。由于植物激素网络的复杂性，间作如何调控植物激素的研究并不多见。在间作的影响下，哪些激素会发生变化，相应的基因又会如何表达？这些分子水平上的作用机制目前尚不清楚。

6.2.2 间作体系下超富集植物和农作物根际微生物类群的差异及功能机制

重金属污染显著降低土壤微生物多样性，但间作在一定程度上能缓解重金属胁迫并改善土壤微生物群落多样性。重金属含量增加产生的非生物胁迫导致土壤微生物生物量碳和氮含量降低，间作能提高土壤资源利用率和微生物多样性，通过提高土壤有机质、氮等从而对微生物种群的生长、繁殖和活性产生积极影响。土壤的物质循环和能量流动过程需要土壤微生物参与，土壤的许多重要生物化学过程也离不开土壤酶的存在，土壤微生物数量和酶活性通过影响土壤肥力进而影响到作物的品质、单株生物产量和大田产量，且彼此之间存在复杂的相互作用。目前尚不清楚间作如何影响超富集植物和农作物根际微生物的类群，以及所造成影响的生态学意义和相关的功能机制。

6.2.3 如何构建高效的间作体系提高重金属污染土壤的修复效率

超富集植物对重金属污染土壤修复效率的影响除自身特性(如耐受、富集和转运重金属的能力)外，根系生长特征以及环境变化的影响也至关重要。有研究表明，由于农作物与超富集植物间作的根系相互作用使根际环境发生改变，从而影响共植植物生长条件下土壤中重金属的生物有效性，最终体现在植株生长、重金属吸收以及土壤重金属含量等方面的变化。受植物根系在水平、垂直方向生长阈值的限制，土壤所受影响范围也得到限制，那么超富集植物和农作物的根系应该如何有效交互才能获得较好的修复效果，地下部的根系交互作用对植株地上部的影响如何？如何让超富集植物和农作物生态位适当分离并互利共生等问题，是今后在大田条件下推广间作修复模式必须考虑的重点。

参考文献 References

[1] AYANGBENRO A S, BABALOLA O O. A new strategy for heavy metal polluted environments: A review of microbial biosorbents[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(1): 94

[2] SUN H, TANG Y, XIE J S. Contour hedgerow intercropping in the mountains of China: A review[J]. Agroforestry Systems, 2008, 73(1): 65–76

[3] MA Y H, FU S L, ZHANG X P, et al. Intercropping improves soil nutrient availability, soil enzyme activity and tea quantity and quality[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 119: 171–178

[4] ABAD M K R, FATHI S A A, NOURI-GANBALANI G, et al. Influence of tomato/clover intercropping on the control of *Helicoverpa armigera* (Hübner)[J]. International Journal of Tropical Insect Science, 2020, 40(1): 39–48

[5] 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

[6] 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

[7] WANG S Q, WEI S H, JI D D, et al. Co-planting Cd contaminated field using hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. through interplant with low accumulation *Welsh onion*[J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(9): 879–884

[8] YANG J J, YOU S H, ZHENG J L. Review in strengthening technology for phytoremediation of soil contaminated by heavy metals[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, 242(5): 052003

[9] WAN X M, LEI M, CHEN T B. Cost–benefit calculation of phytoremediation technology for heavy-metal-contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2016, 563/564: 796–802

[10] 秦欢，何忠俊，熊俊芬，等. 间作对不同品种玉米和大叶井口边草吸收积累重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1281–1288
QIN H, HE Z J, XIONG J F, et al. Effects of intercropping on the contents and accumulation of heavy metals in maize varieties and *Pteris cretica* L.[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2012, 31(7): 1281–1288

[11] WANG K, HUANG H G, ZHU Z Q, et al. Phytoextraction of metals and rhizoremediation of PAHs in co-contaminated soil by co-planting of *Sedum alfredii* with ryegrass (*Lolium perenne*) or castor (*Ricinus communis*)[J]. International Journal of Phytoremediation, 2013, 15(3): 283–298

[12] LIU Z F, GE H G, LI C, et al. Enhanced phytoextraction of heavy metals from contaminated soil by plant co-cropping associated with PGPR[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2015, 226(3): 29

[13] 胡容平，李欣欣，林立金，等. 混种龙葵对番茄和茄子生理生化特性及镉含量的影响[J]. 中国农学通报, 2019, 35(26): 57–63

HU R P, LI X X, LIN L J, et al. Effects of intercropping with *Solanum nigrum* on physiological and biochemical characteristics and cadmium content of *Lycopersicon esculentum* and *Solanum melongena*[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2019, 35(26): 57–63

