

土壤重金属胁迫对桑树营养代谢的影响

覃家蕊, 蒙恩如, 杨丹妮, 劳瑞婷, 莫奇香, 覃勇荣*, 刘旭辉*

河池学院化学与生物工程学院, 广西 宜州

收稿日期: 2024年2月21日; 录用日期: 2024年3月22日; 发布日期: 2024年3月29日

摘要

为了解决重金属污染土壤的合理利用及蚕桑产业可持续发展问题, 选取桂西北某锰矿区周边受到不同程度重金属污染的12个桑园作为研究样地, 以远离矿区的非污染区3个桑园作为对试样地, 采集了调查样地的桑园土壤样品及桑树根部和桑叶样品, 测定了土壤样品的基本理化特性及土壤和植物样品的铜、锌、铬、镉、锰5种重金属元素含量, 还测定了桑叶样品的叶绿素、可溶性糖、水溶性蛋白质及总氨基酸含量, 并对相关检测指标与桑叶营养代谢生理指标的相关性进行了比较分析, 结果表明: 1) 在被测的5种重金属元素中, 锰含量最高, 锌含量次之, 调查样地桑园土壤及桑叶重金属含量的高低排序均为Mn > Zn > Cr > Cu > Cd, 桑树根部重金属含量的高低排序为Mn > Zn > Cu > Cd > Cr, 虽然不同重金属元素在桑树体内的累积情况不同, 但大部分调查样地的重金属含量高低排序为土壤 > 根 > 叶; 2) 在桑树营养代谢生理指标中, 叶绿素含量与土壤pH呈显著的负相关, 与土壤全磷和速效磷含量均呈极显著的正相关; 3) 不同调查样地桑叶的可溶性糖、水溶性蛋白质及总氨基酸含量差异较大, 而叶绿素含量差异相对较小。根据实验结果的分析讨论可知: 1) 土壤重金属胁迫对桑树营养代谢各种生理指标均有一定的影响, 其影响大小因重金属元素差异及作用浓度高低而不同; 2) 在土壤重金属复合胁迫条件下, 各种重金属元素之间存在复杂的相互作用, 共同影响桑树的营养代谢过程; 3) 桑树从土壤中吸收的重金属主要累积在根部, 转移到地上部分叶片的重金属相对较少, 低浓度的重金属对桑树营养代谢有一定促进作用; 4) 桑树叶片中的重金属元素含量对其营养代谢具有直接的影响, 而土壤中的重金属元素, 则通过桑树根部的吸收和转运, 间接影响桑树的营养代谢过程; 5) 桑树具有较强的重金属抗耐性, 在其耐受的范围内, 可通过增加体内可溶性糖、水溶性蛋白质、总氨基酸等渗透调节物质的含量或其他代谢调节机制, 增强其对重金属胁迫的抗性, 从而维持正常的生长发育。

关键词

桂西北, 有色金属矿区, 重金属胁迫, 土地合理利用, 桑树, 营养代谢

Effects of Soil Heavy Metal Stress on Nutrient Metabolism of Mulberry Trees

Jiarui Qin, Enru Meng, Danni Yang, Ruiting Lao, Qixiang Mo, Yongrong Qin*, Xuhui Liu*

*通讯作者。

文章引用: 覃家蕊, 蒙恩如, 杨丹妮, 劳瑞婷, 莫奇香, 覃勇荣, 刘旭辉. 土壤重金属胁迫对桑树营养代谢的影响[J]. 农业科学, 2024, 14(3): 323-336. DOI: 10.12677/hjas.2024.143042

Abstract

In order to solve the problems of rational utilization of heavy metal polluted soil and sustainable development of the sericulture industry, 12 mulberry fields around a manganese mining area in northwest Guangxi were selected as research plots, and 3 mulberry fields in non-polluted areas far from the mining area were used as control plots. Soil samples of mulberry fields, as well as samples of mulberry tree roots and leaves, were collected from the survey plots, the basic physicochemical properties of soil samples and the content of five heavy metal elements, including copper, zinc, chromium, cadmium, and manganese, in soil and plant samples were determined. The chlorophyll, soluble sugar, water-soluble protein, and total amino acid content of mulberry leaf samples were also measured, and the correlation between relevant detection indicators and physiological indicators of mulberry leaf nutrition metabolism was compared and analyzed. The results showed that: 1) Among the five heavy metal elements tested, manganese content was the highest, followed by zinc content. The order of heavy metal content in the surveyed mulberry field soil and mulberry leaves was $Mn > Zn > Cr > Cu > Cd$, and the order of heavy metal content in the roots of mulberry trees was $Mn > Zn > Cu > Cd > Cr$. Although the accumulation of different heavy metal elements in the mulberry tree body was different, the order of heavy metal content in most surveyed plots was soil > roots > leaves; 2) In the physiological indicators of nutritional metabolism in mulberry trees, chlorophyll content is significantly negatively correlated with soil pH, and highly positively correlated with soil total phosphorus content and available phosphorus content; 3) There are significant differences in the content of soluble sugars, water-soluble proteins, and total amino acids in mulberry leaves from different survey sites, while the differences in chlorophyll content are relatively small. According to the analysis and discussion of the experimental results, it can be concluded that: 1) Soil heavy metal stress has a certain impact on various physiological indicators of mulberry tree nutrition metabolism, and the magnitude of the impact varies depending on the differences in heavy metal elements and the concentration of action; 2) Under soil heavy metal compound stress conditions, there are complex interactions between various heavy metal elements, which jointly affect the nutritional metabolism process of mulberry trees; 3) The heavy metals absorbed by mulberry trees from the soil mainly accumulate in the roots, and the heavy metals transferred to the aboveground leaves are relatively less. Low concentrations of heavy metals have a certain promoting effect on the nutritional metabolism of mulberry trees; 4) The content of heavy metal elements in mulberry leaves has a direct impact on their nutritional metabolism, while heavy metal elements in soil indirectly affect the nutritional metabolism process of mulberry trees through absorption and transportation by mulberry roots; 5) Mulberry trees have strong resistance to heavy metal stress. Within their tolerance range, they can enhance their resistance to heavy metal stress by increasing the content of osmoregulatory substances such as soluble sugars, water-soluble proteins, total amino acids, or other metabolic regulatory mechanisms, thereby maintaining normal growth and development.

