

砷镉胁迫对饲用桑叶品质及安全利用的影响研究综述

韦兰新, 梁玉婷, 莫奇香, 钟云企, 何世杰, 覃勇荣*

河池学院化学与生物工程学院, 广西 河池

收稿日期: 2025年3月24日; 录用日期: 2025年4月29日; 发布日期: 2025年5月22日

摘要

为了说明重金属砷、镉单一或复合胁迫对饲用桑叶品质及安全利用的影响, 助力乡村振兴和蚕桑产业发展, 作者通过查阅文献资料和实验研究, 结果发现, 不同浓度的重金属离子(如砷、镉等)对桑树种子萌发和幼苗生长有不同影响, 低浓度的重金属离子对桑树种子萌发和幼苗生长可能有一定的促进作用, 但是高浓度的重金属离子则有较明显的抑制作用; 桑树对重金属具有一定的富集能力和较强的耐受能力, 可用于土壤重金属污染的植物修复。然而, 关于多种重金属复合胁迫对桑树影响的研究相对较少, 重金属镉、砷单一或复合胁迫对桑树影响的研究文献报道不多。为此, 笔者认为, 未来应加强多种重金属复合胁迫对桑树影响的研究, 探索重金属胁迫下桑树的分子响应机制, 并开展重金属污染土壤的综合治理和修复, 以促进蚕桑产业的可持续发展。

关键词

桂西北, 有色金属矿区, 重金属污染, 蚕桑产业, 饲用桑叶, 安全利用

A Review of the Effects of Arsenic and Cadmium Stress on the Quality and Safe Utilization of Mulberry Leaves for Feed

Lanxin Wei, Yuting Liang, Qixiang Mo, Yunqi Zhong, Shijie He, Yongrong Qin*

School of Chemistry and Biological Engineering, Hechi University, Hechi Guangxi

Received: Mar. 24th, 2025; accepted: Apr. 29th, 2025; published: May 22nd, 2025

*通讯作者。

文章引用: 韦兰新, 梁玉婷, 莫奇香, 钟云企, 何世杰, 覃勇荣. 砷镉胁迫对饲用桑叶品质及安全利用的影响研究综述[J]. 可持续发展, 2025, 15(5): 260-269. DOI: 10.12677/sd.2025.155144

Abstract

In order to illustrate the effects of single or combined stress of heavy metals arsenic and cadmium on the quality and safe utilization of mulberry leaves for feeding, and to assist in rural revitalization and the development of sericulture industry, the author found through literature review and experimental research that different concentrations of heavy metal ions (such as arsenic, cadmium, etc.) have different effects on mulberry seed germination and seedling growth. Low concentrations of heavy metal ions may have a certain promoting effect on mulberry seed germination and seedling growth, but high concentrations of heavy metal ions have a more significant inhibitory effect; Mulberry trees have a certain ability to accumulate heavy metals and strong tolerance, which can be used for plant remediation of soil heavy metal pollution. However, there is relatively little research on the effects of multiple heavy metal combined stress on mulberry trees, and there are few literature reports on the effects of single or combined stress of heavy metals such as cadmium and arsenic on mulberry trees. Therefore, the author believes that in the future, research on the effects of multiple heavy metal combined stress on mulberry trees should be strengthened, the molecular response mechanism of mulberry trees under heavy metal stress should be explored, and comprehensive treatment and remediation of heavy metal polluted soil should be carried out to promote the sustainable development of the sericulture industry.

Keywords

Northwest Guangxi, Nonferrous Metal Mining Area, Heavy Metal Pollution, Sericulture Industry, Mulberry Leaves for Feed, Safe Utilization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

桑树是一种重要的经济作物，种桑养蚕已成为当地农民增收致富的重要途径。随着东桑西移和我国农业产业结构的调整，桂西北已成为我国桑树种植面积最大的地区之一，为当地经济发展发挥了积极的作用。

桂西北是我国著名的有色金属之乡，矿业生产和金属冶炼曾是当地经济的重要支柱，过去由于诸多原因，重金属污染问题比较突出，矿区周边桑园不可避免受到重金属污染的影响。重金属(如砷、镉等)在土壤中难以降解，一旦被植物吸收，就会通过食物链传递到人体，对人类健康构成潜在威胁。桑叶是桑蚕的主要食物来源，大气、灌溉用水及桑园土壤受到重金属污染之后，对桑树的生长和饲用桑叶品质必定会产生不良的影响。所以，研究重金属胁迫对饲用桑叶品质及安全利用的影响，不仅可以降低重金属污染的生态风险，而且对蚕桑产业可持续发展、维护人类健康也具有积极的意义。

关于重金属胁迫对桑树生长发育的影响，国内外学者已开展了一些研究。结果发现，重金属胁迫对桑树种子萌发和幼苗生长的影响，具有“低促高抑”效应，即低浓度重金属可能有促进作用，而高浓度重金属则有抑制作用。桑树对重金属具有较强的耐受能力和一定的富集能力，可用于土壤重金属污染的植物修复。然而，关于多种重金属复合胁迫对桑树生长发育影响的研究相对较少，关于镉、砷单一或复合胁迫对桑树生长影响的相关研究文献报道不多。

