

重金属作用对作物品质及代谢的影响研究概述

杨小俊*

(西藏自治区农牧科学院农业质量标准与检测研究所, 拉萨 850032)

摘 要: 土壤-作物系统中, 作物从土壤中吸收的重金属可通过食物链进入人体, 并在人体内成百上千次积累。农作物是人们生产生活的重要组成部分, 其生产品质将直接影响人们的饮食健康和社会发展稳定。重金属对植物生长、植物体内重金属的吸收转运及其生理生化方面具有影响。重金属对作物的毒害作用往往伴随着单一和交互两种形式, 重金属间的相互作用既可能是协同效应, 也可能是拮抗效应。目前的研究发现, 重金属对不同植物表现出截然不同的影响, 对浮萍、蚕豆和大麦等重金属作用表现出拮抗作用, 对油菜表现出协同作用。其可能取决于植物品种、环境条件、外源添加重金属浓度及比值等。研究重金属对作物品质及代谢的影响, 对保护人体健康具有重大意义。本文着重分析重金属对作物生长发育、生理生化、产量、营养品质, 以及氨基酸类代谢、糖类代谢、有机酸类代谢、次生代谢、能量代谢和其他代谢的影响。针对作物生长过程, 不仅论述单个重金属元素对作物生长品质和代谢产生的影响, 还分析了重金属间作用对作物品质和代谢的影响。通过概述重金属作用污染对作物的毒害机制, 有针对性地提出重金属污染防治措施和建议, 为科学制定土壤重金属污染防控对策具有重要的支持作用, 对筛选和培育耐重金属的作物具有更深层次的研究意义, 对下一步研究作物重金属的承受力及适应性奠定了基础。

关键词: 作物; 重金属; 品质; 代谢

Research overview of effects of heavy metals interactions on crops quality and metabolomics

YANG Xiao-Jun*

(Institute of Agricultural Quality Standards and Testing, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Lhasa 850032, China)

ABSTRACT: In the soil crop system, heavy metals absorbed by crops from the soil can enter the human body through the food chain and accumulate in the human body hundreds of times. Crop is an important part of people's production and life, and its production quality will directly affect people's diet health and social development and stability. Heavy metals have effects on plant growth, absorption and transport of heavy metals in plants and their physiology and biochemistry. The toxic effects of heavy metals on crops are often accompanied by single and interactive forms, the interaction between heavy metals may be synergistic or antagonistic. The current research found that heavy metals have different effects on different plants, antagonistic effects on the interaction of heavy metals such as duckweed, broad bean and barley, and synergistic effects on rape. It may depend on plant species,

基金项目: 西藏自治区自然科学基金项目(XZ202001ZR0084G)

Fund: Supported by the Tibet Autonomous Region Natural Science Fund Project (XZ202001ZR0084G)

***通信作者:** 杨小俊, 研究实习生, 主要研究方向为农畜产品品质检测。E-mail: 956892326@qq.com

***Corresponding author:** YANG Xiao-Jun, Research Intern, Institute of Agricultural Quality Standards and Testing, Tibet Academy of Agriculture and Animal Husbandry, Lhasa 850032, China. E-mail: 956892326@qq.com

environmental conditions, concentration and ratio of exogenous heavy metals. To study the effects of heavy metals on crop quality and metabolism is of great significance to protect human health. This paper focused on the effects of the interaction between heavy metals on crop growth and development, physiology and biochemistry, yield, nutritional quality, amino acid metabolism, carbohydrate metabolism, organic acid metabolism, secondary metabolism, energy metabolism and other metabolism. According to the crop growth process, not only the effects of a single heavy metal element on crop growth quality and metabolomics, but also the effects of the interaction between heavy metals on crop quality and metabolomics were analyzed. The toxic mechanism of heavy metal interaction pollution on crops was summarized, the paper put forward the prevention and control measures and suggestions of heavy metal pollution, which had an important supporting role for the scientific formulation of soil heavy metal pollution prevention and control countermeasures, had a deeper research significance for the screening and cultivation of heavy metal tolerant crops, and laid a foundation for further research on the tolerance and adaptability of heavy metals in crops.

KEY WORDS: crops; heavy metals; quality; metabolize

0 引言

重金属污染由于其高毒性、持久性和生物蓄积性,给公众健康带来了许多威胁^[1]。土壤-作物系统中的重金属污染能够通过自然界中食物链的方式转运到人体内,如果人体内重金属含量严重超标将对健康产生极大危害。在对自然环境科学的研究过程中,大多数科研工作者都把目光聚集于铬(Cr)、汞(Hg)、镉(Cd)、铅(Pb)、砷(As)等重金属^[2]。土壤中所含有的不同种类的重金属往往其毒性也不尽相同,其毒性随重金属的特性变化很大,特定研究环境下土壤的理化性质的差异也严重影响作物对重金属的富集吸收,此外,重金属是不可降解的,能够生物累积,对人类和环境健康构成风险^[3]。在实际的重金属污染地区,往往伴随着各种重金属复合污染。土壤重金属作用不仅会改变土壤的正常组成、结构和功能,还会破坏作物的内部成分,对农作物的生理生化产生影响,导致作物成熟后的品质及产量大打折扣。重金属作用对作物生长的毒性效应不同于单一污染。当它们产生单一效应时,往往也伴随着相互作用,导致它们对环境危害的变化。在正常情况下,同一组周期元素的化学性质非常相似,它们可以相互竞争和结合。因此,同一家族的元素与物理化学性质相似的元素之间容易出现对抗性。在作物生长过程中,重金属会不同程度地抑制作物的生长。在重金属浓度较高的条件下,作物的株高、根长、叶绿素含量(soil and plant analyzer development, SPAD)值和地上/地下生物量将受到显著影响。在单一污染和复合污染条件下,重金属的积累主要发生在根系,其主要规律是根系高于茎叶^[4]。重金属镉中毒作物的独特症状是:绿叶逐渐消失,叶缘颜色逐渐变褐,叶柄逐渐变红褐色或红色,叶片逐渐卷曲,根系也逐渐变粗、变短、变黑褐色。在高浓度重金属的相互作用下,作物的生长代谢将变得混乱,生长发育过程将变得缓慢。严重的副作用可能会杀死整个作物。因此,通过研究重金属对作物的毒害机