Keywords

Northwest Guangxi, Non-Ferrous Metal Mining Area, Heavy Metal Stress, Land Rational Use, Mulberry Trees, Nutritional Metabolism

Copyright © 2024 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. 引言

桑树(*Morus alba* L.)为桑科落叶乔木或灌木,是药食同源的一种常见植物。桑叶中含有较高的蛋白质和游离氨基酸,是一种极具开发潜力的资源[1],不仅可以作为养蚕的饲料,还能用于喂养家禽[2],经加工处理的桑叶,可制备食用级优质植物蛋白粉,作为蛋白质食品和饲料的添加剂[3]。相关研究结果表明,富含蛋白质和氨基酸的桑叶,可改变某些茶叶的涩味,使其转变成柔顺且含有微甘的味道,从而改善茶的口感并提升其品质[4]。优质的桑叶,既可以提高养蚕的效率及桑蚕产品的品质,也可以提升其食用和药用的价值。此外,桑树各部分均可入药[5],其中,桑叶有疏散风热,清肺润燥,清肝明目的功效[6];桑皮含有黄酮类物质,具有抗菌、降压、抗癌等作用[7][8]。

世界蚕桑看中国,中国蚕桑看广西,广西蚕桑看河池[9]。据报道,2023年广西全区的桑园面积达到300多万亩,河池桑园面积达90多万亩,并创建了以河池市、百色市为主的国家级“广西蚕桑优势特色产业集团”,成为全国首个以蚕桑为主导的产业集群项目。

河池是有色金属之乡,长期的矿山开采、金属冶炼加工对当地的大气、水体和土壤造成了一定的负面影响,重金属污染是其中比较突出的问题。桑树种植作为河池乡村的特色产业,不仅为当地蚕桑产业的发展提供了优质和充足的饲料,而且对生态环境保护发挥了积极的作用。桑树根系发达,耐干旱贫瘠,固土保水能力强,可用于岩溶地区石漠化治理[10][11]。研究表明,桑叶粉可以作重金属吸附剂的廉价替代品[12],用于水体重金属污染治理。此外,桑树对重金属污染土壤也具有较弱的修复潜力[13]。为了合理利用土地资源,充分发挥其生态经济效益,人们对尾矿坝、矿业废弃地等重金属异常区土壤的修复问题进行了大量的研究,结果发现,桑树对土壤重金属复合胁迫具有较强耐性[14][15],对部分重金属离子具有较强的富集和转运能力[13][16],在重金属Cd和As污染的土壤环境中,桑树的生长发育没有受到明显的影响[17]。但当桑园土壤的重金属含量过高,超过桑树的耐受范围时,也会影响其生长发育和营养代谢,进而影响其桑叶的产量和品质[18]。叶绿素是植物的光合色素,其含量高低可作为桑树叶质评价和良种选育的参考指标[19];可溶性糖与植物营养代谢紧密相关,可以维持植物蛋白质的稳定[20];水溶性蛋白也是营养代谢的产物,能够调节植物细胞的渗透势,维持细胞内部环境的稳定,因而在植物抵御不良环境因子胁迫时具有重要作用[21]。国内学者研究了重金属胁迫对植物幼苗生长及其生理生化特性的影响,结果发现,植物可通过增加可溶性糖、可溶性蛋白质、脯氨酸、总氨基酸含量及抗氧化酶活性等方式,提高其对重金属的耐性[22][23];张泽锟等[24]发现,适当浓度的植物生长素吲哚乙酸可有效缓解镉对香樟幼苗的胁迫,增加其叶绿素含量,降低其可溶性糖等渗透调节物质的含量;黄润生等从代谢组学的角度对桑树次生代谢产物进行了分析,结果发现,不同桑树品种营养代谢产物差异明显[25];高绘菊等发现,桑树内生拮抗细菌可以促进植物的营养代谢,提高其体内叶绿素、可溶性蛋白及可溶性糖的含量[26];岑忠用等对宜州栽培的主要桑树品种的生理生化性状进行了比较研究,结果发现,不同桑树品种的叶绿素、可溶性糖、水溶性蛋白质及脯氨酸含量均有一定的差异[27]。虽然人们对植物营养代谢问题进行了一些相关研究,但关于重金属胁迫背景下的桑树营养代谢研究鲜有报道,因此,本研究以桂西北有色金属矿区周边的桑园为调查研究样地,以远离矿区(非矿区)的桑园作为对试样地,通过实证研究和比较分析的方法,说明重金属胁迫对桑树营养代谢的影响,以便为当地蚕桑产业可持续发展及土地资源合理利用提供理论咨询和决策参考。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集与处理