[14] NIU M F, WEI S H, BAI J Y, et al. Remediation and safe production of Cd contaminated soil via multiple cropping hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and low accumulation Chinese cabbage[J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(7): 657–661

[15] 霍文敏, 赵中秋, 王丽, 等. 不同超富集、富集植物-玉米间作模式对玉米中镉吸收、转运的影响研究[J]. 地学前缘, 2019, 26(6): 118–127
HUO W M, ZHAO Z Q, WANG L, et al. Study of the effects of intercropping different hyperaccumulator and accumulator plants on Cd uptake and transportation by maize[J]. Earth Science Frontiers, 2019, 26(6): 118–127

[16] MA J, LEI E, LEI M, et al. Remediation of arsenic contaminated soil using malposed intercropping of *Pteris vittata* L. and maize[J]. Chemosphere, 2018, 194: 737–744

[17] ZENG P, GUO Z H, XIAO X Y, et al. Phytoextraction potential of *Pteris vittata* L. co-planted with woody species for As, Cd, Pb and Zn in contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, 650: 594–603

[18] YANG J X, YANG J, HUANG J. Role of co-planting and chitosan in phytoextraction of As and heavy metals by *Pteris vittata* and castor bean — A field case[J]. Ecological Engineering, 2017, 109: 35–40

[19] 闫秀秀, 徐应明, 王林, 等. 叶用油菜和孔雀草间作对植物生长和镉累积的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(11): 5151–5159
YAN X X, XU Y M, WANG L, et al. Effects of intercropping of *Brassica chinenesis* L. and *Tagetes patula* L. on the growth and cadmium accumulation of plants[J]. Environmental Science, 2020, 41(11): 5151–5159

[20] 杨倩, 王方园, 申艳冰. 砷、汞对植物毒性影响及其迁移富集效应探讨[J]. 能源环境保护, 2020, 34(2): 87–91
YANG Q, WANG F Y, SHEN Y B. Study on the effects of arsenic and mercury on phytotoxicity and their migration and enrichment effects[J]. Energy Environmental Protection, 2020, 34(2): 87–91

[21] 张春雨, 王海娟, 王宏镔. 赤霉素介导下植物对重金属的耐性机理[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 137–144
ZHANG C Y, WANG H J, WANG H B. Mechanisms of plant tolerance to heavy metals mediated by gibberellic acid[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(2): 137–144

[22] 黄亚萍, 俎丽红, 沈广爽, 等. 铅胁迫对蜀葵重金属积累及抗氧化酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(9): 1746–1752
HUANG Y P, ZU L H, SHEN G S, et al. Effects of lead stress on accumulation ability and antioxidant enzyme activities of *Althaea rosea* Cavan[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(9): 1746–1752

[23] 王晓维, 黄国勤, 徐健程, 等. 铜胁迫和间作对玉米抗氧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10): 1890–1896
WANG X W, HUANG G Q, XU J C, et al. Effects of copper stresses and intercropping on antioxidant enzyme activities and malondialdehyde contents in maize[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2014, 33(10): 1890–1896

[24] JIANG Q Y, TAN S Y, ZHUO F, et al. Effect of *Funneliformis mosseae* on the growth, cadmium accumulation and antioxidant activities of *Solanum nigrum*[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 98: 112–120

[25] TIWARI S, SARANGI B K. Comparative analysis of antioxidant response by *Pteris vittata* and *Vetiveria zizanioides* towards arsenic stress[J]. Ecological Engineering, 2017, 100: 211–218

[26] WAN X M, LEI M, CHEN T B, et al. Intercropped *Pteris vittata* L. and *Morus alba* L. presents a safe utilization mode for arsenic-contaminated soil[J]. Science of the Total Environment, 2017, 579: 1467–1475

[27] HU R P, ZHANG Z J, LIN L J, et al. Intercropping with hyperaccumulator plants decreases the cadmium accumulation in grape seedlings[J]. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science, 2019, 69(4): 304–310

[28] 黄科文, 林立金, 石军, 等. 混种牛膝菊嫁接后代对生菜镉积累的影响[J]. 土壤, 2020, 52(1): 127–133
HUANG K W, LIN L J, SHI J, et al. Effect of intercropping with grafting off spring of *Galinsoga parviflora* on cadmium accumulation of lettuce[J]. Soils, 2020, 52(1): 127–133

[29] 秦丽, 祖艳群, 湛方栋, 等. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 471–477
QIN L, ZU Y Q, ZHAN F D, et al. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. Hill. and maize in intercropping systems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 471–477