制,明确地制定出重金属毒害防治方案,以减小重金属危害所造成的损失,对制定土壤重金属污染防控对策具有重要的指导作用^[5]。代谢组学主要是利用细胞检测技术、组织或生物体在外界刺激、改变环境或基因代谢产物的类型和水平来研究不同种类、不同基因型、不同环境下作物在各个发育阶段除大分子外的代谢物的连锁反应,主要是类型差异、含量波动的规律性研究,从而发掘出蛋白质和基因的某些潜在作用,从而能够明确在特定条件下的机体的响应及应对反射,探究代谢物和病理及生理变化之间的内在联系。由于代谢组学在研究中起到的关键作用,代谢组学在作物受重金属影响研究中的地位也越来越高。运用代谢组学的相关衍生技术,可以得到作物与环境变化的关系,对农业生产和作物种植预警具有重要作用,在作物受重金属作用影响的研究中也存在较大的潜力。

作物对重金属的过度吸收会影响作物的正常代谢。重金属影响作物的方式主要通过以下形式:对离子性蛋白质取而代之,影响作物的功能组织;增加植物细胞的活性氧类含量,破坏农作物的抗氧化系统;通过与农作物蛋白质结合,减缓了活性。现有的研究表明,代谢泛指作物在重金属作用下其代谢产物的变化、产生的应激反应、特定生长阶段作物组织器官的代谢途径或代谢网络以及耐重金属品种的筛选^[6]。

作物对重金属的过量吸收会抑制或刺激某些酶的活性,影响蛋白质合成,削弱光合作用,使作物枯萎、发黄、干燥、变异甚至坏死,造成作物品质差、产量低。此类生理变化包括多种形式的代谢,主要包含有机酸代谢、氨基酸代谢、能量代谢、糖代谢等。研究表明,在重金属作用下,作物叶片和根系中氨基酸、抗坏血酸和酚类化合物含量显著增加,而柠檬酸含量显著降低。在重金属作用下,含量及组分波动较大的代谢物主要有有机酸、碳水化合物、氨基酸。在重金属的作用下,作物根、茎、叶中氨基酸、有机酸、辅酶等多种代谢物含量显著增加^[7-10]。当钼(Mo)

含量较高时, 根的细胞壁、可溶性部分、细胞器、原生质体和叶绿体中的钼含量均高于地上部; 过量钼胁迫下, 小麦叶片苹果酸和富马酸含量增加, β -丙氨酸、*L*-丝氨酸、*L*-苏氨酸和 *L*-谷氨酰胺含量增加。植物液泡是过量钼的主要贮存场所。过量胁迫下产生的有机酸和氨基酸可与钼在液泡中螯合, 降低钼的生物毒性, 增强小麦对过量钼的耐受性^[11]。

重金属作用可以抑制多种酶的活性。作物的抗氧化系统不仅是重金属解毒的场所, 也是重金属毒性的关键部分。为了减少重金属在作物种子萌发过程中的危害, 其防御系统对重金属的毒害具有胁迫保护作用。现有研究表明, 农作物体内含有数十万种代谢产物, 它们与重金属作用参与糖酵解代谢、有机酸代谢、氨基酸代谢等多种代谢途径^[12], 因此, 本文探讨了重金属作用下作物中氨基酸、有机酸、糖等物质的变化特征, 对研究作物重金属的承受力及适应性具有重要意义。

1 重金属作用对作物品质的影响

1.1 重金属作用对作物生长发育的影响

作物生长发育不一定需要重金属的参与, 但在作物生长发育过程中会富集一定量的重金属, 残留的重金属会通过作物根系吸收并转移到不同器官和组织中。作物生长过程中对于重金属的分配、运输和吸收, 一直处于流动态, 因此, 重金属作用会对农作物生长产生不同程度的影响。Pb/Cd 交互在水稻总根长、根表面积、根平均直径、根尖数和分叉数中存在不同程度的拮抗作用, 促进水稻根系的整体生长, 且促进水稻进行光合作用。杨龙^[13]有研究表明, 随着 Cd/Zn 复合处理浓度不断升高, 紫花苜蓿种子活力指数和发芽指数均呈现显著性降低的趋势, 其幼苗根生长均呈现缩短的趋势。同时随着不同浓度 Cd/Zn 复合胁迫处理时间的延长, 其种子鲜重明显增加。重金属浓度不同对作物的影响也存在较大差异, 铬低浓度时, 会刺激作物(白菜、小麦、油菜等)种子生长, 反之, 如果其含量过高, 会对作物造成一定的损害, 阻碍作物种子萌发; 汞是剧毒物质, 可以阻碍磷酸化蛋白质的产生。短时间处理后, 还能阻碍作物根细胞膜和叶片的产生, 促进叶片细胞蛋白质的磷酸化, 促进叶片的生长, 但对作物根系的生长有抑制作用。重金属在作物中的分布、吸收和运输处于动态状态, 不同时期重金属会干扰作物的生长。重金属含量一般从分蘖后期开始逐渐增加, 到灌浆中期达到峰值。土壤重金属含量在成熟期后显著下降。分蘖期重金属主要分布在叶片、根和茎中。经过这一阶段, 重金属在根系中的积累量明显减少, 直到拔节期, 茎中重金属的积累较少^[14]。徐芬芬等^[15]研究表明如果砷、镉浓度不断增大及重金属滞留的时间不断

增加, 那么其对作物的生长将造成一定的危害。重金属对作物种子萌发会产生两种影响, 既包括低浓度的刺激也包含高浓度的抑制。秦华等^[16]研究表明, 低浓度 Pb (≤ 100 mg/kg)、Cd (≤ 1 mg/kg)处理促进了甜高粱的生长, 高浓度 Pb (≥ 1000 mg/kg)、Cd (≥ 10 mg/kg)则呈现出抑制效应, 根长、株高、穗长和生物量均显著减小。甜高粱按重金属抑制程度排序为: 胚芽根的长度高于其活力指数且高于发芽及胚鲜重、发芽势、胚芽长度、发芽率, 证明重金属对胚根长度影响最大, 对发芽率影响较小^[17]。重金属的富集会直接影响到作物各阶段各个器官不同部位的生长发育, 甚至连种子萌发都受到影响。单个重金属与多种重金属间的作用对作物生长发育的影响也存在较大差异, 其影响规律伴随着重金属种类和含量变化, 需进一步探究。

