

刘 翠,牟凤利,王吉秀,等. 低分子量有机酸对植物吸收和累积重金属的影响综述[J]. 江苏农业科学,2021,49(8):38-43.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.08.006

# 低分子量有机酸对植物吸收和累积重金属的影响综述

刘 翠,牟凤利,王吉秀,祖艳群

(云南农业大学资源与环境学院,云南昆明 650201)

**摘要:**目前,我国农田土壤重金属污染已影响到植物生长发育,带来的粮食安全问题威胁到人类的健康。有机酸对植物吸收和累积重金属的影响因素包括有机酸的种类、浓度、土壤 pH 值、微生物群落结构和土壤酶活性等,有机酸能够通过改变土壤重金属形态、与重金属形成配位体等方式与重金属结合,改变植物对重金属的吸收,为重金属污染的植物修复及农作物安全率提供一定的基础。

**关键词:**低分子量有机酸;重金属污染;土壤;植物修复

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2021)08-0038-05

我国经济社会迅猛发展,重金属通过自然活动、交通运输、农业生产活动等多种途径进入土壤,导致土壤重金属含量严重超标。截至 2014 年我国耕地土壤污染点位超标率达 19.4%,目前土壤污染物主要是重金属,其中 Cd 污染点位超标率达到 7.0%,Ni、As、Cu、Hg、Pb、Cr 的点位超标率也分别都在 1% 以上,土壤重金属含量呈现从西到东、从北到南逐渐升高的趋势,中南地区、西南地区土壤重金属含量较高,污染较为严重<sup>[1]</sup>。土壤中的重金属能够通过植物体转移到人体内,并且能够在植物和人的体内蓄积,时刻威胁着人类身体健康<sup>[2]</sup>。

目前,土壤重金属污染修复主要分为提取修复和固化修复两大类。提取修复是将重金属从土壤中提取出来,降低土壤中的重金属含量,分为化学修复、物理修复和生物修复。固化修复是向土壤中添加一些添加剂来降低重金属的生物有效性,抑制其进入循环系统。这种方法治标不治本,不能从根本上解决重金属污染问题,而且会降低土壤质量。因此,目前主要应用于污染较严重,提取修复不能及时满足其生产要求的地区。

物理修复、化学修复技术成本高、对生态环境影响较大,加之土壤本身的复杂性,使得这种修复

技术难以满足人们日益增长的粮食需求。植物修复技术作为最常用的生物修复技术,具有安全性高、修复成本低、对生态环境影响小的优点,能够应用于污染农田、水体以及盐碱地、湿地等的治理方面。植物修复土壤重金属污染目前主要利用超富集植物对土壤重金属特殊的富集能力来完成。超富集植物富集重金属能力在普通植物百倍之上,它能够富集大量的重金属且不会对自身产生不利影响,目前在土壤重金属污染修复上应用广泛<sup>[3]</sup>。

土壤重金属污染修复过程中的影响因素有很多,如土壤酸碱性、酶活性、土壤肥力、微生物群落结构、土壤有机质、有机酸、生物炭,其中有机酸作为一种天然螯合剂,能够通过其还原性、酸性、络合性或螯合性增加某些元素的溶解性和迁移性<sup>[4]</sup>,提高重金属的生物有效性<sup>[5]</sup>,对修复效率有很大的影响。

## 1 土壤低分子量有机酸的来源

### 1.1 植物根系分泌

植物根系分泌物中有机酸通常具有较高的浓度,一般在 10~20 mmol/L 范围内<sup>[6]</sup>。但由于植物的根系分泌物很大程度上受土壤中各种生物和非生物胁迫的影响,如干旱、洪涝、土壤贫瘠、重金属毒害<sup>[7]</sup>,面对以上不利因素时,植物根系分泌有机酸的含量会增加好几倍,甚至达到 1 个数量级<sup>[6]</sup>。小麦、玉米、大豆、花生、水稻等作物<sup>[8-11]</sup>以及续断菊、东南景天、小花南芥、紫花苜蓿等超富集植物<sup>[12-15]</sup>面对重金属胁迫时,均会分泌大量的有机酸。有机酸能够根据浓度梯度以及细胞质膜上的电势梯度从细胞质扩散到周围的土壤溶液中<sup>[16]</sup>。