本文旨在综述重金属胁迫对饲用桑叶品质及安全利用的影响,通过深入分析现有的研究成果,总结重金属胁迫背景下桑树的响应机制,为重金属污染土壤的治理和蚕桑产业可持续发展提供科学依据。同时,展望未来的研究方向,包括加强多种重金属复合胁迫对桑树影响的研究,探讨重金属胁迫下桑树的分子响应机制,开展重金属污染土壤的综合治理和修复等,为推动桂西北地区蚕桑产业健康发展贡献力量。

2. 国内研究现状

2.1. 不良环境因子对桑树种子萌发和幼苗生长的影响

桑树种子具有较强的耐盐性。实验研究结果表明,低浓度的盐分胁迫对桑树种子萌发具有一定的促进作用,而高浓度盐分胁迫,则对桑树种子萌发具有抑制作用,抑制作用的强度与 NaCl 浓度呈正相关,即随着 NaCl 浓度的增加,对桑树种子萌发的抑制指数也随之增大,这表明在高盐的环境中,桑树种子萌发受到的负面影响会更加显著[1]。在桑树种子萌发时期,镉、铅、砷等重金属元素对种子萌发具有抑制作用[2]-[4],影响桑树幼苗的早期生长和发育,但低浓度的镉和铅胁迫,桑树种子萌发并未表现出明显的负面效应[5]。

2.2. 桑树的食用和药用价值开发利用

我国栽培桑树历史悠久,广泛种植于全国各地。桑树具有极大的开发利用价值和开发潜力,不仅是重要的农业资源[6],而且是重要的药用植物资源[7]。桑树的叶子可以用来喂养家蚕,而蚕丝是制作丝绸的重要原料。此外,桑树的果实(桑葚),不仅味道甜美,而且含有丰富的营养成分,既可以食用,也可以用于制作果酱、酒等食品;桑树的不同部位均可入药,桑叶清热解毒,具有降血糖的效果,桑枝可以用于治疗风湿病,桑白皮具有利尿消肿的功效等。所以桑树药用功能的挖掘,对维护人体健康具有重要的作用。

2.3. 桑树在环境修复和治理中的应用

2.3.1. 桑树对重金属胁迫的耐受性和富集能力

桑树根系发达,不仅对环境具有较强的适应能力,而且对重金属胁迫具有一定的耐受性。相关研究结果证实,当桑树苗暴露在含有镉和铅的环境中时,其生长指标,包括株高、节距以及最大叶幅,都会随着这些重金属处理浓度的增加而出现下降的趋势[8]。然而,也有一些实验结果表明,在锌胁迫及锌和铅复合胁迫条件下,桑树幼苗的生物量呈增长的态势[9],可能与处理的浓度及处理方式有关。

桑树对重金属离子具有较强的富集能力,是一种修复重金属污染土壤的优质植物资源。在单一的重金属镉胁迫下,当土壤镉浓度不超过 160 mg/kg 时,桑树对土壤镉污染有一定的耐性,其耐性指数 > 0.8,且桑叶中的叶绿素、可溶性糖含量变化不明显;但在较高浓度的镉胁迫下,桑叶的叶绿素合成受到抑制[10]。另外的研究发现,栽培在含有适宜浓度硒的土壤中的桑树,其桑叶中的可溶性糖、总蛋白、总氨基酸等化学物质含量显著上升,且土壤中硒含量越高,其吸收富集量越大。在重金属胁迫背景下,复合胁迫一般比单一胁迫的影响要大,如在重金属镉、铅复合胁迫情况下,复合胁迫对桑树的总叶绿素、丙二醛(MDA)、过氧化氢酶(CAT)及超氧化物歧化酶(SOD)含量变化的影响显著大于单一胁迫[11]。

桑树对土壤中一定浓度的重金属具有较强的耐受能力和富集能力,即使是土壤中铅的含量达到 734 mg/kg、锌含量达到 1194 mg/kg、镉含量达到 53 mg/kg,其外观也没有表现出明显的受害症状[12],可能与其解毒机制有关。

2.3.2. 桑树在土壤重金属污染修复中的作用

在土壤重金属污染的修复和治理中,植物修复是当前比较常用和值得推广的技术。桑树作为环境污

染治理的优良树种，可广泛用于各种环境污染治理的工程实践中。研究发现，桑树对 Zn、Cd、Hg 具有较强的运转能力，对 Ni、Zn、Cd、Hg 具有较强的修复潜力，可在土壤重金属污染修复治理中发挥重要作用。相关实验研究结果表明，桑树对去除和修复土壤中的 Cd 和 Pb 效果良好，修复指数分别达到 96.87% 和 81.93% [13]，不仅能在重金属污染严重的土壤中生长，而且没有在外观上表现出明显的受害症状。因此，在重金属污染的土壤中栽桑养蚕，不仅能获得较好的经济效益，而且能够获得良好的生态效益。