[30] 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 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): 852–858

[31] 谭建波, 陈兴, 郭先华, 等. 续断菊与玉米间作系统不同植物部位 Cd、Pb 分配特征[J]. 生态环境学报, 2015, 24(4): 700–707
TAN J B, CHEN X, GUO X H, et al. Distribution characteristics of Pb and Cd in different parts of *Sonchus asper* and *Zea mays* in an intercropping system[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2015, 24(4): 700–707

[32] 秦丽, 何永美, 王吉秀, 等. 续断菊与玉米间作的铅累积及根系低分子量有机酸分泌特征研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 867–875
QIN L, HE Y M, WANG J X, et al. Lead accumulation and low-molecular-weight organic acids secreted by roots in *Sonchus asper* L.- *Zea mays* L. intercropping system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 867–875

[33] 王吉秀, 湛方栋, 李元, 等. 铅胁迫下小花南芥与玉米间作对根系分泌物有机酸的影响[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(3): 365–372

WANG J X, ZHAN F D, LI Y, et al. Effects of *Arabis alpina* L. var. *parviflora* Franch and *Zea mays* L. intercropping system on root-exudated organic acids under lead stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(3): 365–372

[34] JIANG C A, WU Q T, ZENG S C, et al. Dissolution of different zinc salts and Zn uptake by *Sedum alfredii* and maize in mono-and co-cropping under hydroponic culture[J]. Journal of Environmental Sciences, 2013, 25(9): 1890–1896

[35] SASAKI T, YAMAMOTO Y, EZAKI B, et al. A wheat gene encoding an aluminum-activated malate transporter[J]. The Plant Journal, 2004, 37(5): 645–653

[36] TANG Y, LIAO J C, YU X N, et al. Effects of intercropping hyperaccumulators on growth and cadmium accumulation of water spinach (*Ipomoea aquatica* Forsk)[J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 2020, 100(5): 567–575

[37] 闫仁俊, 韩磊, 赵亚萍, 等. 玉米与龙葵间作模式对植物生长及 Cd 富集特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10): 2162–2171
YAN R J, HAN L, ZHAO Y P, et al. Effects of intercropping modes of *Zea mays* L. and *Solanum nigrum* L. on plant growth and Cd enrichment characteristics[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10): 2162–2171

[38] 赵雅洁, 李周, 宋海燕, 等. 喀斯特地区土壤厚度降低和水分减少对两种草本植物混种后光合的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(7): 1475–1486
ZHAO Y J, LI Z, SONG H Y, et al. Effect of decline in soil depth and water resource on the photosynthesis of two grasses under mixed plantation in Karst regions[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(7): 1475–1486

[39] LI Y J, MA L S, WU P T, et al. Yield, yield attributes and photosynthetic physiological characteristics of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.)/maize (*Zea mays* L.) strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2020, 248: 107656

[40] SINGH S, EAPEN S, D'SOUZA S F. Cadmium accumulation and its influence on lipid peroxidation and antioxidative system in an aquatic plant, *Bacopa monnieri* L.[J]. Chemosphere, 2006, 62(2): 233–246

[41] FEIL B, MOSER S B, JAMPATONG S, et al. Mineral composition of the grains of tropical maize varieties as affected by pre-anthesis drought and rate of nitrogen fertilization[J]. Crop Science, 2005, 45(2): 516–523

[42] 夏海勇, 赵建华, 孙建好, 等. 油菜、蚕豆、鹰嘴豆和大豆对间作玉米籽粒 Fe, Mn, Cu 和 Zn 浓度及地上部累积量的影响[J]. 中国科学: 生命科学, 2013, 43(7): 557–568
XIA H Y, ZHAO J H, SUN J H, et al. Maize grain concentrations and above-ground shoot acquisition of micronutrients as affected by intercropping with turnip, faba bean, chickpea, and soybean[J]. Science China Life Sciences, 2013, 43(7): 557–568

[43] YANG J, MOSBY D E, CASTEEL S W, et al. *In vitro* lead bioaccessibility and phosphate leaching as affected by surface application of phosphoric acid in lead-contaminated soil[J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2002, 43(4): 399–405

[44] 赵宁宁, 杜芮萍, 邱丹, 等. 蜈蚣草-玉米套作模式对玉米砷胁迫的缓解效应[J]. 生态环境学报, 2019, 28(5): 1021–1028
ZHAO N N, DU R P, QIU D, et al. Alleviating effects of *Pteris vittata* L.-maize intercropping system on arsenic stress in maize[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(5): 1021–1028