收稿日期:2020-06-22

基金项目:国家自然科学基金(编号:41761073、41967049、41867055)。

作者简介:刘 翠(1997—),女,山东青岛人,硕士研究生,从事土壤重金属污染植物修复研究。E-mail:1801005378@qq.com。

通信作者:祖艳群,博士,教授,从事环境生态学、土壤重金属污染及修复等研究。E-mail:zuyanqun@ynau.edu.cn。

## 1.2 植物枯枝落叶

研究表明,草酸、柠檬酸和苹果酸普遍存在于植物体中,植物组织和细胞中有机酸的含量变化很大,取决于植物种类、发育阶段、采样季节等<sup>[17]</sup>。植物体内的有机酸会随着植物叶片、果实的凋零进入土壤中。

郭山发现,凤眼莲体内主要存在草酸、柠檬酸和苹果酸,且体内有机酸含量表现为茎叶部 > 根部<sup>[18]</sup>。钟正燕等研究黑藻和竹叶眼子菜发现,这 2 种植物体内均含有草酸、丙二酸、柠檬酸、苹果酸,且黑藻体内的有机酸含量均显著高于竹叶眼子菜<sup>[19]</sup>。刘露奇在森林生态系统中的植物枝、叶、果以及林地土壤中都检测到有机酸的存在,并且发现幼龄林 > 成龄林 > 中龄林<sup>[20]</sup>。不同发育阶段杉木人工林土壤中都可以检测到草酸,同一土层中草酸含量表现为成龄林 > 中龄林 > 幼龄林。

## 1.3 微生物代谢产生

微生物群落是土壤有机酸的重要来源之一。van Hees 等在接种外生菌根真菌的云杉幼苗的土壤溶液中检测到乙酸、柠檬酸、甲酸、乳酸、丙二酸、草酸和琥珀酸(SA),且越靠近菌根有机酸浓度越高<sup>[21]</sup>。在培养黑曲霉菌时发现,培养 5 d 后营养液的 pH 值下降,且检测到柠檬酸、琥珀酸、苹果酸等有机酸存在<sup>[22]</sup>。耐金属真菌能够产生细胞外代谢物适应重金属胁迫,研究发现,油曲霉在蔗糖存在的情况下能够合成葡萄糖酸、草酸和富马酸,对 Cd、Co、Ni 的浸出率能够达到 50% 以上<sup>[23]</sup>。

# 2 低分子量有机酸对植物吸收和累积重金属的作用

## 2.1 能够促进土壤重金属的迁移转化

土壤基质中存在的有机酸主要来源于植物根系分泌物、微生物代谢产物和有机物的分解过程产物<sup>[7]</sup>。研究表明,微生物在营养条件充分的情况下能够分泌有机酸,促进 Cd 的溶解,低分子量草酸和柠檬酸能够活化土壤中的 Pb 和 Cd,促进腐殖质层和淀积层中 Pb 和 Cd 的释放<sup>[24]</sup>。范洪黎等研究发现,添加苹果酸和柠檬酸可使土壤难溶性 Cd 向可溶性 Cd 转化,对土壤中 Cd 有明显活化作用<sup>[25]</sup>。

## 2.2 帮助超富集植物吸收重金属

外源添加有机酸能够促进超富集植物吸收重金属,使重金属朝地上部转移。外源添加适量的低分子量有机酸能够促进龙葵对 Pb、Cd 的吸收<sup>[26]</sup>,也

能促进红蛋植物、小飞扬草和披碱草对 Cd 的吸收和富集,提高植株对 Cd 的转运系数,提高植株地上部 Cd 积累量<sup>[26-29]</sup>,土壤中有有机酸含量较高的水稻品种能够积累更多的 Cd,Cd 与有机酸结合得越多,植物对 Cd 的吸收量越大<sup>[7]</sup>。

## 2.3 能够络合土壤重金属

有机酸与重金属络合能够促进超富集植物吸收重金属,低分子量有机酸能够与植物体内有毒重金属络合,降低重金属的有效性<sup>[30]</sup>。

有机酸能够与金属络合来促进重金属朝植物地上部转移,超富集植物运输重金属首先是以植物络合肽(PC)作为载体将重金属运输到液泡中后分解,再通过某些运输蛋白将金属向叶片转移,细胞中含有大量阳离子会严重影响金属离子的运输,此时植物体内的有机酸与重金属结合,形成在运输上更占优势的金属-有机酸络合态,来协助重金属朝叶片转移<sup>[31]</sup>。