研究者在研究桑树对镉胁迫响应的分子机制中，鉴定出了一系列关键基因，这些基因在桑树吸收、转运和解毒 Cd 的过程中扮演着重要角色。这些基因包括 ZIP、NRAMP、HMA 和 MTP 家族成员以及 PCS 基因。通过在酵母和烟草中的异源表达试验，研究者验证了这些基因的功能特性。进一步的转录组和代谢组分析，揭示了镉胁迫对细胞壁组织相关基因以及苯丙素和类黄酮生物合成途径的显著影响。研究还发现，在高 Cd 积累桑树品种丰驰中，相关代谢物的变化更为显著，而在低 Cd 积累品种桂桑优 12 中，变化则相对较小 [14]。

2.3.3. 桑树在石漠化治理中的应用

石漠化地区面临生态环境恶劣和植被恢复困难的双重挑战。而桑树作为生态修复的优选植物种质资源，具有良好的生态治理价值。桑树发达的根系能够深入土壤，有效固定土壤，防止水土流失；桑树茂密的冠层结构可以高效地截留雨水，减少雨水对地表的直接冲刷，而且桑树具有较强的适应能力，可以在贫瘠的石漠化土壤中正常生长。

相关实验研究结果表明，在石漠化区域种植桑树后，土壤侵蚀明显减少，土壤肥力逐渐提高 [15]。此外，桑树还具有较高的经济效益，其叶片可用于养蚕，其果实桑葚可食用或加工其他营养食品，可为当地群众带来一定的经济收益，提高他们参与石漠化治理的积极性 [16]。

2.3.4. 桑树在消落带生态环境保护的应用

在生态修复领域，桑树在消落带水土保持方面的作用逐渐受到关注。所谓消落带是指河流、湖泊、水库等季节性水位涨落而导致周边被淹没土地周期性出露于水面的区域，该区域的生态环境脆弱且复杂。

桑树的生物学特性使其十分适合在消落带生长。首先，桑树的根系发达，能够深入土壤，有效固土护坡，防止消落带因水位变化而导致水土流失 [17]；其次，桑树对多种重金属具有一定的耐性和富集能力 [18]，这一特性使其在受污染的消落带区域，能够通过根系吸收土壤中的重金属，从而对土壤起到一定的净化作用，有利于消落带土壤质量的改善；此外，桑树还具有较高的经济价值，在消落带种植桑树，可以利用其叶片发展养蚕业，提高当地居民收入，同时，桑树果实可以用于食品加工，进一步延伸产业链。从生态景观角度来说，成片的桑树在消落带形成独特的植被景观，丰富了消落带区域的生物多样性。

简而言之，桑树在消落带生态环境保护中的应用，不仅能够达到生态修复的目的，还能够获得较好的经济效益，是一种非常有潜力的消落带生态治理和开发利用的植物资源，以后还应进一步深入研究桑树在不同类型消落带的最佳种植模式与管理方法，使其充分发挥生态经济效益。

2.4. 饲用桑叶的品质及安全利用

饲料桑的蛋白质含量高、氨基酸种类丰富、纤维素含量低，富含多种生理活性物质，是一种多年生的饲料植物资源。桑叶是一种高蛋白的多功能饲料资源，通过科学配比和加工处理，可以显著提升畜禽产品的品质，降低养殖成本，并且兼具经济与生态效益，在绿色养殖中的潜力巨大 [19][20]。饲用桑叶作为蚕的主要饲料，其中的微量元素会影响蚕的健康。研究者对广西蚕蛹中的砷、汞、硒、镉含量的测定发现，部分蚕蛹样品中的 As 和 Se 含量超标，其中矿区附近的样品超标比较严重，建议在工矿区周边发展桑蚕产业时，一定要注意规避环境风险，并且对蚕蛹中的重金属进行无害化处理 [21]。广西宜州桑叶的

蛋白质含量较高,粗蛋白平均含量约为其鲜重的 19.2%,是一种极具开发潜力的禽畜饲料和食物资源。硒是人和动物生命活动中必需的微量元素,桑叶中的硒含量高于其他植物,因此,桑叶的富硒特性使其具有很高的开发利用价值,应该合理地加以利用,充分发挥其经济社会效益[22]。

研究者在桑树幼苗的转录组中,成功分离出 39,758 个非冗余转录本,发现 15,882 个基因在 Cd 胁迫下经历了差异性调控。这些差异表达的基因,参与了众多代谢过程、生物合成以及对非生物胁迫的响应。通过 KEGG 富集分析,进一步明确了这些基因在谷胱甘肽代谢、次生代谢、光合作用、能量代谢和 DNA 复制等关键代谢途径中的功能。这些发现,不仅扩展了我们对多个转录因子家族在植物应对 Cd 胁迫中作用的认识,而且为深入研究桑树对 Cd 胁迫反应的分子机制提供了宝贵的数据[23]。

