河南农业科学，2018，47(4) :1-7

Journal of Henan Agricultural Sciences

向日葵对重金属胁迫的防御机制及其  
土壤修复效率提高途径

杨翠凤，滕 峥，李荣峰，曾小飚，贾桂康

( 百色学院 农业与食品工程学院，广西 百色 533000 )

摘要: 土壤重金属污染具有隐蔽、高残留、治理难度大等特点，易通过食物链在生物体内累积，对人 体健康造成威胁。向日葵( Helianthus annuus L． ) 是经济价值很高的油料作物，对重金属有 较强的 耐受性和富集能力，利用向日葵来开展重金属污染土壤的治理具有广阔的应用价值和潜力。综述 了重金属在向日葵体内的迁移规律和富集特征，从激活抗氧化系统、络合重金属离子等方面阐述了 向日葵对重金属胁迫的解毒( 防御) 机制，从农艺措施、螯合剂诱导修复、微生物联合修复等方面阐 述了提高向日葵修复重金属污染土壤效率的途径，并对今后研究重点进行了展望。

关键词: 向日葵; 重金属污染土壤; 植物修复

中图分类号: S565． 5 文献标志码: A 文章编号: 1004 － 3268( 2018) 04 － 0001 －07

Defense Mechanism of Sunflower against Heavy Metal Stress and

Ways to Improve Its Soil Remediation Efficiency

YANG Cuifeng, TENG Zheng, LI Rongfeng, ZENG Xiaobiao, JIA Guikang

( Agricultural and Food Engineering College，Baise College，Baise 533000 ，China)

Abstract: Heavy metal contaminated soil is difficult to remedy because of its concealment, high residue, heavy metal is easy to accumulate in organisms through the food chain, posing a threat to human health． Sunflower ( H． annuus) is an oil crop with high economic value, has high tolerance to heavy metals and strong enrichment capacity for heavy metals． This paper reviewed the accumulation and distribution characteristics of heavy metals in sunflower, the detoxification mechanism from the aspect of activating antioxidant systems, complexing heavy metal ions, ways of improving soil remediation efficiency from the aspect of agronomic practices, chelator-induced healing, microbial remediation, finally discussed the future study．

Key words: Sunflower; Heavy metals contaminated soil; Phytoremediation

收稿日期:2017 －10 －21

基金项目：国家自然科学基金项目(31660171)；广西高校中青年教师基础能力提升项目(2017KY0715)；广西高等学校优势特 色专业群建设项目［桂教高教( 2015) 41］

作者简介:杨翠凤(1988 -),女，壮族，广西桂林人，讲师，博士，主要从事环境生态修复研究。E-mail： 1678383409@ qq. com

土壤遭受重金属污染后,大量重金属会累积在 植物组织器官中,不仅影响植株生长发育,而且会通 过食物链进入动物和人类体内,引发病变甚至危及 生命。向日葵 ( Helianth us annuus L．) 作为抗旱、耐 瘠、耐盐碱、适应性强且经济价值很高的油料作物, 已被证实对重金属有较强的耐受性和富集能力,能 有效去除土壤中的重金属［1］。与蓖麻、玉米、紫花 苜蓿及芥菜相比,向日葵对重金属 Cd、Pb 具有更强 的富集能力和耐受性［2-3］。王永芬等［4］研究表明,

土壤Cu2+浓度较高时，向日葵地上部积累Cu较多， 当 Cu2 + 浓度达 200 mg /kg ,叶片中 Cu 含量超过根 部(叶根比1． 27) 。另有研究证明,在污水灌溉区, 向日葵对 Zn、Cu、Cd 的最大富集量分别达97．27、 22.84、0. 54 mg/kg5 *。* Arash 等16 研究表明，经向 日葵幼苗过滤后,污染水体中的Zn2 +、Cu2+、Pb2 +浓 度均在 FAO 和 EPA 规定的农田灌溉水质标准的安 全范围内,充分证实了运用向日葵作为重金属污染 过滤清除系统的有效性。 马灏［7］研究表明,向日葵 易于将根部 Cd 和 Zn 向地上部转移，与蓖麻相比， 向日葵能更高效地去除土壤中的Cd和Zn,并在收 获植株做能源时产生更高的热值。由此可见，利用 向日葵开展重金属污染土壤的治理具有潜在的开发 和应用价值,可带来一定的社会、生态和经济效益。 综述了重金属在向日葵体内的迁移规律和富集特 征,阐述了向日葵对重金属胁迫的解毒（防御）机制 及提高向日葵修复重金属污染土壤效率的途径,并 从不同的角度对今后研究重点进行了展望,以期为 利用向日葵修复重金属污染土壤提供实践参考 依据。