2.1.1. 样品的采集

在查阅文献和多次实地调研的基础上,选择河池市宜州区龙头锰矿周边的桑园作为调查样地,以远

离该矿区非污染区的桑园作为对照样地。龙头锰矿位于宜州正西方向约 60 km 处, 是一个中型锰矿, 属于典型的海相沉积型矿床, 主要以氧化锰和碳酸锰为主, 自 20 世纪中叶探明并开采至今, 已有 60 多年的历史, 该矿区锰的含量比较高, 伴生有铅、锌、铜、镍、钴等其他重金属元素 [28]。2022 年 7 月至 9 月, 按照常规的采样方法, 采集了 12 个矿区周边桑园调查样地的样品和 3 个对照样地的样品, 每个调查样地的桑园面积不小于 300 m²。按照蛇形采样法, 对每一个桑园样地进行每隔 5~6 米的五点采样。采集土壤样品时, 选取生长状态正常的桑树植株, 去除其根部周围的砾石及其他杂物, 采集 0~20 cm 的表土, 并采集相应植株的桑树根系样品和桑叶样品。将 5 点采集的土壤样品充分混合, 过 2 mm 筛, 然后按四分法取适量装入塑料自封袋中, 做好相应的记录, 尽快带回实验室, 一部分用于土壤理化分析, 一部分用于重金属含量的测定。采集桑叶样品时, 从距离主枝顶端的第 5 叶位开始, 往下采集 6 张正常的叶片, 小心装入做好标记的塑料样品袋中, 避免叶片过度折叠和破损, 低温保存, 尽快带回实验室, 用于重金属含量测定及营养代谢生理指标的测定。

2.1.2. 样品的处理

按常规方法, 将采集的桑园土壤样品在阴凉处自然风干, 用木棒捣碎, 过 60 目标准筛, 然后将其装入塑料样品袋中, 做好标记, 密封, 阴凉干燥处保存, 备用。

将桑树根系样品和部分桑叶样品先用自来水洗涤干净, 之后用纯水超声洗涤 10 min, 再用纯水洗涤 3 次, 沥干其表面水分, 105°C 杀青 30 min, 60°C 烘至恒重, 磨碎, 过 100 目筛, 装入做好标记的塑料自封袋中, 避光干燥处保存, 用于重金属含量的测定。

将剩余的桑叶用清水洗涤 3 次, 再用去离子水清洗 2 次, 用干净的吸水纸轻轻擦干其表面的水分, 然后置于聚乙烯塑料样品袋中, 做好标记, 存放于 3°C 的冰箱内, 用于桑树叶片营养代谢生理指标叶绿素、可溶性糖、水溶性蛋白质及总氨基酸含量的测定。

2.2. 实验方法

2.2.1. 土壤理化性质的测定

风干土壤水分含量的测定用重量法[29]、pH 测定用电位法[30]、有机质含量测定用分光光度法(HJ613-2011) [31]; 全磷含量的测定用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法[32]、速效磷含量的测定用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法[33]; 全氮含量的测定用凯氏定氮法[34]、碱解氮的测定用碱解扩散法[35]。

2.2.2. 重金属含量的测定

土壤样品重金属含量的测定, 采用混酸(硝酸: 高氯酸: 氢氟酸 = 5:2:1)消解, 原子吸收光谱法; 桑树根系样品和叶片样品重金属含量的测定, 用混酸(硝酸: 高氯酸 = 4:2)消解, 原子吸收光谱法[36]。为了保证样品检测数据的准确性, 每检测一组(15 个)样品, 均用质控样对仪器的稳定性进行检验。

2.2.3. 桑叶营养代谢生理指标的测定

叶绿素含量的测定用丙酮乙醇混合法, 可溶性糖含量测定用蒽酮比色法[37]; 水溶性蛋白质含量测定用考马斯亮蓝 G-250 染色法[38]; 总氨基酸含量的测定用茚三酮比色法[39]。

2.3. 数据处理

每个样品的测定均做 3 个重复, 结果取平均值, 数值用 $\bar{X} \pm SD$ 表示, 数据分析处理用 Excel 2019 和 SPSS 24.0 进行, 数据图的绘制用 Origin 2019 进行, 用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD 法)进行差异显著性检验。

3. 结果与分析

3.1. 调查样地土壤的基本理化特性

不同调查样地桑园土壤基本理化特性的测定结果见表 1。

Table 1. List of basic physical and chemical characteristics of mulberry field soil in different survey sites