研究者曾对桂西北某矿区周边受重金属污染的桑园进行比较深入的调查研究,结果发现,桑树不仅能在 Pb、Zn 和 As 含量分别高达 734 mg/kg、1194 mg/kg 和 53 mg/kg 的桑园土壤中生长,而且没有在外观上表现出明显的受害症状,采集土壤受到重金属污染的桑园生产的桑叶喂养家蚕,其蚕丝的重金属含量均在国家质量标准的限值之内,蚕粪及蚕蛹的重金属含量,也在国家颁布的相关质量标准限值范围[24],说明该区域生产的饲用桑叶可以安全利用。

3. 国外研究进展

3.1. 桑树在生态修复与环境保护中的应用

国外对桑树在环保方面的应用研究,主要集中在土壤修复、水体净化、大气净化和废弃物综合利用等方面。重金属因其毒性、不可降解性及生物蓄积性,已成为全球范围内最为严峻的环境问题之一。这些问题不仅对自然生态系统产生了深远的影响,同时也对人类健康构成了重大威胁[25]。诸如铅、汞、镉等重金属,一旦释放到环境中,便难以通过自然分解过程消除,它们在水体、土壤及大气中长期存在,并通过食物链的累积效应,最终对人类及其他生物的健康产生影响。被重金属污染的桑树,其果实(桑葚)中均含有重金属,并且浓度远远大于国际允许限值[26]。桑树对土壤重金属具有较强的抗性,即便在遭受较严重的铅[27]、镉[28]等单一重金属胁迫的环境中,仍能维持一定的生物量。桑树的这一特性使其成为研究土壤修复及重金属耐受性机制的重要材料。随着工业的快速发展,工业废水的排放越来越多,但是重金属的吸附剂比较昂贵,如能从植物或农业生产废弃物中提取低成本的吸附剂替代昂贵的传统吸附剂,无疑会大大降低环境治理的成本,并具有良好的推广价值。据相关文献报道,桑叶粉可以吸附工业废水中的各种金属离子,但桑叶粉末对金属离子的吸附效果,受到各种吸附条件的影响[29]。

3.2. 桑树的药用价值研究

国外学者对桑树药用价值的研究取得了不少成果,其相关研究主要集中在桑树的枝皮、果实及桑叶的提取物方面。其中,从桑树枝皮和根皮的化学成分分析中,共鉴定出 40 种化合物,并且从桑树枝皮的乙酸乙酯提取物中分离出 8 种化合物。这些化合物能够以浓度依赖性方式抑制炎症因子的释放,包括 NO、IL-6 和 IL-1 β 。其中,化合物 SZP-1、SZP-6 和 SZP-8 表现出优异的体外抗炎活性,与高浓度的阳性药物美洛昔康相当[30]。

桑树的果实(桑椹)可以作为新鲜水果,或者制成果酱和果汁食用。桑椹含有大量的生物活性成分,这些成分可能与一些对健康有益的潜在药理活性有关,所以它们通常用于传统医学诊疗和健康保健。桑树果实中最重要的化合物之一是花青素,它是多酚类的水溶性生物活性成分。研究表明,桑椹具有多种潜在的药理健康益处,包括抗胆固醇、抗肥胖和保肝作用,这可能与其中一些生物活性化合物的存在有关[31]。

桑树叶片中的活性成分主要有生物碱、黄酮类、多糖、氨基酸、简单苯丙素和酚类等,这些成分都

具有降血糖的作用。研究证实,通过不同提取方法得到的提取物对桑叶的降血糖效果有显著影响,例如,热水提取物在体内体外实验中都表现出比较强的降糖效果。临床研究表明,桑叶提取物能显著降低糖尿病患者的空腹血糖和餐后血糖,而且副作用很小。一些研究还探讨了桑叶提取物与其他降糖药物或生活方式干预(如饮食控制、运动)联合使用的效果。总之,桑叶具有显著的抗糖尿病效果,其降糖机制涉及多个分子途径。未来研究应深入探讨其分子机制,并通过更大规模的临床试验建立循证医学证据,重点考察其长期用药安全边界及与常规降糖药的相互作用特征[32]。

桑树叶中的黄酮类化合物最为丰富,研究结果表明,白桑树叶的提取物及其部分分离化合物在体外体内实验中展现出对多种人类癌细胞系的细胞毒性。在体外实验中,白桑树叶的提取物对多种人类癌细胞系(如肝癌、乳腺癌、结肠癌等)具有显著的细胞毒性,使用不同溶剂提取的桑叶提取物作用效果不同,而有机溶剂提取物的作用效果最好,其作用机制涉及细胞周期阻滞、凋亡诱导等,而且从桑叶提取物中纯化的桑叶凝集素(MLL)对乳腺癌和结肠癌具有抗增殖能力。在动物模型中,白桑树叶提取物对肝癌大鼠具有化学预防作用,减少了肝癌细胞的发病率[33]。还有研究说明,使用剃度和非剃度 Soxhlet 提取法,对桑树皮粉末提取后进行细胞毒性和抗肿瘤活性等测试,发现桑白皮提取物有极高的抗肿瘤活性,尤其是对肺癌细胞的抗迁移和抗侵袭作用,而且提取物可以促进伤口愈合[34]。