1. 重金属在向日葵体内的迁移规律和 富集特征

研究表明,同一种植物类型生长在不同污染类 型或污染程度的土壤中,会表现出不同的重金属迁 移特性和富集能力［8-9］,同一植株不同组织器官对 重金属的积累量也存在较大差异［10］。郭平等［11］研 究向日葵幼苗吸收富集Pb、Cu的能力时发现,Cu由 根向茎叶运输能力大于Pb。肖璇血研究显示，向 日葵各器官（根、茎、叶、种子）对Pb的积累呈现先 升后降的趋势，且随着Pb2+浓度的增加，向日葵对 Pb的迁移总量先增大后减小,迁移系数也呈现出先 增大后减小的趋势，但均在1以下。 马灏［7］研究向 日葵修复Cd和Zn污染土壤的结果表明，向日葵每 个生长时期的地上部分重金属富集量均显著高于根 部，说明向日葵易于将根部Cd和Zn向地上部迁 移，具有一定的植物修复潜力。 而随着土壤污染的 加重，向日葵根、茎、叶、籽实中相应的Cd和Zn富 集量呈先增加后降低趋势，表明当土壤重金属离子 浓度过高时，会抑制向日葵吸收重金属的能力，且俄 罗斯向日葵修复Cd和Zn污染土壤的潜力和效益 较普通向日葵更高。Lee等阴研究表明，Cd在向日 葵各组织器官的累积量表现为籽实 > 茎 > 叶 > 花> 根,Pb表现为茎 > 根 > 叶 > 花 > 籽实。

植株体内重金属富集量易受品种类别、土壤污 染特点、植株生长特性等因素影响，因而存在差异。 因此，在实际应用向日葵进行植物修复时，需综合考 虑土壤受污染程度、品种类型、植株生物量等多方面 因素，有效选取能最大限度发挥效应的优势品种 （ 系） 和相应的修复方法。 Nasser 等［13］研究表明，向 日葵修复Cd、Pb污染土壤安全经济有效，并建议修 复Cd污染土壤时采取植物固定法，修复Pb污染土 壤时采用植物提取法。

1. 向日葵对重金属胁迫的防御机制

2． 1 激活抗氧化系统

重金属胁迫下，向日葵自身通过启动多种防御 系统来降低重金属对细胞的伤害，其中，激活抗氧化 系统，清除自由基，保护细胞免受氧化胁迫的毒害是 其主要解毒机制之一。 研究表明，重金属胁迫下向 日葵植株体内的抗坏血酸还原酶（AR）、脱氢抗坏 血酸还原酶（DHAR）、抗坏血酸过氧化物酶（APX）、 谷胱甘肽还原酶（GR）、谷胱甘肽转移酶（GSTs）活 性以及过氧化氢（ H2O2） 、过氧化脂质的浓度会显著 提高珀6。此外，王明金等C7研究表明，在Pb浓度 为0 ~ 10「4 mol/L时，随着Pb浓度的增加，向日葵 不同部位的愈创木酚过氧化物酶（GPX）活性不断 增强，从而促使体内活性氧自由基平衡。 Marisamy 等［18 研究表明，向日葵可以通过提高花青素含量以 及抗氧化物酶活性来抵御金属钡（Ba）的毒害。郭 艳丽等11研究表明，随着Cd2+浓度增加，向日葵幼 苗游离脯氨酸和丙二醛（MDA）含量增加，而可溶性 蛋白含量和过氧化物酶（POD）活性呈先上升后下 降的趋势。吕潇閃研究发现,Pb胁迫下，向日葵幼 苗超氧化物歧化酶（SOD）、POD和过氧化氢酶 （CAT）活性均呈先上升后下降趋势，而MDA含量 则表现出先下降后上升态势，通过双向电泳技术检 测到向日葵应对重金属胁迫产生反应机制的重要蛋 白质，如叶绿体蛋白、感应蛋白等。