有机酸活化土壤中重金属的能力归因于 3 个主要机制,即酸化、络合和交换反应<sup>[32]</sup>。酸性条件下,Cd 能够与富含羧基基团的腐殖酸络合,形成络合物。土壤中的有机酸能够通过金属离子形成稳定的金属配位体复合物,避免金属离子进入植物体内或在其根部敏感位点累积,而植物体内有机酸则可与已经进入植物体的金属离子络合,使其转化为无毒或毒性较小的结合形态<sup>[33]</sup>。

## 2.4 帮助植物抵抗重金属胁迫

超富集植物能够耐受和富集高剂量的重金属却不会对自身造成毒害的机理便是释放有机酸<sup>[34]</sup>。面对土壤重金属胁迫时,植物根系会分泌有机酸阻止重金属进入植物体内,减轻重金属对植物的毒害。林琦等研究发现,有机酸能有效降低土壤对 Pb 的吸附,减轻 Pb 对植株的毒害,并能促使 Pb 从根部向地上部转移<sup>[35]</sup>。Pb 胁迫条件下,黑麦草自身分泌的多种有机酸能够增加其自身的生物量,增强黑麦草的耐性指数,促进 Pb<sup>2+</sup> 向地上部分转移<sup>[36]</sup>。

Cd 胁迫下杂色柳的光合作用减弱,生物量明显降低,添加柠檬酸、酒石酸、苹果酸后,杂色柳的光合作用强度不同程度地提高。柠檬酸的添加提高了叶肉细胞中类胡萝卜素以及叶绿体的数量和体积,酒石酸或苹果酸的施用有效地提高了 Cd 胁迫下杂色链球菌的生长潜力,对减轻镉对植物的超微结构损害很重要<sup>[37]</sup>。

3 低分子量有机酸对植物吸收和累积重金属的影响因素

3.1 有机酸的种类和浓度

表 1 不同种类和浓度的有机酸对植物吸收累积重金属的影响

植物	重金属	有机酸种类	效果	有机酸浓度	效果
野苋菜 <sup>[37]</sup>	Pb	乙酸	好		
		柠檬酸	较好		
		草酸	一般		
秋华柳 <sup>[38]</sup>	Cd	酒石酸、琥珀酸、苹果酸	好		
		柠檬酸	较好		
		草酸	不显著		
杂色柳 <sup>[36]</sup>	Cd	苹果酸、酒石酸	好		
		柠檬酸	一般		
美洲商陆 <sup>[39]</sup>	Cd	柠檬酸、苹果酸、草酸		10、20 mmol/kg	好
				30、40 mmol/kg	不显著
西瓜 <sup>[40]</sup>	Al	柠檬酸	好	400 ~ 800 μmol/L	好
		草酸	一般	1 200 μmol/L	一般
小飞扬草 <sup>[41]</sup>	Cd、Zn	苹果酸	好	5.51、16.5 mmol/kg	一般
		草酸	一般	11.0 mmol/kg	好
三叶鬼针草 <sup>[41]</sup>	Cd、Zn	苹果酸	一般	5.51、16.5 mmol/kg	一般
		草酸	好	11.0 mmol/kg	好

3.2 土壤 pH 值

有机酸可以通过降低土壤的 pH 值增强金属在土壤中的流动性。黄敬等发现,添加有机酸能够解吸母岩中的 Cd<sup>[43]</sup>。周鑫斌等在紫色土中添加有机酸,同样发现有机酸对于土壤中 Cd<sup>2+</sup> 的解吸有促进作用,且有机酸浓度越高,解吸作用越强<sup>[44]</sup>。

廉梅花采用盆栽试验,研究了不同 pH 值(4.0、5.5、7.0、8.5)对根际土壤重金属活化的影响,发现 Cd 污染下,土壤呈酸性时植物对 Cd 的吸收量更大<sup>[45]</sup>。这是由于酸能够更好地活化土壤重金属,使其成为更利于植物吸收的状态。陆红飞等以油菜为试验对象,在碱性土壤中添加不同浓度的 5 种有机酸,发现施加 5 种有机酸土壤 pH 值均有所变化,且不同浓度有机酸对土壤中 Cd 形态的影响不同<sup>[46]</sup>。