3.3. 桑树在饲料工业中的应用

桑树作为一种独特的饲料资源,在畜禽日粮中替代部分传统饲料,是缓解优质饲料来源短缺和降低饲料成本的有效策略[35]。在热带发展中国家中,绵羊生产是农村家庭的重要经济来源,但是,由于饲料的成本较高和季节性变化,导致饲料产量和营养价值不稳定。国外有人通过饲养试验,评估用桑叶替代商业浓缩饲料对羔羊生长和饲养成本的影响,结果显示,桑叶替代商业浓缩饲料可显著降低饲养成本,并且在 0.75%体重比例的桑叶替代量下,羔羊的生长性能和经济效益最佳;使用农场自产的桑叶替代商业浓缩饲料是热带地区可持续发展和高效饲养系统的可行选择[36]。研究发现,热带地区高密度桑树饲料库的产量和营养成分受季节(雨季和旱季)、有机氮肥施用量和收获频率的影响。结果表明,在低投入热带农业条件下,雨季每 60 天、旱季每 90 天收获一次,并且配合每年每公顷土地 300 kg 氮的有机氮肥施用,可实现桑树饲料库产量与营养价值优化平衡。但是,该策略适用于以叶片和嫩茎为主的畜牧饲料生产,尤其适合资源有限的可持续农业系统[37]。

3.4. 桑树病虫害防治与可持续种植

桑树是桑蚕主要的食物来源,全世界有 70 多个国家种植桑树,其中,中国的种植面积占全球种植面积 70%以上。然而,桑树常受蚜虫、鳞翅目幼虫、粉蚧等害虫侵袭,传统的化学农药虽能短期控制害虫,但会导致环境污染、非目标生物伤害、害虫抗药性等问题。研究发现,转向可持续的生物控制剂是关键解决方案。生物控制剂可以根据害虫种类和环境匹配,在害虫生命周期的敏感阶段投放,定期评估害虫种群数量和控制效果,动态调整有效实施的策略。生物控制剂具有对环境友好、可持续发展和安全性的优势。研究结果表明,生物控制剂是桑树害虫综合管理的核心工具,兼具生态保护与经济价值[38]。

3.5. 土壤肥力对桑叶品质的影响

桑树(特别是饲用桑树)叶片的品质会影响下游产物的质量。桑树叶片是养蚕的理想饲料,其营养成分和营养物质含量对蚕的生长发育具有极大的影响。研究者在印度米佐拉姆邦以三个不同地点的桑树种植园为研究对象,结果发现,土壤肥力高的桑园,其桑树叶片水分和蛋白质含量比较高,但是粗纤维、醚提取物等含量均低于土壤肥力低的桑园[39]。研究者对印度泰米尔纳德 5 个不同桑树种植园的土壤进行了检测,结果发现,土壤呈现出中碱性,电导率低,有机碳含量适中,有效氮和钾含量较高,说明泰米尔

纳德大部分的桑树种植区是最佳的种植区[40]。

4. 存在的主要问题

虽然人们对桑树在重金属污染环境修复方面开展了大量的工作，并且取得了不少的理论成果和实践经验，但仍有一些问题值得关注，或者已开展的部分研究工作不够深入，值得继续探讨。

一是关于单一重金属胁迫对桑树影响的研究较多，关于多种重金属复合胁迫对桑树影响的研究相对较少，单一重金属胁迫对桑树生长及其生理生化影响，也大多集中在 Pd、Cd 等少数几种元素上[41][42]。

在现实情况中，桑树可能同时暴露在铅、镉、汞等重金属元素复合污染的环境之中，这些重金属之间可能存在协同或拮抗作用，从而对桑树产生不同于单一重金属胁迫的毒害效应。多种重金属复合胁迫可能对桑树生长发育和生理生化过程影响更为严重，对桑树的毒害作用也更加明显。韩淑敏用盆栽试验方法，人工模拟锰、镉复合污染对桑树生长发育及生理生化过程的影响，测定了桑树叶片中的叶绿素含量、重金属含量、根系活力等生理生化指标。结果表明，在重金属复合污染条件下，桑树的生长受到明显抑制，表现为叶绿素含量下降，根系活力减弱，叶片中重金属的积累量显著高于单一重金属胁迫[43]。这些发现提示人们，在评估重金属胁迫对桑树的影响时，必须考虑到不同重金属离子之间的相互作用及其对桑树的综合影响。也就是说，虽然单一重金属胁迫的研究结果为人们提供了一些有价值的信息，但为了更贴近实际情况，开展多种重金属复合胁迫的研究显得尤为必要。通过这些研究，我们不仅能够更深入地了解重金属胁迫对桑树的影响效果，还能够为桑树的高产栽培和重金属污染治理提供科学依据。