向日葵品种、不同组织器官以及重金属类型、 浓度和胁迫时间会使向日葵抗氧化系统的应激效 应产生一定差异。 Doncheva 等［21 研究表明，在 0.1 mmol/L Pb胁迫下，向日葵叶片抗氧化活性、清 除自由基活性和总黄酮含量与对照（未施用Pb胁 迫处理）相比显著增加，但各参试品种之间存在差 异。 Groppa 等［22 、殷恒霞等［23 、 马克思［24 研究证 实了向日葵幼苗POD、脯氨酸、MDA和谷胱甘肽 （GSH）含量随着重金属离子（Cd2+、Zn2+、Cu2+）浓 度的增加而上升，而SOD和CAT活性表现为先增 加后降低的趋势；Cd、Zn胁迫对脯氨酸含量变化的 影响大于Cu胁迫，而Cu胁迫对GSH含量变化的影 响大于Cd、Zn胁迫。另有研究表明，与相同浓度的 Co、Cr和Pb胁迫引起的效应相比,0.25 mmol/L Cd 引起的抗氧化胁迫应激反应最大，使得向日葵体内 硫代巴比妥酸活性物质浓度增加、抗氧化酶（ SOD 和 APX） 活性降低［25 。

2． 2 络合重金属离子

通过植物螯合肽、有机酸、氨基酸和金属硫蛋白 等对重金属离子进行络合，降低自由离子的活度系 数，是向日葵降低重金属毒性的另一个重要机 制阴o Krystofova等切研究表明，向日葵根和叶中 的植物螯合肽和GSH含量随着Pb2+胁迫时间的延 长而上升。Cd胁迫降低了向日葵种子中的总脂质 和中性脂质含量，而极性脂质（磷脂和糖脂） 含量则 随着Cd浓度的增加而增加阴*。*另有研究显示，高 浓度Cd和Cu胁迫下，向日葵中的脯氨酸和腐胺含 量增加［22 。 Cd 胁迫下，向日葵根际土壤中低分子 有机酸（ 戊二酸、 乙醇酸、 乳酸、 乙酸、 苹果酸、 琥珀 酸） 含量增加［29-30 。 随着金属离子浓度（ Al3+、 Cd2+、Zn2 + ）的增加，向日葵根系和地上部分分泌的 苹果酸和柠檬酸含量呈上升趋势［31 。 Niu 等［32 认 为，重金属的存在刺激了向日葵对有机酸的分泌，而 正是这些有机酸的分泌改变了根际环境的pH值， 并在氧化还原电位方面发挥重要作用，增加了植株 对重金属的生物利用率。

2． 3 其他防御机制 向日葵还可激发其他抗性机制如通过在组织和 细胞水平对有毒离子进行区隔化作用，或通过细胞 壁吸附、沉积作用，或通过细胞膜选择吸收、外排作 用，限制重金属离子进入细胞，降低重金属离子对正 常生理代谢活动的影响33。研究表明，Cd主要积 累在植株根系和老叶中，在顶端组织积累较少［33 。 随着Cd2 +浓度的增加，根和茎吸收Cd的增加量高 于叶片閃*。*在花芽阶段，向日葵将Cd、Cu和Zn主 要富集在根系和老叶组织中，成熟期累积的重金属 将被重新迁移到不同组织中［33 。 此外，在花芽期之 前的生长阶段，重金属在向日葵体内的迁移系数高 于后期生长阶段［35 。 向日葵在生长过程中通过转 移不同组织器官来富集重金属，生长前期主要将重 金属积累在根系部分，在随后的生长阶段逐渐将体 内的重金属迁移至地上部分［33，35 ，推测这可能是向 日葵用来增强对重金属耐受性的一种防御策略。

1. 提高向日葵对重金属污染土壤修复 效率的途径

3． 1 农艺措施

不同品种（系） 向日葵对同一重金属抗性表现 有所不同，同一品种（系） 对不同重金属抗性表现也 有所不同，因此，选择高抗品种（ 系） 是提高向日葵 对重金属污染土壤修复效率的途径之一［36-37 。 Zou 等［37 研究发现，向 日 葵品种 RH118 表现出比 No. 665和QFS14更耐Cd。Atta等38研究表明，向 日葵 品 种 Hysun - 33 对 Cr 的 累 积 量 高 于 SF - 5009。 马灏［7 研究表明，俄罗斯向日葵比普通向日葵 修复Cd和Zn污染土壤的潜力和效益更高。另有研 究指出，对比其他重金属（Cu、Al、Cr、Mo、Se），向日葵 修复Cd、Ni、Pb和Zn污染土壤的效率更高39。

外源水杨酸（SA）可以促进向日葵生长，提高植 株生物量，增加光合色素、可溶性糖、可溶性蛋白和 饱和脂肪酸含量，减轻重金属引起的毒害作用［40 。 Hao等附研究表明，外施SA虽促进了向日葵生长， 提高植株生物量，但对 Cd 和 Zn 的累积量与对照 （不施用SA处理）相比差异不显著。外施醋酸和苹 果酸时，根系 Cd 含量增加，地上部分对 Cd 的累积 量反而减少［42 。 这些结果需在今后的试验中进一 步证实。