表 1. 不同调查样地桑园土壤的基本理化特性一览表

| 样品编号 | pH | 风干土水分 (%) | 有机质 (g/kg) | 全氮 (g/kg) | 碱解氮 (mg/kg) | 全磷 (g/kg) | 速效磷 (mg/kg) |
|------|---------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------------|
| LT1 | 4.70 ± 0.09 ⁱ | 2.44 ± 0.28 ^{ab} | 36.78 ± 0.80 ^{de} | 2.06 ± 0.23 ^{bc} | 166.24 ± 2.48 ^b | 1.92 ± 0.25 ^a | 305.41 ± 28.72 ^a |
| LT2 | 4.69 ± 0.21 ⁱ | 2.66 ± 0.10 ^a | 34.36 ± 3.67 ^{def} | 1.99 ± 0.05 ^{bcd} | 166.24 ± 2.45 ^b | 2.17 ± 0.05 ^a | 332.51 ± 22.05 ^a |
| LT3 | 4.97 ± 0.08 ^h | 2.13 ± 0.20 ^{bcd} | 37.82 ± 3.39 ^{cde} | 1.92 ± 0.04 ^{cde} | 162.74 ± 7.40 ^b | 2.08 ± 0.22 ^a | 219.76 ± 16.19 ^b |
| LT4 | 5.70 ± 0.14 ^d | 1.28 ± 0.14 ^e | 25.47 ± 0.45 ^f | 1.19 ± 0.05 ^h | 98.35 ± 5.44 ^f | 0.68 ± 0.01 ^{fg} | 30.07 ± 2.36 ^{de} |
| LT5 | 6.35 ± 0.05 ^a | 1.12 ± 0.15 ^e | 26.45 ± 8.02 ^f | 0.62 ± 0.01 ^j | 56.93 ± 8.30 ^h | 1.12 ± 0.13 ^{cde} | 59.25 ± 4.44 ^d |
| LT6 | 6.21 ± 0.16 ^{ab} | 1.22 ± 0.11 ^e | 26.75 ± 5.23 ^f | 0.87 ± 0.03 ⁱ | 84.00 ± 0.01 ^{fg} | 1.04 ± 0.04 ^{de} | 231.61 ± 31.68 ^b |
| LT7 | 5.93 ± 0.13 ^{cd} | 1.76 ± 0.15 ^d | 30.68 ± 3.00 ^{ef} | 1.22 ± 0.02 ^h | 71.75 ± 2.48 ^{gh} | 0.56 ± 0.04 ^g | 9.08 ± 0.97 ^e |
| LT8 | 5.64 ± 0.04 ^{ef} | 2.31 ± 0.03 ^{abc} | 47.84 ± 4.33 ^{bc} | 2.14 ± 0.07 ^b | 151.88 ± 9.70 ^{bc} | 1.10 ± 0.14 ^{cde} | 10.79 ± 0.80 ^e |
| LT9 | 5.90 ± 0.12 ^{cd} | 1.70 ± 0.14 ^d | 37.90 ± 0.74 ^{cde} | 1.79 ± 0.1 ^{efg} | 142.79 ± 4.58 ^{cd} | 0.92 ± 0.03 ^{ef} | 23.51 ± 3.09 ^{de} |
| LT10 | 6.08 ± 0.01 ^{bc} | 1.91 ± 0.15 ^{cd} | 42.99 ± 6.14 ^{cd} | 1.65 ± 0.04 ^g | 130.19 ± 2.53 ^{de} | 1.02 ± 0.09 ^{de} | 20.60 ± 0.84 ^{de} |
| LT11 | 5.44 ± 0.06 ^{fg} | 2.09 ± 0.08 ^{bcd} | 39.32 ± 3.99 ^{cde} | 1.66 ± 0.02 ^g | 120.16 ± 10.69 ^e | 0.92 ± 0.05 ^{ef} | 42.30 ± 4.35 ^{de} |
| LT12 | 5.70 ± 0.02 ^{de} | 1.84 ± 0.18 ^d | 43.31 ± 1.68 ^{cd} | 1.73 ± 0.04 ^{fg} | 142.47 ± 3.92 ^{cd} | 1.58 ± 0.12 ^b | 209.61 ± 6.58 ^{bc} |
| XJ1 | 5.22 ± 0.03 ^g | 1.95 ± 0.17 ^{cd} | 62.13 ± 2.71 ^a | 2.58 ± 0.07 ^a | 200.64 ± 5.34 ^a | 1.38 ± 0.04 ^{bc} | 168.35 ± 27.32 ^c |
| XJ2 | 4.76 ± 0.03 ^{hi} | 1.88 ± 0.26 ^d | 55.82 ± 2.44 ^{ab} | 2.54 ± 0.08 ^a | 190.86 ± 1.76 ^a | 1.34 ± 0.16 ^{bcd} | 208.89 ± 31.06 ^{bc} |
| DS | 6.43 ± 0.03 ^a | 2.56 ± 0.01 ^a | 43.34 ± 1.72 ^{cd} | 1.85 ± 0.03 ^{def} | 118.99 ± 6.06 ^e | 1.24 ± 0.13 ^{cde} | 26.29 ± 0.51 ^{de} |