二是关于重金属镉砷复合胁迫对桑树幼苗生理生态特性影响的相关研究文献公开报道不多。

砷和镉是两种毒性较强的重金属元素，对人类健康具有较大的潜在威胁[44]。近年来，研究者们开始关注这些重金属元素单一或复合胁迫对植物的影响。桑树作为一种重要的经济作物，且具有较好的生态经济效益，其对环境变化的敏感性和适应性引起了研究者的极大兴趣。

水培试验是一种在控制条件下研究植物生长和生理反应的有效方法[45]。通过水培试验，研究人员可以准确控制植物生长环境中的各种因素，包括营养液的成分、pH 值、温度和光照等。在研究重金属对桑树幼苗生长的影响时，水培试验提供了一个理想的平台，使得研究者能够观察和分析重金属单一和复合胁迫对桑树幼苗生长发育及生理生化特性的影响。

目前，关于重金属镉、砷对桑树幼苗单一和复合胁迫的水培试验的文献相对较少，已发表的研究结果表明，砷和镉单一胁迫对桑树幼苗的生长有显著的抑制作用[46]，具体表现为根系发育受阻、叶片黄化、生物量减少等。复合胁迫对桑树幼苗的影响更为复杂，可能会导致协同效应或拮抗效应，具体取决于这两种重金属的浓度比例和暴露时间。

随着分子生物学技术的发展，于霆等人利用基因表达分析、转录组学和蛋白质组学等方法来探究重金属胁迫背景下桑树幼苗的分子响应[47]。这些研究有助于揭示植物对重金属胁迫的分子适应机制，该研究结果可为培育耐重金属污染的桑树品种提供可能的基因资源。

目前，关于镉、砷单一或复合胁迫对桑树幼苗生长发育和饲用桑叶品质影响的实验研究文献报道不多，但该研究对于解析重金属污染对植物生长发育的影响，以及促进农业可持续发展具有重要的意义。

5. 对策和建议

在未来的研究中，关于重金属胁迫对饲用桑叶品质及安全利用的影响，还有许多工作需要深入开展。

一方面，应该加强对多种重金属复合胁迫的相关研究，从而更加全面深入地了解真实环境中桑树对重金属复合胁迫的反应和适应机制。截至目前，大多数研究主要集中在单一重金属胁迫对桑树的影响及

胁迫效应,但是多种重金属共存时产生的协同或拮抗作用对桑树的影响,仍然需要大量的研究深入解析。通过人工模拟桑园土壤的重金属复合污染环境,或者通过精确控制实验条件的水培试验,可以更加准确地评估桑树对土壤重金属污染的耐受能力及其修复潜力。

另一方面,需要更多的实验数据来支持,才能更加客观地评估重金属胁迫对饲用桑叶品质的影响。可以进一步分析在重金属胁迫下桑叶中营养成分和有害元素含量的变化,以及这些变化对家蚕的生长发育、蚕丝质量和其他副产品质量的影响,为制定科学的土壤修复策略和桑叶安全利用方案提供可靠的依据。另外,在分子生物学技术快速发展的背景下,可以利用基因表达分析、转录组学和蛋白质组学等方法,深入探究桑树对重金属胁迫的分子响应机制。这不仅有助于揭示桑树对重金属胁迫的适应机制,还可能为培育重金属耐受性强的桑树新品种提供基因资源。

在桂西北有色金属矿区及其周边区域,应积极开展重金属污染土壤的综合治理和修复研究,结合物理、化学和生物方法,探索高效的土壤修复技术,以恢复桑园的生态健康,推动桂西北地区蚕桑产业可持续发展。同时,应加强政策引导和技术支持,强化资源综合利用和产业化发展,助力乡村振兴和美丽中国建设。

综上所述,关于重金属胁迫对饲用桑叶品质及安全利用的研究应该更加全面、深入,重视多学科相互交叉和技术创新,以便为重金属污染土壤的治理和蚕桑产业的可持续发展注入新的活力。

基金项目

广西现代蚕桑丝绸协同创新中心资助项目(2022GXCSSC18),桂西北地方资源保护与利用工程中心(桂教科研[2012]9号),河池学院高层次人才科研启动费项目(XJ2018GKQ015, XJ2018GKQ016),广西高校大学生创新创业训练计划项目(锰和铅胁迫下的桑树生理代谢调节机制及安全利用研究)。