合理运用耕作制度也可以提高向日葵对重金属 污染土壤的修复效率。 杨洋等［43 在重金属（ Cu、 Zn、Pb、Cd、As、Hg） 复合污染的矿区废弃农田中研 究油菜—玉米和油菜—向日葵2种轮作种植模式对 土壤重金属污染的修复潜力，结果表明，2 种轮作种 植模式都可以对土壤中的重金属进行有效的提取， 其中油菜—向日葵的种植模式优于油菜—玉米的种 植模式，重金属 Cu、 Pb、 Cd、 As 含量较高，分别为 2 408>2 027、658.5、250 g/（hm2 • a）*。*

3． 2 螯合剂诱导修复

研究表明，鳌合剂能有效提高向日葵根、茎、叶 中重金属含量，而籽实的增加量远没有其他部位明 显叫。作为光合作用的原料‘CO?浓度升高一定程 度上可以增强向日葵的抗性，当CO2与鳌合剂联合 施用时，鳌合剂可能是影响土壤pH值变化的主要 因子阴。研究表明‘CO?不仅促进了向日葵的生长 和发育，而且有利于Cu由根向茎叶的运输，显著增加 对Cu的积累阴。EDTA + Pb处理增加了向日葵生 物量、光合色素产物和抗氧化物酶活性，显著提高了 向日葵对重金属Pb的吸收效率9,6 ；当EDTA浓度 为5 mmol/kg时,Pb的积累总量可达到1 601憾/株12。 同样，施加EDTA可以强化向日葵对重金属Cr的吸 收，但加重了 Cr对向日葵的毒害，抑制了向日葵对 矿质元素（N、K、P、Na）的吸收，减少了根系和地上 部分的生物量47。Eissa等阴研究结果类似，施加 EDTA增强了向日葵对3种重金属（Cd、Pb、Ni）的吸 收。 EDTA 属于非生物降解的螯合剂，易引起土壤 二次污染，因而开发利用生物降解螯合剂［如乙二 胺二琥拍酸（EDDS）、谷氨酸N, N -二乙酸 （ GLDA） 显得尤为重要［49-50 。

3． 3 微生物联合修复

微生物作为土壤中活跃的生物因子，与植物、土 壤构成一个“土壤－植物 －微生物”微生态圈，可协 助植物抵御重金属胁迫，促进重金属在植物中的吸 收和转运。 研究发现，施用菌肥能有效促进向日葵 对Pb的吸收，降低土壤Pb含量61。接种植物促生 细菌( PGPR) 金黄杆菌( Chrysiobacterium humi ) 显 著 提高向日葵富集Cd和Zn的能力，分别提高了 67% 和64%珂。接种As抗性兼具促生长特性菌株Al- caligenes sp. DhalL 可有效活化重金属 As 并促进向 日葵对As的吸收同。接种Cr抗性细菌SS6提高 了向日葵地上部分以及根系干质量，使得Cr累积量 增加了107% ~171%[54 。 混合菌接种比单菌接种 效果好，接种沙福芽孢杆菌( Bacillus safensis) + 玫瑰 考克氏菌( Kocuria rosea) 后向日葵根系和地上部分 Cd累积量分别提升了 30%和25% 55。接种微球 菌( Micrococcus sp. ) + 克雷白氏杆菌( Klebsiella sp. ) 显著增加了向日葵植株吲哚乙酸(IAA)含量和根 长，提高了根和叶对Cd的富集，而且促进了根系的 Cd 向地上部分迁移[56 。

接种丛枝菌根真菌(AMF)可以显著提高向日 葵对重金属的耐受性和累积量。De Andrade等57、 Zadeh 等58研究表明，在Cd污染土壤中，接种AMF 后增加了向日葵叶面积、植株生物量以及对矿质元 素的吸收，同时提高了根和叶对Cd的吸收。Ker 等59研究显示，在Ni胁迫下，接种AMF不仅促进 了向日葵植株生长、对矿质元素和Ni的吸收，还提 高了谷氨酰胺合成酶活性。 Davies 等[60 研究表明， 接种AMF提高了向日葵叶片的气孔导度和光合速 率以及对Cr的吸收。此外，接种AMF在促进向日 葵生长的同时也能提高对Pb、Zn的富集651初。但 另有研究表明，不同AMF的作用方式和迁移金属能 力存在差异，如根内球囊霉菌(*Rhizophagus irregu- laris)*强化了 Cd向向日葵地上部分迁移，而摩西管 柄囊霉菌( *Funneliformis mosseae*) 将 Cd 固定在向日 葵根际663 。