注：① 样品编号中 LT1-LT12 为矿区周边桑园样地，其余为非矿区桑园对照样地；② 同列数据中的不同小写字母表示差异显著 ($p < 0.05$)，下同。

由表 1 可知，所有调查样地的桑园土壤 pH 均为酸性，且风干土水分含量相对较低。参照全国第二次土壤普查农用地的质量分级标准，矿区周边桑园土壤养分含量的测定指标大部分达到 2 级以上，少部分测定指标为 3~5 级；远离矿区(非污染区)的桑园对照样地，其土壤养分被测指标大部分达到了 1 级，总体而言，对照样地的土壤理化特性优于矿区周边的桑园样地。

3.2. 被测样品的重金属含量

不同调查样地桑园土壤、桑树根部及桑叶的重金属含量测定结果见图 1~5。

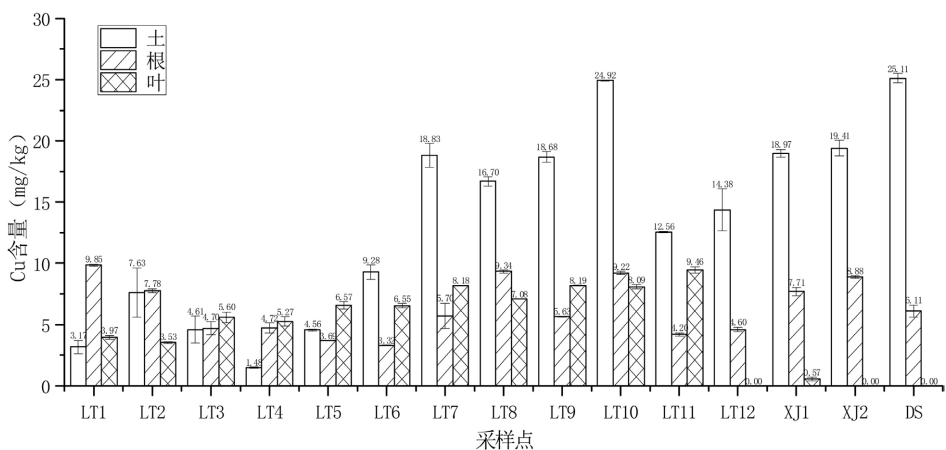


Figure 1. Copper content in soil of mulberry field, roots and leaves of mulberry trees in different survey sites

图 1. 不同调查样地桑园土壤及桑树根部和叶片的铜含量

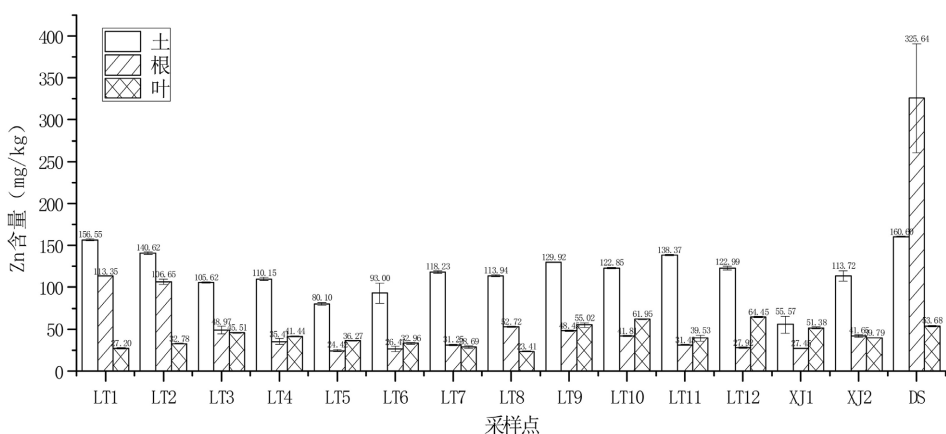


Figure 2. Zinc content in soil of mulberry field, roots and leaves of mulberry tree in different survey sites

图 2. 不同调查样地桑园土壤及桑树根部和叶片的锌含量

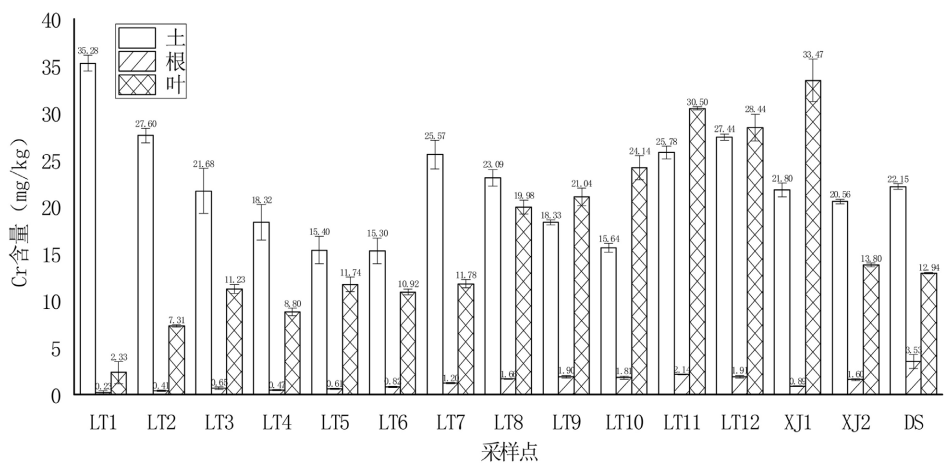


Figure 3. Chromium content in soil of mulberry field, roots and leaves of mulberry tree in different survey sites