1.2 重金属作用对作物产量和品质的影响

作物对重金属的吸收主要来自土壤-作物系统, 作物对重金属吸收后的分配模式为: 作物根部重金属富集最多, 作物籽粒、茎、叶含量比根部少得多。洪涛等^[18]有研究表明, 水稻籽实中 Cd 与土壤硒(Se)和 pH 呈显著的负相关关系。范中亮等^[19]研究表明, 不同浓度重金属作用下对作物产量均会产生影响, 重金属单因素作用下可导致水稻产量减产超三成; 重金属作用下将严重影响作物的产量, 以水稻为例, 其产量最终可能减产一半以上。若土壤受重金属污染且 Cd 元素含量过高时, 会导致作物籽粒中镉含量严重超标, 将直接降低作物籽粒中蛋白质的含量; 聂胜委等^[20]研究表明, 重金属胁迫下, Cd、Pb、As、Hg、Cr 重金属对小麦单位面积内的有效穗数影响最大, 并且作物穗粒数也会受到影响, 虽然对作物的千粒重会产生影响但是产生的影响不是特别大; 不同种类重金属胁迫对小麦产量影响作用依次为 Hg<Cd<As<Pb<Cr。范中亮等^[19]研究表明当镉浓度较低时, 不同土壤理化性质不同, 水稻的产量和品质也显著受到影响, 高浓度处理下结实率和穗重显著下降。不同浓度重金属作用对小麦产量的影响表明, 在低浓度范围内, 重金属作用对小麦产量有促进作用, 而在高浓度范围内, 重金属作用对小麦产量有抑制作用^[20]。此外, 有研究表明, 土壤镉浓度 ≤ 10 mg/kg 时, Cd 胁迫对生长的影响较小, 甜高粱根的 Cd 浓度及 Cd 积累量随土壤水分的增加而增加^[21]。张晶等^[22]有研究表明, Cu/Zn 处理千粒重均高于对照组(CK), 说明其产量增加。低浓度 Cd 胁迫能促进双腺藤幼苗叶片数、分枝数、株高、根长及生物量增加, 高浓度 Cd 胁迫下各项生长指标和生物量均明显降低, 双腺藤幼苗可能通过调节体内的渗透调节物质及抗氧化酶活性等来抵抗土壤中的镉胁迫; 在土壤镉污染修复中具有一定的应用潜力^[23]。各种重金属对于稻米品质的影响也存在着一定差异。其中 Cd 元素会对作物中赖氨酸元素形成抑制,

能够减少作物中组氨酸以及赖氨酸的含量, 并会引发冬氨酸含量大规模上升的状况; 而铅元素会对植物中缬氨酸形成遏制, 会提升天冬氨酸、苯丙氨酸以及苯丙氨酸的含量; Pb 元素会直接影响作物中的直链淀粉含量, 元素含量越大, 淀粉含量也会越小; Cd 元素含量数值和作物中还原糖含量有密切关联, 两者呈现出反比例关系。为有效降低重金属污染影响, 提升稻米品质, 做好重金属污染控制显得极为重要^[24-27]。不同种类和浓度的重金属均会对作物的产量和品质产生影响, 其影响的程度复杂多变, 且不管是单一重金属还是多种重金属元素只要超出作物重金属耐受临界点, 其产量和品质都会受到严重影响, 甚至产量减半, 品质不达标, 食用后将对人体健康产生极大危害。

1.3 重金属作用对作物生理生化的影响

重金属是有毒元素, 对生物体来说是不必要的。它们在土壤中具有很强的化学活性, 包括理化性质、酶活性、还原性、持久性、可分解性、生物累积性等^[28-31], 容易被作物根系吸收, 然后通过内部运输到地上部分, 从而对作物的生理生化产生影响。在重金属作用下, 作物生长往往受到抑制, 光合速率降低, 养分代谢失衡, 氧化应激增强, 经常出现一系列生理代谢紊乱。范中亮等^[19]有研究, 在 Cd 含量在 7 mg/kg 以下时, 在抽穗期剑叶的蒸腾速率、净光合速率、相对叶绿素、气孔导度含量基本一致, 随 Cd 浓度的增加先升高后降低; 作物细胞间的 CO₂ 含量随 Cd 浓度的增加先降低后增加; 随着 Cd 浓度的增加作物的光合作用会降低。研究表明, 低含量 Cd 作用下可以增强超氧化物歧化酶活性, 重金属 Cd 浓度较高时会导致水稻叶片超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)活性降低; 同时, 其叶片中的丙二醛(malondialdehyde, MDA)浓度会不断升高。研究表明, 随着 Cd 含量和时间的增加, 严重影响水稻幼苗根尖细胞有丝分裂及根系的生长发育, 染色体畸形变异的概率加大。与此同时, 重金属作用不仅能减弱作物的蒸腾速率、水势, 还会阻碍水分在作物体内的转运, 导致水分代谢失衡^[32]。研究表明, 大部分重金属元素对作物的促进作用低, 抑制作用强, 作物体内的重金属含量升高后, 作物过氧化氢酶(catalase activity, CAT)活性、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性、SOD 活性呈下降趋势, 相反, 游离脯氨酸(proline, Pro)含量、丙二醛含量却成正比关系。张晶等^[22]有研究表明, 小麦开花后 Cu、Zn 各处理间 SPAD 值均呈先升后降的趋势, 低浓度 Cu、Zn 处理有利于提高叶绿素含量, 延缓叶片衰老进程。Cu、Zn 以 100 mg/kg 处理在灌浆后期光化学活性较强, 受伤程度较小, 高于 100 mg/kg 不利于维持小麦叶片细胞膜稳定性, 适宜的 Cu、Zn 含量可以延缓小麦旗叶细胞的脂膜过氧化作用和衰老进程。作物的生长发育、产量、品质和生理生化有着密切的联系, 重金属的富集能够对作物的生理生化

产生影响, 不同浓度的重金属含量会对作物生理生化产生不同的抑制阻碍作用, 不同种类的重金属也会对作物的生理生化指标产生影响, 其影响规律差异显著, 要求不同元素、不同浓度做具体分析。

1.4 重金属作用对作物营养品质的影响

重金属对作物的污染大部分来源于土壤, 因此作物中重金属的分布主要集中在根系, 籽粒、茎、叶中的富集量远小于根系, 但即使有重金属吸收富集不多, 作物籽粒中的重金属含量也会导致作物的品质降低。相关研究表明, 当土壤中重金属的临界值降低时, 作物籽实对重金属的积累量反而变大, 重金属含量严重超标。在研究 Cd 污染及稻胚金属分布的过程中, 发现 Cd 在稻胚中不与淀粉结合, 而是与蛋白质结合。Cu 在种皮和胚中的含量较高。同时, 种子中脂肪含量最低、蛋白质含量最高, 不同类型蛋白质的存在区域也不尽相同。因此, 能够通过粮食精深加工的形式显著降低粮食中的重金属残留超标现象。As 在作物结构中的分布不同, 其在种子中的浓度在胚中最高。与 As 不同, Pb 在作物形态上分布均匀, 主要分布在种皮和胚中。Pb 能够对作物的直链淀粉含量产生抑制, 二者呈反比关系; Cd 含量值与作物还原糖含量密切相关, 二者呈反比关系。重金属 Cr 作用下会影响作物籽粒中粗蛋白氨基酸总量、粗淀粉、赖氨酸含量发生明显变化。按重金属富集规律, 影响最大的是根、最小的是穗, 这和重金属在作物体内的富集、转运规律有很大关系。