3． 4 其他途径

生物炭可以改善土壤肥力，减轻重金属对植物 造成的毒害盼扇。生物炭降低了土壤中金属Cu的 迁移率，促进了向日葵的生长，增强了向日葵的耐受 性667 。 但目前关于向日葵配合施用生物炭开展重 金属污染土壤修复的研究报道还比较缺乏。

外施赤霉素和IAA促进向日葵生长的同时加 强了对Cr、Zn的吸收關,结合施用IAA和EDDS比 单施EDDS更能促进向日葵对Zn的吸收61。

1. 存在问题与展望

受重金属污染的土壤结构特征往往较为复杂， 土壤水分缺乏，营养物质不足，土壤质量较差。 目 前，关于向日葵富集重金属的研究大多集中在水培、 砂培等模拟试验条件下，与实际土壤条件有一定差 距。 今后的研究工作应在以下方面进一步加强: (1)农艺措施如间套种、生物炭、植物激素、土壤螯 合剂等相互配合使用提高向日葵修复效率；(2)挖 掘向日葵或者微生物基因组中与重金属耐性相关的 基因，通过基因工程技术改良植物或与植物互作的 细菌，提高植物修复效率；(3)向日葵修复重金属污 染土壤的机理，包括根际环境如何改变重金属有效 态，植物－微生物 －土壤之间互作的微生态关系，地 上部分和根系如何转运和迁移重金属等；(4)向日 葵收获后的处理和资源化利用技术。

参考文献:

1. Al-Dhaibani A N ，El-Nakhlawy F S，Alsolaimani S G ，*et al．* Phytoremediation of cadmium contaminated soil by sunflower6J . Australian Journal of Basic ＆ Applied Sci- ences，2013，7( 7) : 888-894.
2. 王燕燕，徐镜波，盛连喜. 不同作物种苗对水中重金属 镉去除的比较研究J1 .环境科学，2007,28 (5): 987-992.
3. 牛之欣，孙丽娜，孙铁珩. 水培条件下四种植物对 Cd、

Pb富集特征J .生态学杂志,010,9(2) :261-268.

1. 王永芬，席磊. 向日葵对土壤中铜的积累作用研究 6J .中国生态农业学报，2006，14(4):131-133.
2. Ghorveh A I ， Solhi M ， Mohammadi H G ， *et al．* Investiga­tion the concentration of heavy metals in the sediment of Zayandehrood river bed 6J . International Journal of Ad­vanced Biological and Biomedical Research， 2015 ， 3 ( 1 ) : 75-81.
3. Arash Z， Abdolmajid L A， Hassanoghli A. Phytorem edi- ation treatment of water contaminated with zinc ， copper and lead 6C . Beijing: International Commission on Irri­gation and Drainage， 2005 : 142-144.
4. 马灏. 蓖麻、向日葵对 Cd 和 Zn 污染场地的原位修复 试验研究D1 .上海：上海大学,015.
5. Rizwan M， Ali S， Rizvi H， *et al．* Phytomanagement of heavy metals in contaminated soils using sunflower6J . Crirical Reviews in Environmental Science and Technology， 2016， 46 ( 18) : 1498-1528.
6. 王帅，吕金印，李鹰翔，等. 几种油料作物对铬、铅的耐 受性与积累研究J].农业环境科学学报，2012,31 (7):1310-1316.

610 Lee K K ， Cho H S ， Moon Y C， *et al．* Cadmium and lead

11

12

13

14

15

16

17

18

19

20

21

22

uptake capacity of energy crops and distribution of met­als within the plant structures[J . KSCE Journal of Civil Engineering，2013， 17( 1):44-50.

郭平，刘畅，张海博，等.向日葵幼苗对Pb、Cu富集能 力与耐受性研究J .水土保持学报,007,1 (6): 92-95，113.

肖璇.油菜和向日葵修复Pb污染土壤的研究D .杨 凌:西北农林科技大学， 2009.

Nasser S， Soad E， Fatma E S. Phytoremediation of lead and cadmium contaminated soils using sunflower plant [J . Journal of Stress Physiology ＆ Biochemistry， 2014， 10(1):122-134.

Gallego S M, Benavides M P, Tomaro M L. Effect of heavy metal ion excess on sunflower leaves: Evidence for involvement of oxidative stress[J . Plant Science， 1996， 121(2):151-159.

Gallego S M， Benavides M P， Tomaro M L. Effect of cad­mium ions on antioxidant defense system in sunflower cotyledons[J . Biologia Plantarum， 1 999 ， 42(1) : 49-55.