图 3. 不同调查样地桑园土壤及桑树根部和叶片的铬含量

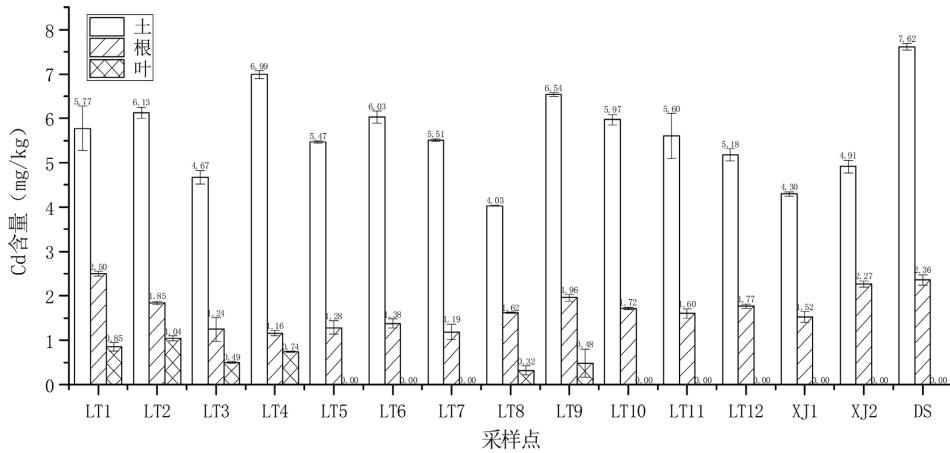


Figure 4. Cadmium content in soil of mulberry field, roots and leaves of mulberry trees in different survey sites

图 4. 不同调查样地桑园土壤及桑树根部和叶片的镉含量

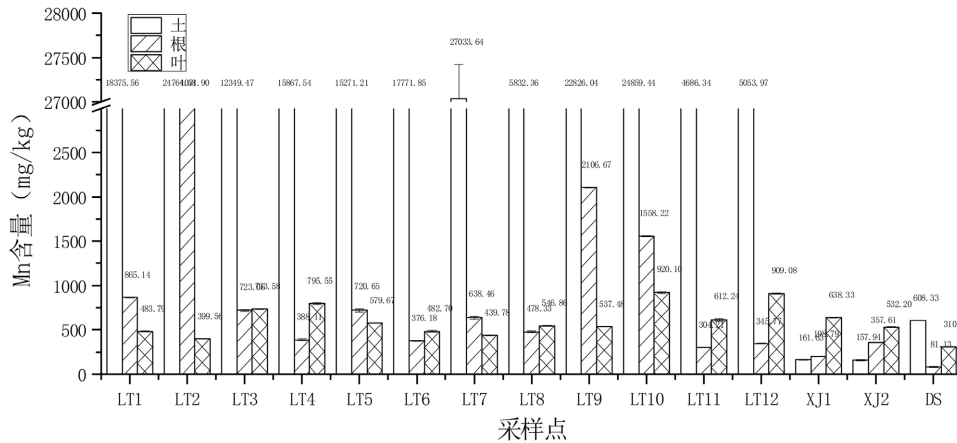


Figure 5. Manganese content in soil of mulberry field, roots and leaves of mulberry trees in different survey sites

图 5. 不同调查样地桑园土壤及桑树根部和叶片的锰含量

从调查样地桑园土壤和桑树不同部位重金属含量的平均值来看，在矿区周边的桑园及远离矿区的对照桑园样地中，土壤重金属含量的高低排序均为 $Mn > Zn > Cr > Cu > Cd$ ，桑树根部重金属含量的高低排序均为 $Mn > Zn > Cu > Cd > Cr$ ，桑叶重金属含量的高低排序均为 $Mn > Zn > Cr > Cu > Cd$ 。从桑树不同部位与土壤的重金属含量来看，矿区和非矿区桑园样品锰含量的高低排序分别为：土壤 > 根 > 叶、叶 > 土 > 根；锌含量的高低排序分别为：土壤 > 根 > 叶、根 > 土壤 > 叶；铬含量的高低排序均为：土壤 > 叶 > 根；铜含量的高低排序均为：土壤 > 根 > 叶；镉含量的高低排序均为：土壤 > 根 > 叶。

综上，不管是矿区还是非矿区的土壤、桑树根部及桑叶都是 Mn 含量最高，Zn 含量次之，其中矿区土壤的 Mn 含量 > 4000 mg/kg，远高于其余被测重金属元素；大多数调查样地土壤的重金属 Cu、Cd、Cr、Mn 含量比桑树根和桑叶高，其中所有桑园土壤的 Cd 含量均已远超出《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618-2018)所规定的限值(0.3 mg/kg)，不利于食用农产品的种植。