[45] 王兴伟, 刘子芳, 赵兵, 等. 铅锌胁迫下混种黑麦草和三叶草对假繁缕生理生态的影响[J]. 陕西农业科学, 2017, 63(1): 30–34
WANG X W, LIU Z F, ZHAO B, et al. Effects of mixed ryegrass and clover on physiology and ecology of *Theligonum macranthum* Franch under Al and Zn stress[J]. Shaanxi Journal of Agricultural Sciences, 2017, 63(1): 30–34

[46] PEINADO-GUEVARA L I, LÓPEZ-MEYER M, LÓPEZ-VALENZUELA J A, et al. Comparative proteomic analysis of leaf tissue from tomato plants colonized with *Rhizophagus irregularis*[J]. Symbiosis, 2017, 73(2): 93–106

[47] WANG J X, LU X N, ZHANG J E, et al. Rice intercropping with alligator flag (*Thalia dealbata*): A novel model to produce safe cereal grains while remediating cadmium contaminated paddy soil[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 394: 122505

[48] 张亚丽, 沈其荣, 谢学俭, 等. 猪粪和稻草对镉污染黄泥土生物活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11): 1997–2000
ZHANG Y L, SHEN Q R, XIE X J, et al. Effect of pig manure and rice straw on biological activity of Cd-contaminated soil[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(11): 1997–2000

[49] 谭建波, 湛方栋, 刘宁宁, 等. 续断菊与蚕豆间作下土壤部分化学特征与 Cd 形态分布状况研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(1): 53–60
TAN J B, ZHAN F D, LIU N N, et al. Soil chemical properties and Cd form distribution in *Vicia faba* and *Sonchus asper* intercropping system[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(1): 53–60

[50] 季李伟, 蒲麟陇, 湛方栋, 等. 根系互作对玉米与续断菊铅镉累积的影响及其效应分析[J]. 环境科学与技术, 2017, 40(12): 6–13
JI L W, PU L L, ZHAN F D, et al. Analysis of the effect of root interaction on *Sonchus asper* L. Hill. and maize for Pb/Cd accumulation[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(12): 6–13

[51] 曹顺利, 马雪泷, 房江育. 柠檬酸和草酸对茶园土壤铅生物有效形态的影响[J]. 黄山学院学报, 2013, 15(5): 54–58
CAO S L, MA X L, FANG J Y. The effect of citric acid and oxalic acid on bioavailability of lead in soils of tea garden[J]. Journal of Huangshan University, 2013, 15(5): 54–58

[52] WANG X L, FENG Y J, YU L L, et al. Sugarcane/soybean intercropping with reduced nitrogen input improves crop productivity and reduces carbon footprint in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 719: 137517

[53] ZHANG X Y, WU K X, FULLEN M A, et al. Synergistic effects of vegetation layers of maize and potato intercropping

on soil erosion on sloping land in Yunnan Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(2): 423–434

[54] LI L, LI S M, SUN J H, et al. Diversity enhances agricultural productivity via rhizosphere phosphorus facilitation on phosphorus-deficient soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2007, 104(27): 11192–11196

[55] KUTMAN U B, YILDIZ B, CAKMAK I. Effect of nitrogen on uptake, remobilization and partitioning of zinc and iron throughout the development of durum wheat[J]. Plant and Soil, 2011, 342(1/2): 149–164

[56] 张向前, 黄国勤, 卞新民, 等. 间作对玉米品质、产量及土壤微生物数量和酶活性的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(22): 7082–7090
ZHANG X Q, HUANG G Q, BIAN X M, et al. Effects of intercropping on quality and yield of maize grain, microorganism quantity, and enzyme activities in soils[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(22): 7082–7090

[57] CHEN B, MA X X, LIU G Q, et al. An endophytic bacterium *Acinetobacter calcoaceticus* Sasm3-enhanced phytoremediation of nitrate-cadmium compound polluted soil by intercropping *Sedum alfredii* with oilseed rape[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(22): 17625–17635

[58] 沙银花, 胡南, 陈思羽, 等. 雀稗-博落回间作强化修复铀污染土壤的研究[J]. 南华大学学报: 自然科学版, 2019, 33(2): 22–26
SHA Y H, HU N, CHEN S Y, et al. Enhanced phytoremediation of uranium contaminated soils with *Paspalum scrobiculatum-Macleaya cordata* intercrop[J]. Journal of University of South China: Science and Technology, 2019, 33(2): 22–26

[59] FAHAD S, HUSSAIN S, MATLOOB A, et al. Phytohormones and plant responses to salinity stress: A review[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 75(2): 391–404