Nehnevajova E， Lyubenova L， Herzig R， et al． Metal accumulation and response of antioxidant enzymes in seedlings and adult sunflower mutants with improved metal removal traits on a metal-contaminated soil[J . Environmental ＆ Experimental Botany， 2012， 76 ( 71 ) : 39-48.

王明金，刘红琴，可聃，等.不同浓度Pb对向日葵幼 苗生长及抗氧化系统的影响J .中国环境管理丛 书，2007(2) : 30-32.

Marisamy K， Duraipandian M， Sevugaperumal R， et al． Barium toxicity induced changes on growth， photosynthetic， biochemical and antioxidative enzymes level in helian- thus annuus ( L. ) [J . International Journal of Recent Scientific Research， 2016，7 (3) :9781-9787. 郭艳丽，台培东，韩艳萍，等.镉胁迫对向日葵幼苗生 长和生理特性的影响J .环境工程学报，2009,3 (12) :2291-2296.

吕潇. 铅胁迫下向日葵幼苗生理及蛋白质组学的研 究D .天津：天津农学院,016.

Doncheva S， Moustakas M， Ananieva K， et al． Plant response to lead in the presence or absence EDTA in two sunflower genotypes[J . Environmental Science ＆ Pollu­tion Research International， 2013， 20(2) : 823-833. Groppa M D， Zawoznik M S， Tomaro M L， et al． Inhibition of root growth and polyamine metabolism in sunflower ( Helianthus annuus) seedlings under cadmium and cop­per stress[J . Biological Trace Element Research， 2008， 126(1/2/3):246-256.

23 殷恒霞，李霞，米琴，等.镉、锌、铜胁迫对向日葵早期

幼苗生长的影响J].植物遗传资源学报,009,0 (2) :290-294， 299.

24]马克思.Zn2+胁迫对向日葵种子萌发和幼苗生长的 影响D].兰州：兰州交通大学,014.

1. Gopal R， Khurana N. Effect of heavy metal pollutants on sunflower[J . African Journal of Plant Science， 2011 ， 5: 531-536.
2. Gallego S M， Kogan M J， Azpilicueta C E， et al． Glutathi- one-mediated antioxidative mechanisms in sunflower ( Helianthus Annuus L. ) cells in response to cadmium stress[J . Plant Growth Regulation， 2005， 46 ( 3 ) : 267-276.
3. Krystofova O， Shestivska V， Galiova M， et al． Sunflower plants as bioindicators of environmental pollution with lead 5) ions[J . Sensors ( Basel， Switzerland) ， 2009， 9(7) : 5040-5058.
4. Aggarwal M， Luthra Y P， Arora S K. The effect of Cd2 + on lipid components of sunflower ( Helianthus annuus L. ) seeds[J . Plant Foods for Human Nutrition， 1995， 47 (2):149-155.
5. Chiang P N， Wang M K， Chiu C Y， et al． Effects of cad­mium amendments on low-molecular-weight organic acid exudates in rhizosphere soils of tobacco and sunflower [J . Environmental Toxicology，2006，21 (5) : 479-488.
6. Niu Z， Li X， Sun L， et al． Dynamics of three organic acids ( malic， acetic and succinic acid ) in sunflower exposed to cadmium and lead[J . International Journal of Phytoremediation，2013， 15 (7) : 690-702.
7. Saber N E， Abdel-Moneim A M， Barakat S Y. Role of or­ganic acids in sunflower tolerance to heavy metals[J . Biologia Plantarum， 1 999 ， 42 ( 1 ) : 65-73.
8. Niu Z X， Li X D， Sun L N， et al． Changes of three organic acids in the process of Cd and Pb phytoextraction by Helianthus annuus L. [J . Plant Soil ＆ Environment， 2012，58(11):487-494.
9. Maria S D， Rivelli A R. Trace element accumulation and distribution in sunflower plants at the stages of flower bud and maturity [J . Italian Journal of Agronomy， 2013，8(1):65-72.
10. Junior CAL, Mazzafera P, Arruda M A Z. A comparative ionomic approach focusing on cadmium effects in sun­flowers ( Helianthus annuus L. ) [J . Environmental ＆Experimental Botany， 2014， 107( 107) : 180-186.

De Maria S， Puschenreiter M ， Rivelli A R. Cadmium accumulation and physiological response of sunflower plants to Cd during the vegetative growing cycle6J . Plant Soil ＆ Environment， 2013， 59( 6) :254-261.