3.3. 桑叶的营养代谢指标

不同桑园调查样地桑叶营养代谢生理指标的测定结果见表 2。

Table 2. Summary of nutritional metabolic physiological indicators of mulberry leaves in different survey sites
表 2. 不同调查样地桑叶营养代谢生理指标测定结果一览表

| 样品编号 | 叶绿素 mg/g | 可溶性糖 % | 水溶性蛋白 mg/g | 总氨基酸 mg/g |
|--------|---------------------------------|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| LT1 | 0.1623 ± 0.0049 ^a | 35.81 ± 0.54 ^a | 69.19 ± 0.87 ^a | 14.29 ± 0.08 ^e |
| LT2 | 0.1252 ± 0.0051 ^{bc} | 24.58 ± 0.42 ^e | 56.36 ± 0.01 ^c | 19.57 ± 0.06 ^b |
| LT3 | 0.1316 ± 0.0064 ^{bcef} | 21.14 ± 0.06 ^f | 46.47 ± 0.13 ^f | 9.70 ± 0.04 ^j |
| LT4 | 0.0967 ± 0.0008 ^{dehi} | 34.53 ± 1.74 ^b | 53.67 ± 0.29 ^d | 8.54 ± 0.14 ^k |
| LT5 | 0.1320 ± 0.0091 ^{bef} | 29.60 ± 0.72 ^c | 60.54 ± 0.06 ^b | 10.04 ± 0.15 ⁱ |
| LT6 | 0.1101 ± 0.0057 ^{dgh} | 26.70 ± 0.05 ^d | 44.82 ± 0.28 ^g | 7.56 ± 0.15 ^m |
| LT7 | 0.1036 ± 0.0015 ^{dh} | 5.34 ± 0.03 ^k | 33.18 ± 1.09 ^j | 10.28 ± 0.01 ^h |
| LT8 | 0.0972 ± 0.0034 ^{dehi} | 13.79 ± 0.31 ^{ik} | 55.77 ± 1.50 ^c | 9.83 ± 0.03 ^j |
| LT9 | 0.1144 ± 0.0045 ^{cdg} | 17.61 ± 0.06 ^g | 52.27 ± 1.58 ^d | 18.49 ± 0.06 ^c |
| LT10 | 0.0902 ± 0.0038 ^{ei} | 15.78 ± 0.03 ^h | 47.68 ± 0.60 ^f | 21.85 ± 0.17 ^a |
| LT11 | 0.1028 ± 0.0027 ^{dh} | 11.07 ± 0.19 ^{jk} | 36.60 ± 0.02 ⁱ | 17.04 ± 0.07 ^d |
| LT12 | 0.1229 ± 0.0025 ^{cfg} | 14.00 ± 0.09 ^{ik} | 26.67 ± 0.16 ^{kl} | 8.17 ± 0.13 ^l |
| KQ 平均 | 0.1157 | 20.83 | 48.60 | 12.95 |
| DS | 0.1039 ± 0.0024 ^{dh} | 21.13 ± 0.32 ^f | 40.38 ± 0.60 ^h | 9.99 ± 0.10 ^{ji} |
| XJ1 | 0.1360 ± 0.0099 ^{abc} | 24.19 ± 0.02 ^e | 26.36 ± 0.36 ^{kl} | 11.05 ± 0.01 ^g |
| XJ2 | 0.1028 ± 0.0070 ^{dth} | 25.65 ± 0.16 ^{de} | 49.75 ± 0.46 ^e | 12.26 ± 0.09 ^f |
| FKQ 平均 | 0.1142 | 23.66 | 38.83 | 11.10 |

说明：① KQ 和 FKQ 分别指矿区调查样地和非矿区调查样地，下同。

由此可知，不同调查样地桑叶营养代谢生理指标的测定结果均有一定的差异，其中，可溶性糖、水溶性蛋白和总氨基酸的含量差异比较明显；从矿区样地和非矿区对照样地桑叶营养代谢相关检测指标的平均值来看，除了可溶性糖之外，其余检测指标均为矿区样地高于对照样地。

3.4. 相关性分析

3.4.1. 土壤基本理化特性与桑叶营养代谢生理指标的相关性

不同调查样地土壤基本理化特性与桑叶营养代谢生理指标的相关性分析结果见表 3。由此可知，叶绿素含量与土壤 pH 呈显著的负相关，与土壤全磷和速效磷均呈极显著的正相关，与其余土壤理化指标之间虽有一定相关性，但不显著；可溶性糖、水溶性蛋白及总氨基酸含量与被测的土壤理化指标之间，虽有一定的正相关或负相关，但均不显著。

Table 3. Correlation between soil physical and chemical characteristics and nutritional metabolism physiological indicators of mulberry leaves in the survey site

表 3. 调查样地土壤理化特性与桑叶营养代谢生理指标的相关性

| | 风干系数 | pH | 有机质 | 全磷 | 速效磷 | 全氮 | 碱解氮 |
|-------|--------|---------------------|--------|---------------------|---------------------|--------|--------|
| 叶绿素 | 0.160 | -0.567 [*] | -0.059 | 0.671 ^{**} | 0.720 ^{**} | 0.160 | 0.285 |
| 可溶性糖 | -0.127 | -0.171 | -0.254 | 0.317 | 0.422 | -0.100 | 0.040 |
| 水溶性蛋白 | 0.140 | 0.007 | -0.397 | 0.220 | 0.041 | -0.184 | -0.110 |
| 总氨基酸 | 0.414 | -0.138 | 0.054 | 0.113 | -0.084 | 0.198 | 0.202 |