2 重金属作用对作物代谢的影响

2.1 重金属作用对作物氨基酸类代谢的影响

重金属作用下, 氨基酸参与气孔关闭、离子转运、氮解毒。吕佳莉^[33]研究结果表明, 不同浓度重金属作用下, 丙氨酸、甘氨酸、缬氨酸、苏氨酸和谷氨酸及天冬氨酸的浓度都会升高。谷氨酸、甘氨酸是合成谷胱甘肽和作物螯合肽的前体, 参与作物螯合肽及抗氧化酶代谢产物的合成。李连祯等^[34]认为重金属 Pb、Zn 交互作用会导致作物的氮代谢途径受到影响, 由于谷氨酸、甘氨酸的增加加速了硝酸盐的还原反应, 从而降低重金属对作物产生的危害。与此同时, 细胞壁的生理生化也会随着此类氨基酸的变化而变化。天门冬氨酸能够使作物体内硝酸盐含量降低, 维持作物细胞的渗透压, 也可以作为重金属形成金属络合物的配体^[35]。重金作用下蛋白质合成减慢和丙氨酸转氨酶反应变弱有可能引起丙氨酸的升高。非糖前体产生糖的过程就是糖异生, 其最大的作用就是为糖依赖性组织源源不断地提供能量。Cd 会影响作物的赖氨酸含量, 导致天冬氨酸含量大幅度增加; 重金属 Pb 能对作物中缬氨酸的产生起到阻碍作用, 从而使苯丙氨酸、苯丙氨酸和天冬氨酸的含量升高。谷胱甘肽是一种具有抗氧化能力的小分子肽,

由谷氨酸、甘氨酸以及半胱氨酸组成,能够提高植物镉耐性,在低浓度 Cd 胁迫下促进谷胱甘肽合成,高浓度镉对其抑制^[36]。重金属能够影响植物氨基酸代谢,研究表明,重金属 Cu、Zn 等交互作用下,植物中脯氨酸含量较高的生态型植株,重金属耐受性较高^[37]。重金属对作物的影响最常见的规律是低浓度促进,高浓度抑制,氨基酸类代谢物的受影响规律也与此规律存在一定的相似性,当然,这些规律都是在一定浓度下才成立。

2.2 重金属作用对作物糖类代谢的影响

糖代谢是整个作物代谢的中心环节,它不仅为作物的成长提供能量,还涉及核酸代谢、蛋白质代谢、次生物质代谢和脂类代谢等。此外,糖代谢与渗透压、信号转导和基因调控密切相关。重金作用可以刺激作物糖代谢的变化。研究表明糖类代谢可以提供碳源维持微生物的生长发育,造成作物根附近区域存在的微生物数量和活性远远高出不是根际周围环境。罗庆^[38]有研究表明,东南景天根系产生的分泌物中葡萄糖、麦芽糖、半乳糖等糖代谢产物随着 Pb 浓度的增加先增后减,或许是东南景天在低浓度时上述糖的分泌会增加,根系周围的 Pb 被激活,因此富集能力产生了变化。当 Pb 浓度到达一定浓度后,东南景天这些糖的分泌受到了影响,引发了东南景天在高含量 Pb 作用下的正常生长保护。糖代谢与氨基酸和有机酸的代谢有关,因此它会间接影响整个代谢系统。此外,可溶性糖在重金属胁迫下对作物的渗透调节、维持细胞膨大、保护细胞膜和蛋白质起着重要作用^[39]。重金属胁迫影响植物糖代谢平衡以及糖含量。据刘庆^[17]研究,鼠尾草、孔石莼以及叉枝藻的糖含量及糖代谢酶活性在低浓度铜胁迫下升高,在高浓度铜胁迫下降低,其中鼠尾草在铜胁迫下糖代谢相关参数较高,高浓度下降低程度较小,其对铜耐受性强。据高慧兵^[40]研究,重金属 Pb/Zn 交互作用使蓖麻糖代谢酶活性降低,可溶性糖含量均出现低促高抑的现象。重金属的胁迫能够引发作物的某些响应机制,这也是重金属对作物糖类代谢物产生影响的重要原因之一,其对糖代谢的影响程度也与作物重金属的耐受性相关。重金属含量过高,则作物的渗透压、信号转导和基因调控会发生变化,代谢系统紊乱,糖代谢也将受到影响。

2.3 重金属作用对作物有机酸类代谢的影响

在重金属作用下,作物根系分泌大量的丁二酸、苹果酸、柠檬酸、酒石酸、草酸等小分子量的有机酸,对根系重金属的吸收起到阻碍作用,与作物中存在的重金属发生反应,减少重金属的活性和危害。土壤 Cd 含量为 5 mg/kg 时,气相色谱-串联质谱法(gas chromatography-tandem mass spectrometry, GC-MS/MS)分析表明,菠菜和玉米幼苗中柠檬酸和苹果酸含量显著降低^[41]。曹晶晶^[42]研究表明柠檬酸、苹果酸能够利用三羧酸循环在作物线