Doncheva S ， Moustakas M ， Ananieva K， *et al．* Plant response to lead in the presence or absence EDTA in two sunflower genotypes ( cultivated *H． annuus* cv. 1114 and interspecific line H. *annuus* X H. *argophyllus)* J . Envi­ronmental Science and Pollution Research， 2013 ， 20 (2):823-833.

Zou J， Xu P， Lu X， *et al.* Accumulation of cadmium in three sunflower ( *Helianthus annuus* L. ) cultivars6J . Pakistan Journal of Botany， 2008， 40( 2) :759-765.

Atta M I， Bokhari Z， Malik S A， *et al.* Assessing some emerging effects of hexavalent chromium on leaf physio­logical performance in sunflower( *Helianthus annuus* L. ) 6J . International Journal of Scientific ＆ Engineering Research，2013，4(8):945-949.

Shaheen S M， Rinklebe J. Phytoextraction of potentially toxic elements by Indian mustard， rapeseed， and sunflow­er from a contaminated riparian soil6J . Environmental Geochemistry and Health， 2015，37( 6) :953-967.

El-Tayeb M A， El-Enany A E， Ahmed N L. Salicylic acid-induced adaptive response to copper stress in sun­flower ( *Helianthus annuus* L. ) 6J . Plant Growth Regu- lation，2006，50( 2) :191-199.

Hao X Z， Zhou D M， Li D D， *et al.* Growth， cadmium and zinc accumulation of ornamental sunflower ( *Helianthus annuus* L. ) in contaminated soil with different amend- ments6J . Pedosphere， 2012， 22( 5) :631-639.

Hawrylak-Nowak B， Dresler S， Matraszek R. Exogenous malic and acetic acids reduce cadmium phytotoxicity and enhance cadmium accumulation in roots of sunflower plants6J . Plant Physiology ＆ Biochemistry， 2015， 94 ( 21 ) :225-234.

杨洋，陈志鹏，黎红亮，等. 两种农业种植模式对重金 属土壤的修复潜力J].生态学报，2016, 36 (3): 688-695.

张守文.重金属Cd污染土壤的植物修复研究D].杨 凌:西北农林科技大学，2009.

武慧斌，于志红，周莉，等. 二氧化碳联合螯合剂强化 向日葵修复铜污染土壤研究J].植物营养与肥料学 报，2014，20(6):1525-1533.

Seth C S， Misra V， Singh R R， *et al.* EDTA-enhanced lead phytoremediation in sunflower ( *Helianthus annuus* L. ) hydroponic culture6J . Plant and Soil， 2011 ， 347 (1/2):231-242.

1. Aslam U， Ahmad I， Hussain M， *et al.* Effect of heavy metal pollution on mineral absorption in sunflower ( *Heli- anthus annuus* L. ) hybrids6J . Acta Physiologiae Plan- tarum，2014，36(1):101-108.
2. Eissa M A， Ghoneim M F， El-Gharably G A， *et al.* Phyto­extraction of nickel， lead and cadmium from metal con­taminated soils using different field crops and EDTA 6J . World Applied Sciences Journal， 2014， 32 ( 6 ) : 1045-1052.
3. Lo I M， Tsang D C， Yip T C， *et al.* Influence of injection conditions on EDDS-flushing of metal-contaminated soil 6J . Journal of Hazardous Materials， 2011 ， 192 ( 2 ) : 667-675.
4. Tsang D C， Hartley N R. Metal distribution and spectro­scopic analysis after soil washing with chelating agents and humic substances6J . Environmental Science and Pollution Research， 2014， 21( 5) :3987-3995.
5. 杨继飞，郭卓杰，李涛，等. 不同肥料不同作物对铅污 染土壤修复及酶活性的影响J].山西农业科学， 2013，41(12):1347-1349，1375.
6. Marques A P， Moreira H， Franco A R， *et al.* Inoculating *helianthus annuus*( sunflower) grown in zinc and cadmium contaminated soils with plant growth promoting bacteria— Effects on phytoremediation strategies 6J . Chemo- sphere，2013，92(1):74-83.
7. Cavalca L， Corsini A， Bachate S P， *et al.* Rhizosphere colonization and arsenic translocation in sunflower ( *Heli- anthus*， *annuus* L. ) by arsenate reducing *Alcaligenes sp. strain* Dhal-L6J . World Journal of Microbiology ＆ Bio- technology，2013，29(10):1931-1940.
8. Bahadur A， Afzal A， Ahmad R， *et al.* Influence of metal­resistant rhizobacteria on the growth of *Helianthus ann- uus* L. in Cr( VI) -contaminated soil6J . Water Air ＆ Soil Pollution，2016，227( 12) :467.
9. Mohammadzadeh A， Tavakoli M， Motesharezadeh B， *et al.* Effects of plant growth-promoting bacteria on phytore­mediation of cadmium contaminated soil by sunflower 6J . Archives of Agronomy and Soil Science， 2017， 63 (6):807-816.