夏小燕研究小麦和玉米 2 种作物时发现,不同 pH 值条件下,有机酸对于重金属胁迫下 2 种作物生长有很大的影响<sup>[47]</sup>。在 pH 值为 4.0 条件下,柠檬酸主要是减少 Cd 对小麦幼苗地上部的毒害,草酸和酒石酸则主要是减少 Cd 对小麦幼苗根的毒害,而在 pH 值 6.0 条件下,柠檬酸则主要是帮助玉米抵抗 Cu 对其地下部和地上部干物质积累的影响。

3.3 微生物群落和土壤酶活性

有机酸与特定的物理和生化过程有关,如细菌

重金属胁迫条件下,植物体内及根系分泌物中会分泌大量有机酸,常见的低分子量有机酸有草酸、柠檬酸、苹果酸、酒石酸、琥珀酸,不同种类、不同浓度的有机酸对植物的修复效果不同(表 1)。

趋化、养分吸收、缺氧缓解、土壤结构改善<sup>[48-49]</sup>。

在东南景天和垂盆草 Cd 胁迫的研究中发现,土壤灭菌条件下土壤中的细菌、真菌和放线菌的数量和活性明显降低,非灭菌条件下东南景天和垂盆草根分泌更多的有机酸。非灭菌条件下东南景天对 Cd 的积累量明显高于灭菌条件,表明土壤微生物利于根际土壤 Cd 的活化以及东南景天对 Cd 的吸收<sup>[45]</sup>。Al 胁迫下西瓜根系土壤的微生物群落的数量和规模都有所减少,土壤酶活性也有所降低,外源添加有机酸缓解了 Al 对西瓜根系土壤微生物群落和酶活性的毒害,细菌、真菌、放线菌数量增加,脲酶、蔗糖酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性都有所升高。表明微生物群落和土壤酶活性跟土壤重金属含量有很大的关系,有机酸能够提高它们的活性,维持植物根际土壤环境健康状态<sup>[39]</sup>。

3.4 不同植物对有机酸的响应不同

不同植物在面对重金属胁迫时,其根系分泌有机酸的种类、含量和速率都有所不同。面对 Al 胁迫时,耐铝品种小麦根系分泌苹果酸,大豆根系分泌苹果酸的量增加,柠檬酸和草酸分泌量变化不大。Cd 胁迫下,高粱根系主要分泌苹果酸,玉米则主要分泌柠檬酸<sup>[8,50-51]</sup>,Zhu 等研究 Cd 胁迫下 2 种番茄品种根尖有机酸分泌情况发现,Cd 胁迫下 2 个品种

均分泌草酸,但镉耐受型品种草酸分泌量更多,长势更好,且根部镉含量更低<sup>[52]</sup>。小花南芥和玉米间作体系下,小花南芥根系分泌柠檬酸的量与植株富集 Pb 的量存在一致性,玉米根系分泌草酸与植株抑制吸收 Pb 的量存在一致性<sup>[14]</sup>。表明植物根系分泌物有机酸,不仅取决于土壤环境条件,植物种类、品种、生长阶段不同对于不同有机酸的响应也会有所改变。

#### 4 应用及效果评价

目前有机酸在促进植物吸收和累积方面的应用主要采用 2 种方式:(1)叶面喷施,将有机酸或者有机酸和某些营养元素的复混制剂配成适宜浓度,喷施在植株叶片表面,这种方式不会直接影响土壤理化性质;(2)将有机酸外源添加到土壤中,这种方式目前研究较多,由于土壤系统的复杂性,其作用机制比较复杂。