粒体中合成,它们能够参与机酸体内三羧酸(tricarboxylic acid cycle, TAC)循环,属于金属配体。对作物重金属的生理代谢过程起到关键性作用,能够使离子型金属转化为螯合态以减弱其毒性,致使过量重金属对作物的毒害变小。郭山^[43]采用液相色谱-串联质谱法(liquid chromatography-tandem mass spectrometry, LC-MS/MS)对 Cd 胁迫下凤眼莲中的 7 种有机酸进行了鉴定,随重金属镉含量变化会引起苹果酸、柠檬酸含量的波动,且呈现反比例关系,但草酸的波动不会受太大的影响,或许是因为 Cd 作用能够对柠檬酸和苹果酸产生阻碍,相反可以促进草酸含量的升高。李连祯^[34]在检测和鉴定根系分泌物时发现,随着 Cd 含量的不断加大,分泌的草酸量先增加后减少,然后趋于稳定。ZHAO 等^[44]前期研究表明, Cu 处理下水杨酸是一种差异代谢物,其浓度分别远远高于对照组。有研究表明,在重金属作用下,作物根系会分泌有机酸,提高作物对 Cd 的承受力。在 Cd 的作用下,一些作物根部系统内柠檬酸及苹果酸的分泌量将会有较大升高。秦丽等^[45]研究表明,随着重金属元素 Cd 含量的升高、时间的延长,根系的有机酸分泌增加;侯晓龙^[46]发现 Pb 作用下,金丝桃的根、茎、叶可产生有机酸,与 Pb 螯合,降低 Pb 中毒。张利等^[47]发现,在自然环境中,杨梅的根不仅分泌草酸,而且在 Pb 作用下还分泌苹果酸、柠檬酸和酒石酸。伴随着 Pb 含量的升高,作物根系分泌苹果酸的含量也随之增加,其他有机酸先增加后减少。有机酸类代谢物和重金属的存在紧密联系,作物中的有机酸与重金属发生反应,能够减少重金属的活性和危害。当重金属含量一定时才可能分泌相当量的有机酸,若重金属含量太高则有机酸的分泌必将受到抑制。

2.4 重金属作用对作物次生代谢的影响

作物次生代谢产物类型较多、含量各异,结构差异较大,包括香豆素类、黄酮类、木脂素类、酚类、萜类、甾类、生物碱类、聚乙炔类、皂苷等,可分类归纳为酚类、萜类和含氮有机化合物类。在每一个类别中都有成千上万的已知化合物^[48]。虽然土壤是影响作物次生代谢产物的关键因素,但土壤重金属作用下影响作物次生代谢产物的研究却很少。有研究表明,添加 Cd 对土壤中青蒿素的合成和积累有明显的增加作用,在特定的 Cd 含量下,对青蒿素的合成和积累有促进作用。杜丽娜等^[49]研究表明,随着 Cd 含量的升高,环己酮、环己醇的含量却减少了,同时在 Cd 作用下,次生代谢产物相继出现,如戊二醛、甲基呋喃二酮、甲基乙胺硝基巴比妥等,由此得出 Cd 作用对作物根系某些物质的产生有阻碍作用,作物根系在 Cd 作用下产生一些新的物质,这些物质对作物生长的效应和机制有待进一步探索。

2.5 重金属作用对作物能量代谢的影响

重金属作用可以改变作物能量代谢,薛亮^[50]研究认为,高浓度重金属会影响作物光合作用,作物叶片中所含有的绿色将减少,大大降低了作物叶子的光合作用,阻碍了集胞藻的电子传递,减少氧气释放。据赵丽娟^[41]研究结果表明,在重金属 Cd 的作用下,作物的能量代谢发生了变化,乳酸含量大幅度增加,有机酸和氨基酸代谢异常,玉米能量代谢途径变化不大,但乳酸含量显著下降。作物的能量代谢在一定重金属浓度范围内将产生较大的波动,重金属的毒害作用对作物的能量代谢有直接影响。

2.6 重金属作用对作物其他代谢的影响

在重金属作用下的作物代谢组学研究中,存在着多种代谢物,除以上列举外,包括有机醇、胺等代谢物。李雪妹^[51]在重金属 Pb 作用下对有机醇在水稻幼苗体内的代谢进行了相关研究,发现有机醇在作物体中对多种代谢调节起到关键性作用,比如植酸对物质的合成有贮藏作用、促进种子脱水、作物细胞抗逆性的调节和作物生长素的调节等,还参与细胞壁的合成。与此同时,研究表明,Cd 作用下作物苗期会积累腐胺,有利于作物的生长,还能够增强作物的抗逆性。重金属作用对作物产生毒害,腐胺受到刺激后会做出抵抗。林立东^[52]有研究,高浓度 Cu 作用下会降低甘露醇含量,可能甘露醇作为羟自由基清除剂是一种可混溶的溶质,促进活性氧的清除,对氧化应激具有解毒作用,在低浓度 Cu 作用下,羊栖菜细胞的通透性与甘露醇的含量成正比。作物的代谢组学涵盖较广,现有的重金属对作物代谢的研究尚未覆盖完全,许多领域其影响规律需进一步明确。

3 作物重金属作用污染防治措施和建议

在农作物重金属作用污染防治中,要高效去除农作物体内的浓度较高的重金属,有效提高对农作物中重金属的含量控制能力,保证人们能吃到更安全的农作物产品;其次,通过改进现有的种植方式和栽培方式,提高土壤重金属治理的作物种植方式革新;最后,加大力度研究与创新植物修复技术,利用具有较强重金属富集能力的作物,提高对土壤中重金属的高效治理,以达到有效防治重金属交互污染的目的。具体措施如下:

(1)物理措施:主要方法有土壤放电法、水洗法、客土法等。

(2)化学措施:主要是利用碱性物质(碳酸钙、石灰)、有机物改变土壤的酸碱性,减弱其毒性危害,进一步减弱重金属对作物的毒害。

(3)生物措施:利用微生物、动物和植物积累和吸收重金属的生物修复。有些细菌在细胞壁上带有负电荷,表现

出负离子的特性,它们能使重金属化合物富集,蚯蚓也能富集重金属。

(4)作物修复技术:利用重金属超积累植物修复重金属污染土壤取决于作物对重金属的积累能力。目前,人们对硒、汞、镉、锌等重金属元素的研究在转基因植物方面取得了很大的进展。

(5)电化修复技术:电化学修复法的本质是将一个石墨电极插入浸水的复合污染了的土壤内,注入的直流电不能太高。主要通过电场的作用,金属离子能够在电极的周围区域中移动和聚集,从而去除重金属。

(6)研究污染土壤中的重金属在空间分布和变化规律,阐明重金属在不同地区和不同土壤类型中的迁移规律。

(7)为了对不同类型的重金属污染提供预警数据,从生理水平阐明重金属的毒性机制,明确不同重金属的临界值和控制标准。

(8)应加强对土壤-作物-人类食物链过程中重金属的转化规律、毒性机制和模式的研究,明确不同重金属对不同作物的影响机制和差异,并在此基础上制定不同作物的食用标准。

(9)适宜的种植方式可以充分利用环境资源,减少作物病害的危害,改善土壤理化性质,从而提高单位面积产量,进而影响作物对重金属的吸收。例如,一些草本或超积累植物与作物间作或轮作,以减少作物对重金属的吸收。