6

35

36

37

38

39

40

41

42

43

44

45

46

1. Prapagdee B， Chanprasert M， Mongkolsuk S. Bioaugmen­tation with cadmium-resistant plant growth-promoting rhizobacteria to assist cadmium phytoextraction by *Heli-*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | anthus annuus [J . Chemosphere， 2013 ， 92 ( 6 ) : 659-666. | plants grown on cadmium contaminated soil[J . New Bi- otechnology，2013， 30(6) : 780-787. | |
| 57 | De Andrade S A, Da Silveira A P, Jorge R A, et *al* Cad- | [64 | Ahmad M， Sang S L， Lee S E， et al． Biochar-induced |
|  | mium accumulation in sunflower plants influenced by ar- |  | changes in soil properties affected immobilization / mobi- |
|  | buscular mycorrhiza[J . International Journal of Phy- |  | lization of metals / metalloids in contaminated soils[J . |
|  | toremediation， 2008 ， 10( 1 ) : 1 -13 . |  | Journal of Soils ＆ Sediments， 2017， 17 (3) : 717-730. |
| 58 | Zadeh B M， Savaghebi-Firozabadi G R， Alikhani H A， et al． | [65 | Rajapaksha A U， Chen S S， Tsang D C W， et al． Engi- |
|  | Effect of sunflower and amaranthus culture and application |  | neered / designer biochar for contaminant removal / immo- |
|  | of inoculants on phytoremediation of the soils contaminated |  | bilization from soil and water: Potential and implication |
|  | with cadmium[J . American-Eurasian Journal of Agricul- |  | of biochar modification[J . Chemosphere， 2016， 148: |
|  | tural ＆ Environmental Sciences，2008，4 (1) :93-103. |  | 276-291. |
| 59 | Ker K， Charest C. Nickel remediation by AM-colonized | [66 | Rizwan M， Ali S， Qayyum M F， et al． Mechanisms of bio- |
|  | sunflower[J . Mycorrhiza， 2010， 20(6) : 399-406. |  | char-mediated alleviation of toxicity of trace elements in |
| 60 | Davies F T， Puryear J D， Newton R J， et al． Mycorrhizal |  | plants: A critical review[J . Environmental Science and |
|  | fungi increase chromium uptake by sunflower plants: In- |  | Pollution Research，2016，23(3) : 2230-2248. |
|  | fluence on tissue mineral concentration， growth， and gas | [67 | Jones S， Bardos R P， Kidd P S， et al． Biochar and com- |
|  | exchange[J .Journal of Plant Nutrition，2002，25(11): |  | post amendments enhance copper immobilisation and |
|  | 2389-2407. |  | support plant growth in contaminated soils[J . Journal of |
| 61 | Awotoye O O， Adewole M B， Salami A O， et al． Arbuscu- |  | Environmental Management， 2016， 171 : 101 -112. |
|  | lar mycorrhiza contribution to the growth performance | [68 | Saleem M， Asghar H N， Khan M Y， et al． Gibberellic |
|  | and heavy metal uptake of Helianthus annuus LINN in |  | acid in combination with pressmud enhances the growth |
|  | pot culture[J . African Journal of Environmental Science |  | of sunflower and stabilizes chromium ( M) -contaminated |
|  | ＆ Technology， 2009， 3 (6) : 157-163. |  | soil[J . Environmental Science and Pollution Research， |
| 62 | Arias M S B， Cabriales J J， Alarcn N A， et al． Enhanced |  | 2015，22(14):10610-10617. |
|  | Pb absorption by Hordeum vulgare L. and Helianthus an- | [69 | Fossler E， Evangelou M W， Robinson B H， et al． Effects |
|  | nuus L. plants inoculated with an arbuscular mycorrhizal |  | of indole-3-acetic acid ( IAA) on sunflower growth and |
|  | fungi consortium[J . International Journal of Phytoreme- |  | heavy metal uptake in combination with ethylene diamine |
|  | diation， 2015， 17 (5) :405-413. |  | disuccinic acid ( EDDS) [J . Chemosphere， 2010， 80 |
| 63 | Hassan S E， Hijri M， St-Arnaud M. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on trace metal uptake by sunflower |  | (8):901-907. |