于丹等采用叶面喷施 6 种低分子量有机酸的方式,观察有机酸对辣椒生长状况、果实产量及品质的影响,发现叶面喷施有机酸能够增大辣椒地上部的生物量,减少辣椒根系的生物量,草酸处理能够降低辣椒果实粗纤维的含量<sup>[53]</sup>。陈菁等发现,叶面喷施 0.2% 柠檬酸能够提高菠萝叶片中叶绿素的含量,促进菠萝生长,提高菠萝产量<sup>[54]</sup>。叶面喷施有机酸和铁的复混制剂与单独喷施硫酸亚铁溶液相比,能够有效提高花生新展开叶片的叶绿素和活性铁含量<sup>[55]</sup>。叶面喷施有机酸钾能够给绿圆茄和线辣椒生长提供丰富的有机质和钾元素,喷施有机酸钾的绿圆茄比无机钾的绿圆茄和线辣椒植株株高、总叶面积及茎叶质量均有所增加<sup>[56]</sup>。

外源添加低分子量有机酸能够提高重金属胁迫下油菜的生物量<sup>[57]</sup>,韩助君等通过对比试验发现,经过有机酸处理的烟草叶片中叶绿素、钾含量和土壤中速效钾含量都高于对照<sup>[58]</sup>。宋金凤等 2017 年通过外源添加有机酸促进 Pb 胁迫下长白落叶松根系表面积、长度、体积和比根长的增加<sup>[59]</sup>。

叶面喷施和外源添加有机酸对于植物生长均能起到一定的促进作用,外源添加到土壤中的有机酸还能与重金属发生一系列反应来减轻重金属对植物的毒害,因此相对于叶面喷施,添加到土壤中的有机酸作用更多,但其对于土壤后续会有什么影响还有待于进一步研究。

#### 5 结论与展望

当前土壤重金属污染的问题越来越严重,因此

关于土壤污染的修复也越来越受到人们的关注。在众多重金属修复的方法中,有机酸作为一种天然螯合剂,参与重金属的吸收、运输、贮存和解毒等过程,对重金属的修复也起到了一定的作用,也为提高植物抵抗重金属胁迫产生了重要的作用。

目前,有机酸对植物修复重金属污染的作用已成为植物根系分泌物研究中的热点。但是对于有机酸辅助植物修复还存在以下问题<sup>[60]</sup>:(1)不同重金属胁迫下,不同植物分泌的有机酸种类、浓度及解毒机制的差异;(2)关于植物修复技术的植物种类选择、修复效果、影响因素、推广适用性的研究。对于有机酸影响植物吸收和累积重金属中的许多结论还处于推论阶段,缺乏理论基础。因此,深入研究重金属胁迫下有机酸对植物生理代谢活动的影响,有助于人们了解土壤重金属污染的植物修复机制及应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国生态环境部. 全国土壤污染状况调查公报 (2014 年 4 月 17 日)[J]. 环境教育,2014(6):8-10.
- [2] 熊琼仙,李正龙,熊敏. 浅谈土壤中  $Pb^{2+}$  的污染及修复研究现状[J]. 广州化工,2019,47(17):135-137.
- [3] 杨树深,孙衍芹,郑鑫,等. 重金属污染农田安全利用:进展与展望[J]. 中国生态农业学报,2018,26(10):1555-1572.
- [4] Zhu L J, Cheng H, Ma J F, et al. Decolorization of methyl orange by  $MnO_2$ /organic acid system: the role of  $Mn(III)$  [J]. Materials Research Bulletin,2019,122:110670.
- [5] 叶朝军,吴家胜,钟斌,等. EDTA 和有机酸对毛竹修复重金属污染土壤的强化作用[J]. 浙江农林大学学报,2018,35(3):431-439.
- [6] Sokolova T A. Low-molecular-weight organic acids in soils: sources, composition, concentrations, and functions: a review [J]. Eurasian Soil Science,2020,53(5):580-594.
- [7] Adeleke R, Nwangburuka C, Oboirien B. Origins, roles and fate of organic acids in soils: a review [J]. South African Journal of Botany, 2017,108:393-406.
- [8] 林亚蒙. 铝胁迫诱导的小麦苹果酸分泌信号转导通路中 IAA 及 MAPKs 响应机制研究[D]. 武汉:华中农业大学,2015:13-20.
- [9] 陈利,肖靖秀,郑毅. 间作玉米大豆根系分泌物中有机酸的变化特征[J]. 西南林业大学学报,2016,36(5):78-83.
- [10] 何龙飞,黄咏梅,詹洁,等. 铝对花生根尖线粒体膜脂过氧化和有机酸分泌的影响[J]. 中国油料作物学报,2006,28(3):293-297.
- [11] 唐杰,徐浩洋,王昌全,等. 镉胁迫对 3 个水稻品种(系)根系生长及有机酸和氨基酸分泌的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2016,42(2):118-124.
- [12] 秦丽. 间作系统中续断菊与作物 Cd、Pb 累积特征和根系分泌低分子有机酸机理[D]. 昆明:云南农业大学,2017.