参考文献

- [1] 祝娟娟,丁天龙,魏从进,等.盐胁迫下不同桑品种种子萌发特性研究[J].蚕学通讯,2013,33(1):1-6.
- [2] 陈露.镉胁迫对不同品种桑树种子萌发及幼苗生长的影响[D]:[硕士学位论文].贵阳:贵州大学,2019.
- [3] 董小龙,张敏娟.重金属铅对桑树种子萌发胁迫及缓解作用研究[J].延安大学学报(自然科学版),2024,43(4):21-27.
- [4] 高鸿鹏,郑直,刘超,等.镉铅胁迫对桑树种子萌发和幼苗生长以及重金属累积的影响[J].安徽农业科学,2020,48(11):131-136.
- [5] 唐璐琦,许自龙,陈蓉萍,等.桑树种子萌发和幼苗生长耐镉耐铅能力综合评价[J].井冈山大学学报(自然科学版),2024,45(6):49-58.
- [6] 李萌,李洁.桑树的农用与药用价值论述[J].农技服务,2017,34(12):103.
- [7] 田硕.桑树的药用价值[J].基层医学论坛,2019,23(11):1577-1578.
- [8] 黄仁志,李一平,蒋勇兵,等.镉铅复合胁迫对桑苗生长与桑叶重金属含量的影响[J].蚕业科学,2018,44(5):665-671.
- [9] 秦芳.锌对铅胁迫下桑树雌雄幼苗生长的影响[D]:[硕士学位论文].南充:西华师范大学,2015.
- [10] 刘秀宇,房德建,毋浪鹏,等.铅锌矿区重金属污染土壤修复植物及其制浆造纸性能研究[J].中国造纸学报,2018,33(3):14-19.
- [11] 耿丽莎,杨再福,许志楠,等.镉胁迫对桑树生理指标及富集转运特征的影响[J].农业环境科学学报,2020,39(8):1667-1674.
- [12] 龙唐忠,颜新培,龚昕,等.论桑树在尾矿库生态修复中的应用前景——基于湘西矿山环境效应[J].农村经济与科技,2015,26(12):63-66.
- [13] 徐宁,胡桂萍,石旭平,等.桑树修复农田镉和铅的土壤微环境特征分析[J].中国农学通报,2019,35(24):66-72.
- [14] 范伟.桑树响应镉胁迫分子机制的研究[D]:[博士学位论文].重庆:西南大学,2021.