(10)施肥可以为作物生长提供必需元素,从而促进作物生长,进而影响作物对重金属的吸收。

4 结束语

我国现阶段大约有近 20%的土地已经遭受到了严重的重金属污染^[53]。重金属对作物有较大的伤害,它不仅影响着作物的正常生长发育、产量和品质,浓度较高时甚至可以直接导致作物植株死亡,这不但对作物产量的提高,亦阻碍作物品质的提高。作物行业的重金属安全性已经成为研究的重点之一,作物重金属问题急需得到解决。

作物累积重金属的含量与土壤理化性质密切相关。作物轮播模式能有效降低土壤重金属的污染,虽然治理效果有一定局限性,但也能在一定程度上降低作物中重金属 Cd、Pb 的含量,从而使农作物的生产品质有所改观,促使其产量有所上升。作物在重金属作用下的代谢反应是多元化的,现有的研究主要包括有机酸、氨基酸、多元醇、糖等代谢物。更多的代谢物对作物整体代谢产生影响还需做更多的探索。目前对应激反应中多种复杂代谢机制的认识还远远不够。因此,王佳钰等^[54]认为应将作物生长的生理指标与代谢组学相结合,开展更多作物品种对逆境的代谢组学研究,将代谢组学与基因组学、蛋白质组学、转录组学等组学相结合,建立起基因与代谢物之间的架构,探索作物更多的代谢规律,对作物逆境的代谢规律和响应机制

进行全面、系统的研究,有助于提高作物的抗逆性和生产力。相信随着作物研究的深入、科学技术的发展,在作物重金属作用下的响应领域代谢组学技术将起到关键性作用。

参考文献

- [1] 孔明,朱延忠,韩天伦,等. 焦岗湖沉积物-水界面重金属元素的相互作用[J]. 环境污染, 2021, 1: 286.
KONG M, ZHU YZ, HAN TL, *et al.* Interactions of heavy metal elements across sediment-water interface in lake Jiaogang [J]. Environ Poll, 2021, 1: 286.
- [2] 程军. 土壤中重金属的危害及防治措施[J]. 经济研究导刊, 2014, (31): 300-301.
CHENG J. Hazards of heavy metals in soil and prevention and control measures [J]. Econ Res Guid, 2014, (31): 300-301.
- [3] 黎森,王敦球,于焕云. 铅-砷交互作用影响小白菜生长及铅砷积累的效应研究[J]. 生态环境学报, 2019, 28(1): 170-180.
LI S, WANG DQ, YU HY. Effects of lead arsenic interaction on growth and accumulation of lead and arsenic in Pakchoi [J]. Acta Ecol Sinica, 2019, 28(1): 170-180.
- [4] ELBASIOUNY H, DARWESH M, ELBELTAGY H, *et al.* Ecofriendly remediation technologies for wastewater contaminated with heavy metals with special focus on using water hyacinth and black tea wastes: A review [J]. Environ Monit Assess, 2021, 193(7): 1-5.
- [5] 秦旭芝,罗志祥,季文兵,等. 桂西北地质高背景区有色金属冶炼对周边土壤重金属污染与生态风险评价[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2324-2333.
QIN XZ, LUO ZX, JI WB, *et al.* Heavy metal pollution and ecological risk assessment of non-ferrous metal smelting on surrounding soil in high geological background area of northwest Guangxi [J]. J Ecol, 2021, 40(8): 2324-2333.
- [6] ROUPHAEL Y, COLLA G, BERNARDO L, *et al.* Zinc excess triggered polyamines accumulation in lettuce root metabolome, as compared to osmotic stress under high salinity [J]. Front Plant Sci, 2016, 7: 842.
- [7] 胡立群. 作物非生物胁迫代谢组学研究进展[J]. 作物研究, 2014, (7): 428-434.
HU LQ. Advances in metabonomics of abiotic stress in crops [J]. Crop Res, 2014, (7): 428-434.
- [8] JIANG D, YAN S. Effects of Cd, Zn or Pb stress in populus alba berolinensis on the development and reproduction of *Lymantria dispar* [J]. Ecotoxicology, 2017, 26(10): 1305-1313.
- [9] ZHAO L, HUANG Y, HU J, *et al.* (1)HNMR and GCMS based metabolomics reveal defense and detoxification mechanism of cucumber plant under nano-custress [J]. Environ Sci Technol, 2016, 50(4): 2000-2010.
- [10] PIDATALA VR, LI K, SARKAR D, *et al.* Comparative metabolic profiling of vetiver (*Chrysopogon zizanioides*) and maize (zea mays) under lead stress [J]. Chemosphere, 2018, 193: 903-911.
- [11] 李启彪,李路,胡承孝,等. 冬小麦对过量钼胁迫的代谢响应与耐钼机制[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 54-61.
LI QB, LI L, HU CX, *et al.* Metabolic response and molybdenum tolerance mechanism of winter wheat to excessive molybdenum stress [J]. J Huazhong Agric Univ, 2021, 40(5): 54-61.
- [12] 杨志明,李志强,张玉秀,等. 硅在重金属、矿物质和盐分胁迫下的发生、吸收、转运及其机制研究进展[J]. 环境管理杂志, 2016, 183(3): 521-529.
YANG ZM, LI ZQ, ZHANG YX, *et al.* Research progress on the occurrence, absorption, transport and mechanism of silicon under heavy metal, mineral and salt stress [J]. J Environ Manage, 2016, 183(3): 521-529.
- [13] 杨龙. 重金属 Cd、Zn 胁迫对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 兰州: 兰州大学, 2015.
YANG L. Effects of heavy metal Cd and Zn stress on alfalfa seed germination and seedling growth [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2015.
- [14] 郭振. 镉、砷单一污染对作物种子萌发的毒害效应[J]. 绿色科技, 2019, (6): 123-125.
GUO Z. Toxic effects of cadmium and arsenic on crop seed germination [J]. Green Sci Technol, 2019, (6): 123-125.
- [15] 徐芬芬,袁盼,邹阿凤. 重金属铅胁迫对小白菜种子萌发的影响[J]. 湖南农业科学, 2011, (9): 68-69, 74.
XU FF, YUAN P, ZOU AF. Effects of heavy metal lead stress on seed germination of pakchoi [J]. Hunan Agric Sci, 2011, (9): 68-69, 74.
- [16] 秦华,贺前峰,刘代欢,等. 重金属铅镉对甜高粱生长的影响及其积累特性研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(13): 119-125.
QIN H, HE QF, LIU DH, *et al.* Effects of heavy metal lead and cadmium on growth and accumulation characteristics of sweet sorghum [J]. Chin Agron Bul, 2018, 34(13): 119-125.
- [17] 刘庆. 3 种潮间带大型海藻对重金属铜胁迫的生理生化响应[D]. 烟台: 烟台大学, 2019.
LIU Q. Physiological and biochemical responses of three intertidal macroalgae to copper stress [D]. Yantai: Yantai University, 2019.
- [18] 洪涛,孔祥胜,岳祥飞. 贵州丹寨县土壤-水稻中硒和重金属的积累及迁移特征[J/OL]. 地球与环境: 1-8. [2021-11-03]. <https://doi.org/10.14050/j.cnki.1672-9250.2021.49.072>
HONG T, KONG XS, YUE XF. Accumulation and migration characteristics of selenium and heavy metals in soil rice in Danzhai county, Guizhou province [J/OL]. Earth Environ: 1-8. [2021-11-03]. <https://doi.org/10.14050/j.cnki.1672-9250.2021.49.072>
- [19] 范中亮,杨菲,吴琦,等. 不同土壤类型下重金属 Cd 对水稻剑叶光合特性和产量构成的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1021-1026.
FAN ZL, YANG F, WU Q, *et al.* Effects of heavy metal Cd on photosynthetic characteristics and yield components of flag leaf in rice under different soil types [J]. Acta Agric Environ Sci, 2010, 29(6): 1021-1026.
- [20] 聂胜委,黄绍敏,张水清,等. 不同种类重金属胁迫对两种小麦产量及构成因素的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 455-463.
NIE SW, HUANG SM, ZHANG SQ, *et al.* Effects of different kinds of heavy metal stress on yield and components of two kinds of wheat [J]. J Agric Environ Sci, 2012, 31(3): 455-463.
- [21] 吴晓月,季晓敏,高丽敏,等. 土壤水分及镉浓度对甜高粱生长及镉吸收和转运的影响[J]. 草学, 2021, (3): 12-20, 44.
WU XY, JI XM, GAO LM, *et al.* Effects of soil moisture and cadmium concentration on growth, cadmium uptake and translocation of sweet sorghum [J]. Caotechnology, 2021, (3): 12-20, 44.
- [22] 张晶,王姣爱,党建友,等. 重金属 Cu、Zn 污染对小麦旗叶生理及产量的影响[J]. 中国农学通报, 2015, 31(11): 229-233.