- [13] 张奕斌. 东南景天根系分泌物组成和特性研究[D]. 杭州:浙江大学, 2014.
- [14] 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.
- [15] 邱晓. 铅胁迫对紫花苜蓿的影响及外源有机酸的缓解机制[D]. 上海: 上海交通大学, 2010: 6–10.
- [16] Wang Y, Fang L, Lin L, et al. Effects of low molecular-weight organic acids and dehydrogenase activity in rhizosphere sediments of mangrove plants on phytoremediation of polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Chemosphere, 2014, 99: 152–159.
- [17] Strobel B W, Hansen H C, Borggaard O K, et al. Composition and reactivity of DOC in forest floor soil solutions in relation to tree species and soil type[J]. Biogeochemistry, 2001, 56(1): 1–26.
- [18] 郭山. Cd 胁迫对凤眼莲(*Eichhornia crassipes*)根系分泌及体内小分子有机物代谢的影响研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2018: 24–35.
- [19] 钟正燕, 王宏镔, 王海娟, 等. 砷形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(16): 5002–5013.
- [20] 刘露奇. 不同发育阶段杉木人工林生态系统有机酸研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013: 23–45.
- [21] van Hees P A W, Godbold D L, Jentschke G, et al. Impact of ectomycorrhizas on the concentration and biodegradation of simple organic acids in a forest soil[J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54(4): 697–706.
- [22] Wang W Y, Sun J J, Dong C L, et al. Biotite weathering by *Aspergillus niger* and its potential utilisation[J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(7): 1901–1910.
- [23] Din G, Hassan A, Rafiq M, et al. Characterization of organic acid producing *Aspergillus tubingensis* FMS1 and its role in metals leaching from soil[J]. Geomicrobiology Journal, 2020, 37(4): 336–344.
- [24] 赵雨森, 王文波, 祁海云, 等. 低分子有机酸/盐对复合污染土壤中 Cd、Pb 有效性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2010, 38(6): 72–75.
- [25] 范洪黎, 王旭, 周卫. 添加有机酸对土壤镉形态转化及苋菜镉积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 132–138.
- [26] 王效国, 呼世斌, 程治文, 等. 大豆、龙葵单作和间作对砒污染土壤的修复[J]. 环境工程学报, 2015, 9(12): 6128–6134.
- [27] 刘宛茹, 张磊, 杨惟薇, 等. 外源有机酸对红蛋植物吸收和转运镉的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 205–209.
- [28] 詹淑威, 潘伟斌, 赖彩秀, 等. 外源有机酸对小飞扬草(*Euphorbia thymifolia* L.) 修复镉污染土壤的影响[J]. 环境工程学报, 2015, 9(10): 5096–5102.
- [29] 薛博哈, 李娜, 宋桂龙, 等. 外源柠檬酸、苹果酸和草酸对披碱草镉耐受及富集的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(6): 128–136.
- [30] Lu T, Ke M, Lavoie M, et al. Rhizosphere microorganisms can influence the timing of plant flowering[J]. Microbiome, 2018, 6(1): 231.
- [31] 朱艳霞, 魏幼璋, 叶正钱, 等. 有机酸在超积累植物重金属解毒机制中的作用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006(7): 121–126.
- [32] Omar S A. The role of rock-phosphate-solubilizing fungi and vesicular-arbuscular-mycorrhiza (VAM) in growth of wheat plants fertilized with rock phosphate[J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 1997, 14(2): 211–218.
- [33] 傅晓萍, 豆长明, 胡少平, 等. 有机酸在植物对重金属耐性和解毒机制中的作用[J]. 植物生态学报, 2010, 34(11): 1354–1358.
- [34] Agnello A C, Huguenot D, van Hullebusch E D, et al. Phytotoxicity of citric acid and Tween® 80 for potential use as soil amendments in enhanced phytoremediation[J]. International Journal of Phytoremediation, 2015, 17(7): 669–677.
- [35] 林琦, 陈英旭, 陈怀满, 等. 有机酸对 Pb、Cd 的土壤化学行为和植株效应的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(4): 619–622.
- [36] 乔冬梅, 庞鸿宾, 齐学斌, 等. 黑麦草分泌有机酸的生物特性对铅污染修复的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(12): 195–199.
- [37] Chen H C, Zhang S L, Wu K J, et al. The effects of exogenous organic acids on the growth, photosynthesis and cellular ultrastructure of *Salix variegata* Franch. under Cd stress[J]. Ecotoxicology and environmental safety, 2020, 187: 109790.
- [38] 马良, 秦余丽, 蔡璐瑶, 等. 小分子有机酸诱导野苋菜修复 Pb 污染土壤[J]. 环境工程学报, 2017, 11(6): 3861–3865.
- [39] 陈红纯. 外源有机酸对镉胁迫下秋华柳镉积累特征的影响及其机理研究[D]. 重庆: 西南大学, 2019: 18–20.
- [40] 刘欢. 外源低分子量有机酸对镉胁迫下美洲商陆的超累积和解 Cd 毒的机制研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [41] 孙远秀. 外源有机酸对西瓜铝毒害缓解作用的研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016: 41–48.
- [42] 赖彩秀, 潘伟斌, 张太平, 等. 苹果酸和草酸对两种植物吸收土壤中 Cd、Zn 的影响[J]. 生态科学, 2016, 35(4): 31–37.
- [43] 黄敬, 龙坚, 蒋凯, 等. 外源有机酸对不同土壤中 Cd 解吸行为的影响[J]. 环境生态学, 2019(4): 54–62.
- [44] 周鑫斌, 黄建国, 赖凡. pH 和有有机酸对酸性紫色土吸附-解吸镉的影响[J]. 水土保持学报, 2007(6): 139–142.
- [45] 廉梅花. 根际土壤中重金属的活化因素及作用机理研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2015: 36–59.
- [46] 陆红飞, 乔冬梅, 齐学斌, 等. 外源有机酸对土壤 pH 值、酶活性和 Cd 迁移转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(3): 542–553.
- [47] 夏小燕. 不同 pH 和有有机酸对作物幼苗重金属吸收的影响研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2006: 24–36.
- [48] Grierson P F. Organic acids in the rhizosphere of *Banksia integrifolia* L. f. [J]. Plant and Soil, 1992, 144(2): 259–265.
- [49] Ryan P R, Delhaize E, Randall P J. Characterisation of Al-stimulated efflux of malate from the apices of Al-tolerant wheat roots[J]. Planta, 1995, 196(1): 103–110.
- [50] 田聪, 张烁, 栗畅, 等. 铝胁迫下大豆根系有机酸积累的特性[J]. 大豆科学, 2017, 36(2): 256–261.
- [51] Pinto A P, Simoes I, Mota A M. Cadmium impact on root exudates of sorghum and maize plants: a speciation study[J]. Journal of Plant Nutrition, 2008, 31(10): 1746–1755.