- [15] 刘代军, 涂波, 施松梅, 等. 石漠化地区的生态危机及菌根桑生物修复潜力研究进展[J]. 中国岩溶, 2012, 31(2): 185-190.
- [16] 韦师妮, 廖乃有, 梁小静, 等. 浅谈桑树在广西石漠化地区生态治理中的应用[J]. 蚕学通讯, 2023, 43(3): 21-24.
- [17] 王晨阳, 杨滨浩, 刘有志, 等. 谈谈桑树在区域生态修复中的应用[J]. 北方蚕业, 2024, 45(4): 7-10+51.
- [18] 郑鹏飞, 江涛, 米茂生, 等. 不同生长时期桑树对矿区土壤中重金属的富集行为[J]. 国土资源导刊, 2023, 20(2): 119-126+131.
- [19] 王玉诗, 丁鹏, 李霞, 等. 饲料桑叶的饲用价值及其在畜禽生产中的应用进展[J]. 畜牧与兽医, 2018, 50(9): 131-136.
- [20] 杜周和, 左艳春, 严旭, 等. 饲料桑生理活性物质及其饲用价值[J]. 草业学报, 2017, 26(10): 227-236.
- [21] 覃勇荣, 李宏森, 陆锡东, 等. 广西蚕蛹的神汞硒锑含量测定及其安全利用探讨[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(24): 114-119.
- [22] 刘旭辉, 覃勇荣, 黄琼兰. 广西宜州桑叶蛋白及硒含量的测定[J]. 河池学院学报, 2009, 29(5): 61-65.
- [23] 王晓红, 韩世玉, 孙运朋, 等. 镉胁迫下桑树幼苗的转录组分析[J]. 中国农学通报, 2023, 39(13): 25-34.
- [24] 谭勇壁. 矿区周边重金属污染农田发展桑树种植产业的可行性研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2008.
- [25] Ali, H., Khan, E. and Ilahi, I. (2019) Environmental Chemistry and Ecotoxicology of Hazardous Heavy Metals: Environmental Persistence, Toxicity, and Bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, **2019**, Article ID: 6730305. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- [26] Taghizadeh, M. and Kazemi, A. (2019) Potential Health Risk of Heavy Metals Accumulation in Cultivated Mulberry in Urban Landscapes of Arak, Iran: A Case Study. *Archives of Hygiene Sciences*, **8**, 274-285. <https://doi.org/10.29252/archhygsci.8.4.274>
- [27] Wang, L. and Ji, G. (2021) Glutathione and Calcium Biomineralization of Mulberry (*Morus alba* L.) Involved in the Heavy Metal Detoxification of Lead-Contaminated Soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, **21**, 1182-1190. <https://doi.org/10.1007/s42729-021-00431-1>
- [28] Wang, K.R. (2002) Tolerance of Cultivated Plants to Cadmium and Their Utilization in Polluted Farmland Soils. *Acta Biotechnologica*, **22**, 189-198. [https://doi.org/10.1002/1521-3846\(200205\)22:1/2<189::aid-abio189>3.0.co;2-x](https://doi.org/10.1002/1521-3846(200205)22:1/2<189::aid-abio189>3.0.co;2-x)
- [29] Mangood, A.H., Abdelfattah, I., El-Saied, F.A. and Mansour, M.Z. (2021) Removal of Heavy Metals from Polluted Aqueous Media Using Berry Leaf. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, **103**, 4450-4466. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1928102>
- [30] Li, W., Chen, L., Li, M., et al. (2025) Study on Chemical Composition, Anti-Inflammatory Activity and Quality Control of the Branch Bark of *Morus alba* L. *Fitoterapia*, **181**, Article ID: 106383.
- [31] Zhang, H., Ma, Z.F., Luo, X. and Li, X. (2018) Effects of Mulberry Fruit (*Morus alba* L.) Consumption on Health Outcomes: A Mini-Review. *Antioxidants*, **7**, Article No. 69. <https://doi.org/10.3390/antiox7050069>
- [32] Tian, S., Tang, M. and Zhao, B. (2016) Current Anti-Diabetes Mechanisms and Clinical Trials Using *Morus alba* L. *Journal of Traditional Chinese Medical Sciences*, **3**, 3-8. <https://doi.org/10.1016/j.jtcms.2016.04.001>
- [33] Chan, E.W.C., Wong, S.K., Tangah, J., Inoue, T. and Chan, H.T. (2020) Phenolic Constituents and Anticancer Properties of *Morus alba* (White Mulberry) Leaves. *Journal of Integrative Medicine*, **18**, 189-195. <https://doi.org/10.1016/j.joim.2020.02.006>
- [34] Srisomsap, C., Chaisuriya, P., Liana, D., Aiyarakanchanakun, P., Audsasan, T., Weeraphan, C., et al. (2024) Pharmacological Properties of White Mulberry (*Morus alba* L.) Leaves: Suppressing Migratory and Invasive Activities against A549 Lung Cancer Cells. *Plant Foods for Human Nutrition*, **79**, 387-393. <https://doi.org/10.1007/s11130-024-01184-9>
- [35] Cheng, H.Y., Fang, H.C., Yu, L.Y., et al. (2023) Biochemical and Protein Nutritional Potential of Mulberry (*Morus alba* L.) Leaf: Partial Substitution Improves the Nutrition of Conventional Protein. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, **104**, 2204-2214.
- [36] Alpízar-Naranjo, A., Arece-García, J., Esperance, M., López, Y., Molina, M. and González-García, E. (2017) Partial or Total Replacement of Commercial Concentrate with On-Farm-Grown Mulberry Forage: Effects on Lamb Growth and Feeding Costs. *Tropical Animal Health and Production*, **49**, 537-546. <https://doi.org/10.1007/s11250-017-1225-8>
- [37] González-García, E. and Martín Martín, G. (2016) Biomass Yield and Nutrient Content of a Tropical Mulberry Forage Bank: Effects of Season, Harvest Frequency and Fertilization Rate. *Grass and Forage Science*, **72**, 248-260. <https://doi.org/10.1111/gfs.12227>
- [38] Reddy, N.C., et al. (2024) The Use of Bio-Control Agents in Mulberry Pest Management: Successful Techniques and Important Issues. *International Journal of Environment and Climate Change*, **14**, 330-337.

<https://doi.org/10.9734/ijecc/2024/v14i94416>

- [39] Singh, N.S., Vanlalruati, M.C. and Tripathi, S.K. (2022) Soil Fertility Influences Leave Quality of *Morus alba* L. in Mizoram, Northeast India. *Vegetos*, **35**, 825-832. <https://doi.org/10.1007/s42535-022-00351-0>
- [40] Beevi, D.N. and Devamani, M. (2020) Soil Fertility Status of Five Major Mulberry Cultivated Districts in Tamil Nadu. *International Journal of Advanced Research*, **8**, 584-588. <https://doi.org/10.21474/ijar01/11134>
- [41] 陈蓉萍, 唐璐琦, 范志强, 等. Cd²⁺胁迫和 Pb²⁺胁迫对 4 种桑树品种种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 云南师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(5): 67-73.
- [42] 杜秋霞. 桑树铜胁迫转录组和 miRNA 分析及相关基因功能鉴定[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2021.
- [43] 韩淑敏, 高润红, 王爱君, 等. 锰、镉单一及复合胁迫对桑树生理生化特性的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2023, 43(9): 164-170+198.
- [44] 殷俊. 长沙地区食品中铅、镉、砷污染物调查及分析[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南农业大学, 2012.
- [45] 向猛, 黄益宗, 蔡立群, 等. 水稻吸收积累硅和锑的相互影响水培试验研究[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(11): 2090-2097.
- [46] 曾燕蓉, 朱方容, 林强, 等. 镉胁迫对水培桑苗生长的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(2): 247-256.
- [47] 于霆. 桑树重金属锌胁迫转录组、相关基因的克隆及差异基因的表达分析[D]: [硕士学位论文]. 镇江: 江苏科技大学, 2020.