- ZHANG J, WANG JAI, DANG JY, *et al.* Effects of heavy metal Cu and Zn pollution on flag leaf physiology and yield of wheat [J]. China Agron Bull, 2015, 31(11): 229–233.
- [23] 肖雪, 李宗艳, 马长乐, 等. 镉胁迫对双腺藤幼苗生长及生理特性的影响[J]. 西部林业科学, 2021, 50(3): 118–123.
- XIAO X, LI ZY, MA CL, *et al.* Effects of cadmium stress on growth and physiological characteristics of *Sinocalamus bipinnata* seedlings [J]. Western Fore Sci, 2021, 50(3): 118–123.
- [24] 邓思涵, 陈聪颖, 严冬, 等. 水稻重金属污染及其阻控技术研究[J]. 中国稻米, 2019, 25(4): 27–30.
- DENG SH, CHEN CY, YAN D, *et al.* Heavy metal pollution in rice and its control technology [J]. Chin Rice, 2019, 25(4): 27–30.
- [25] 李晓梅, 冯廷显, 王科举, 等. 不同施肥措施对重金属污染农田土壤-水稻重金属含量的影响[J]. 农业工程, 2019, (2): 49–52.
- LI XM, FENG TX, WANG KJ, *et al.* Effect of different fertilization measures on heavy metal content in paddy soil polluted by heavy metals [J]. Agric Eng, 2019, (2): 49–52.
- [26] 傅湘绮, 刘亚宾, 杨海君, 等. 水稻品种联合其他修复方式对耕地及稻米中重金属含量的影响与评价[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 307–315.
- FU XQ, LIU YB, YANG HJ, *et al.* Effect and evaluation of rice varieties combined with other restoration methods on heavy metal content in cultivated land and rice [J]. Jiangsu Agric Sci, 2019, 47(19): 307–315.
- [27] 罗成科, 田蕾, 毕江涛, 等. 种稻年限对盐碱土微量元素及水稻产量和品质的影响[J]. 生态环境学报, 2019, (8): 1577–1584.
- LUO CK, TIAN L, BI JT, *et al.* Effects of rice planting years on trace elements in saline alkali soil and rice yield and quality [J]. Acta Ecol Sin, 2019, (8): 1577–1584.
- [28] 王成, 季峻峰, 李天元, 等. 利用同位素方法研究 Pb 在土壤不同深度不同物种之间迁移的地球化学活性[A]. 农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会. 农业环境与生态安全——第五届全国农业环境科学学术研讨会论文集[C]. 农业部环境保护科研监测所、中国农业生态环境保护协会: 中国农业生态环境保护协会, 2013.
- WANG C, JI JF, LI TY, *et al.* Study on the geochemical activity of Pb migration between different species at different depths of soil by isotope method [A]. Institute of environmental protection research and monitoring of the Ministry of agriculture and China Agricultural Ecological Environment Protection Association. Agricultural environment and ecological security - Proceedings of the Fifth National Symposium on Agricultural Environmental Science [C]. Institute of environmental Protection Research and Monitoring of the Ministry of agriculture China Agricultural Ecological Environment Protection Association: China Agricultural Ecological Environment Protection Association, 2013.
- [29] 梁艳茹. 不同价态铬对土壤生物化学活性影响的研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2010.
- LIANG YR. Effects of different valence chromium on soil biochemical activity [D]. Xianyang: Northwest University of Agriculture and Forestry Science and Technology, 2010.
- [30] 姜伟. 重庆主城降尘中六种金属及其化学形态研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
- JIANG W. Study on six metals and their chemical forms in dustfall in the main city of Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [31] 潘逸. 水稻—小麦轮作农地中不同施肥处理对土壤水溶性有机物及铜镉活性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2006.
- PAN Y. Effects of different fertilization treatments on soil water-soluble organic matter and copper and cadmium activities in rice wheat rotation farmland [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006.
- [32] CHATTERJEE J, CHATTERJEE C. Phytotoxicity of cobalt, chromium and copper in cauliflower [J]. Environ Poll, 2000, 109(1): 69–74.
- [33] 吕佳莉. 镉与污水复合胁迫对玉米幼苗代谢物的 GC-MS 研究[D]. 太原: 山西大学, 2016.
- LV JL. GC-MS study on metabolites of maize seedlings under combined stress of cadmium and sewage [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016.
- [34] 李连祯, 尹娜, 骆永明. 非损伤微测技术及其在重金属生态毒理效应研究中的应用[A]. 中国土壤学会土壤环境专业委员会. 中国土壤学会土壤环境专业委员会第十九次会议暨“农田土壤污染与修复研讨会”第二届山东省土壤污染防治与修复技术研讨会摘要集[C]. 中国土壤学会土壤环境专业委员会: 中国土壤学会土壤环境专业委员会, 2017.
- LI LZ, YIN N, LUO YM. Non invasive micro measurement technology and its application in the study of ecotoxicological effects of heavy metals [A]. Soil environment professional committee of Chinese soil society. The 19th meeting of soil environment professional committee of Chinese Soil Society and the 2nd Symposium on soil pollution control and remediation technology in Shandong Province [C]. Soil Environment Professional Committee of Chinese Soil Society Professional Committee: Soil Environment Professional Committee of Soil Society of China, 2017.
- [35] BOTTINI E, FESTA MR. Asparagine as a ligand for cadmium (II), lead (II) and zinc (II) [Z].
- [36] 范旭杪, 秦丽, 王吉秀, 等. 植物谷胱甘肽代谢与镉耐性研究进展[J]. 西部林业科学, 2019, 48(4): 50–56.
- FAN XM, QIN L, WANG JX, *et al.* Research progress of glutathione metabolism and cadmium tolerance in plants [J]. West Fore Sci, 2019, 48(4): 50–56.
- [37] 徐超. 脯氨酸与重金属耐性和富集的研究进展[J]. 中国资源综合利用, 2018, 375(2): 80–83.
- XU C. Research progress of proline and heavy metal tolerance and enrichment [J]. Comp Utiliz Res Chin, 2018, 375(2): 80–83.
- [38] 罗庆. 镉、铅胁迫下东南景天根系分泌物的代谢组学研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.
- LUO Q. Metabonomics of sedum alfredii root exudates under cadmium and lead stress [D]. Shenyang: Northeast University, 2016.
- [39] MADDEN TD, BALLY MB, HOPE MJ, *et al.* Protection of large unilamellar vesicles by trehalose during dehydration: Retention of vesicle contents [J]. Biochim Biophys Acta, 1985, 817(1): 1–5.
- [40] 高慧兵. 铅锌胁迫对蓖麻开花生理的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2019.
- GAO HB. Effect of lead and zinc stress on flowering physiology of castor [D]. Changsha: Central South University of Forestry Science and Technology, 2019.
- [41] 赵丽娟. 代谢组学技术研究氯磺隆和镉对玉米幼苗和菠菜代谢的影响[D]. 太原: 山西大学, 2016.
- ZHAO LJ. Metabonomics study on the effects of chlorsulfuron and cadmium on the metabolism of maize seedlings and spinach [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2016.
- [42] 曹晶晶. 高分辨质谱在植物代谢物分析中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