朱香梅,石雨荷,李 晴,等.白术种质资源遗传多样性及连作障碍研究进展[J].江苏农业科学,2021,49(8):43-48.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.08.007

# 白术种质资源遗传多样性及连作障碍研究进展

朱香梅<sup>1</sup>,石雨荷<sup>1</sup>,李 晴<sup>1</sup>,周日宝<sup>1</sup>,童巧珍<sup>1,2</sup>

(1. 湖南中医药大学,湖南长沙 410208; 2. 岳阳市中医院,湖南岳阳 414000)

**摘要:**白术是我国常用的大宗类药材,在我国已有上百年的栽培历史。随着白术市场需求量的扩大及药用植物遗传多样性检测手段逐渐成熟和多样化,关于白术种质资源的研究也逐步深入。分别介绍不同白术种质及其同属间形态水平上的差异和 DNA 水平上的差异。形态标记法能简单筛选出种质优良种株的表型特征,而分子鉴定技术直接分析遗传物质 DNA 的多态性来推断物种内在的遗传变异。白术栽植过程中除了 DNA 水平上存在的性状差异影响着白术品质,土壤因子的变化、化感自毒作用也是重要的影响因素,就白术连作障碍发生的原因及其解决措施展开讨论。综述白术种质资源遗传多样性及栽植过程中连作障碍问题的研究进展,为白术优质种质筛选鉴定、遗传多样性保护及药材产业化发展提供参考。