- CAO JJ. Application of high resolution mass spectrometry in the analysis of plant metabolites [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017.
- [43] 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.
- GUO S. Effects of Cd stress on root secretion and metabolism of small molecule organic matter in *Eichhornia crassipes* [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2018.
- [44] ZHAO LJ, HUANG YX, HU J, *et al.* ^1H NMR and GC-MS based metabolomics reveal defense and detoxification mechanism of cucumber plant under Nano-Cu stress [J]. *Environ Sci Technol*, 2016, 50(4): 12.
- [45] 秦丽, 李元, 祖艳群, 等. 镉胁迫对续断菊 *Sonchus asper* L. Hill. 根系分泌物的影响[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(3): 540–544.
- QIN L, LI Y, ZU YQ, *et al.* Effects of cadmium stress on root exudates of *Dipsacus asper* L. Hill. [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, 21(3): 540–544.
- [46] 侯晓龙. 铅超富集作物金丝草对 Pb 胁迫的响应机制研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2013.
- HOU XL. Study on the response mechanism of *Hypericum roxburghii* to Pb stress [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2013.
- [47] 张利, 何新华, 陈虎, 等. 铅胁迫下杨梅根系分泌有机酸的研究[J]. *浙江林学院学报*, 2019, 26(5): 663–666.
- ZHANG L, HE XH, CHEN H, *et al.* Study on organic acids secreted by *Myrica rubra* roots under lead stress [J]. *J Zhejiang Fore Univ*, 2019, 26(5): 663–666.
- [48] 许光利. 稻米脂类对品质的影响及脂类代谢对高温弱光的响应[D]. 雅安: 四川农业大学, 2017.
- XU GL. Effect of lipids on rice quality and response of lipid metabolism to high temperature and low light [D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2017.
- [49] 杜丽娜, 张存莉, 朱玮, 等. 作物次生代谢合成途径及生物学意义[J]. *西北林学学报*, 2005, 20(3): 150–155.
- DU LN, ZHANG CL, ZHU W, *et al.* Biosynthesis pathway of secondary metabolism in crops and its biological significance [J]. *J Northwest Forest*, 2005, 20(3): 150–155.
- [50] 薛亮. 镉矿区作物重金属积累特征及其耐镉机理研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2013.
- XUE L. Heavy metal accumulation characteristics and antimony tolerance mechanism of crops in antimony mining area [D]. Beijing: China Academy of Forestry Sciences, 2013.
- [51] 李雪妹. 基于代谢组学解析内生菌对 Pb 胁迫水稻的缓解作用[D]. 沈阳: 沈阳师范大学, 2018.
- LI XM. Analysis of the alleviating effect of endophytes on Pb stressed rice based on metabonomics [D]. Shenyang: Shenyang Normal University, 2018.
- [52] 林立东. 羊栖菜对重金属铜的吸附及生理响应[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
- LIN LD. Adsorption and physiological response of *Sargassum fusiforme* to copper [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014.
- [53] 刘佳麟, 张家铜. 土壤重金属污染的现状及其治理[J]. *山东工业技术*, 2019, (7): 229.
- LIU JL, ZHANG JT. Current situation and treatment of heavy metal pollution in soil [J]. *Shandong Ind Technol*, 2019, (7): 229.
- [54] 王佳钰, 李萌, 宋晓卉, 等. 代谢组学在植物重金属胁迫研究中的应用[J]. *生物化工*, 2020, 6(2): 128–132.
- WANG JY, LI M, SONG XH, *et al.* Application of metabonomics in the study of heavy metal stress in plants [J]. *Biochemistry*, 2020, 6(2): 128–132.

(责任编辑: 于梦娇 张晓寒)

作者简介



杨小俊, 研究实习员, 主要研究方向为农畜产品品质检测。
E-mail: 956892326@qq.com