**关键词:**白术;遗传多样性;连作障碍;种质资源;形态标记法;分子鉴定;变异

**中图分类号:**S567.23+3.03;S567.23+3.04 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2021)08-0043-06

白术为菊科苍术属(*Atractylodes* DC)植物白术(*Atractylodes macrocephala* Koidz.)的干燥根茎,是著名的地道药材“浙八味”之一,其味苦、甘,性温,归脾、胃经,有健脾益气、燥湿利水、止汗、安胎等功效<sup>[1]</sup>。张仲景《伤寒杂病论》中提到白术还具有祛风逐湿、温中止利、润肠通便之效<sup>[2]</sup>。现代研究表明,白术富含挥发油和内酯类成分,具有抗肿瘤、保护胃黏膜、抗炎、保肝、改善记忆力、免疫调节等多

种作用<sup>[3]</sup>,在临床应用中广泛使用。白术属于异花授粉的多年生草本植物,主要产于浙江、安徽、福建、四川、江西、湖南等地,以北纬 29°50′~30°50′亚热带常绿阔叶林的浙江於潜、安徽皖南山区一带为其道地产区<sup>[4]</sup>。虽在浙江新昌、嵊县,湖南平江、衡阳,安徽歙县、宁国,江西修水、铜鼓等地区均有移植栽培<sup>[5]</sup>,但由于白术长期不同区域间的移植、杂交,以及种间、居群间的杂交繁殖,造成了白术的种质混乱,品种不明,使得白术资源逐渐减少、遗传多样性降低,品种质量得不到保障<sup>[6]</sup>。遗传多样性是生物多样性的基础,决定了物种对外界不良环境的抵御能力和进化能力,遗传多样性降低表明物种遗传变异水平和对生存环境的适应能力降低<sup>[7]</sup>。另外,白术为宿根植物且忌连作,具有很强的忌地性,栽培过程中容易出现连作障碍问题<sup>[8]</sup>。种植过白术的土壤通常须间隔 3~5 年才能重新栽植白术。

收稿日期:2020-08-14

基金项目:中央引导地方科技发展专项资金(编号:2019XF5069);湖南省教育厅重点项目(编号:19A367)。

作者简介:朱香梅(1996—),女,湖南邵阳人,硕士研究生,研究方向为中药资源与质量。E-mail:2785384490@qq.com。

通信作者:童巧珍,博士,教授,博士生导师,从事中药资源与质量研究。E-mail:qztong88@126.com。

[52]Zhu L,Zhang M. Effect of rhamnolipids on the uptake of PAHs by ryegrass[J]. Environmental Pollution,2008,156(1):46-52.

[53]于 丹,徐福利,王渭玲,等.低分子有机酸喷施对辣椒生长、养分吸收、产量及果实品质的影响[J].西北农业学报,2013,22(6):118-125.

[54]陈 菁,孙光明,石伟琦,等.喷施铁和有机酸防治菠萝叶片黄化及其对产量的影响研究[J].热带农业科学,2014,34(6):6-9,13.

[55]索炎炎,张 翔,毛家伟,等.喷施不同有机酸与铁复混制剂对花生生长发育的影响[J].花生学报,2013,42(2):36-40.

[56]于 丹.有机酸钾喷施对茄子和辣椒生长发育、产量及果实品

质的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2013.

[57]唐宇庭,黄佳玉,王维生,等.低分子有机酸对油菜吸收 Cd 和 Zn 的影响[J].广西师范大学学报(自然科学版),2012,30(2):127-131.

[58]韩助君,许 杰,卫宣志,等.外源有机酸对烟草生理指标和土壤速效钾含量的影响[J].中国农业科技导报,2016,18(4):109-114.

[59]宋金凤,李金博,曹 楷,等.草酸和柠檬酸提高高白落叶松对 Pb 胁迫的适应性[J].北京林业大学学报,2017,39(11):18-27.

[60]陈美静,刘倩雯,谭佳缘,等.重金属胁迫对植物有机酸代谢影响研究进展[J].广东农业科学,2015,42(24):86-91.