注：符号“*”表示相关性显著($p < 0.05$)，“**”表示极显著相关($p < 0.01$)，下表同。

3.4.2. 土壤重金属含量与桑叶营养代谢生理指标的相关性

不同调查样地桑园土壤重金属含量与桑叶营养代谢生理指标的相关性分析结果见表 4 和表 5。

Table 4. Correlation between heavy metal content in mulberry field soil around mining area and physiological indicators of mulberry leaf nutritional metabolism

表 4. 矿区周边桑园土壤重金属含量与桑叶营养代谢生理指标的相关性

| 重金属 | 叶绿素 | 可溶性糖 | 水溶性蛋白 | 总氨基酸 |
|-----------------|---------|----------|--------|--------|
| Cu _± | -0.644* | -0.799** | -0.467 | 0.429 |
| Zn _± | 0.253 | -0.095 | 0.098 | 0.599* |
| Cr _± | 0.555 | -0.033 | 0.030 | 0.077 |
| Cd _± | -0.084 | 0.415 | 0.193 | 0.324 |
| Mn _± | -0.007 | 0.110 | 0.270 | 0.434 |

注: Cu_±表示土壤中的铜含量, 其余以此类推, 下表同。

Table 5. Correlation between heavy metal content of soil and nutritional metabolism physiological indicators of mulberry leaves in non-mining area control mulberry sample fields

表 5. 非矿区对照桑园样地土壤重金属含量与桑叶营养代谢生理指标的相关性

| 重金属 | 叶绿素 | 可溶性糖 | 水溶性蛋白质 | 总氨基酸 |
|-----------------|--------|--------|--------|--------|
| Cu _± | -0.530 | -0.926 | 0.178 | -0.810 |
| Zn _± | -0.882 | -0.616 | 0.644 | -0.411 |
| Cr _± | 0.335 | -0.871 | -0.661 | -0.963 |
| Cd _± | -0.619 | -0.880 | 0.284 | -0.742 |
| Mn _± | -0.468 | -0.951 | 0.107 | -0.850 |

由此可知, 在矿区周边的桑园样地, 土壤中的铜含量分别与叶绿素含量及可溶性含量呈显著或极显著负相关, 与水溶性蛋白及总氨基酸含量分别呈不显著的负相关或正相关; 土壤锌含量除了与总氨基酸含量呈显著正相关之外, 与其余的营养代谢生理指标呈不显著的正相关或负相关; 土壤中的铬、镉、锰含量与桑叶营养代谢生理指标之间, 虽有一定的相关性, 但不显著; 在对照的非矿区桑园调查样地中, 被测的土壤重金属含量与桑叶营养代谢生理指标有一定的相关性, 但不显著。

3.4.3. 桑叶重金属含量与营养代谢生理指标的相关性

不同调查样地桑叶重金属含量与其营养代谢生理指标的相关性分析结果见表 6。由此可知, 在 5 种被测重金属元素中, 各被测元素与桑叶营养代谢生理指标均有一定的相关性, 但不一定显著, 只有铬含量与可溶性糖及水溶性蛋白质呈显著负相关和极显著负相关, 镉含量与水溶性蛋白质呈显著正相关。

Table 6. Correlation between heavy metal content in mulberry leaves and nutritional metabolism physiological indicators of mulberry leaves in different survey sites

表 6. 不同调查样地桑叶重金属含量与桑叶营养代谢生理指标的相关性

| 重金属 | 叶绿素 | 可溶性糖 | 水溶性蛋白质 | 总氨基酸 |
|-----------------|--------|---------|----------|-------|
| Cu _叶 | -0.288 | -0.329 | 0.246 | 0.333 |
| Zn _叶 | -0.145 | -0.182 | -0.496 | 0.188 |
| Cr _叶 | -0.246 | -0.550* | -0.695** | 0.155 |
| Cd _叶 | 0.377 | 0.472 | 0.632* | 0.268 |
| Mn _叶 | -0.137 | -0.078 | -0.232 | 0.034 |

3.4.4. 土壤重金属与桑树不同部位重金属含量的相关性

不同调查样地桑园土壤重金属含量与桑树根部及叶片重金属含量的相关性分析结果见表 7。

Table 7. Correlation between heavy metals in mulberry field soil and heavy metal content in mulberry roots and leaves in different survey sites

表 7. 不同调查样地桑园土壤重金属与桑树根部、叶片重金属含量的相关性

| 重金属 | Cu _根 | Zn _根 | Cr _根 | Cd _根 | Mn _根 | Cu _叶 | Zn _叶 | Cr _叶 | Cd _叶 | Mn _叶 |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Cu _土 | 0.332 | 0.284 | 0.778** | 0.325 | -0.108 | -0.150 | 0.454 | 0.531* | -0.595* | -0.076 |
| Zn _土 | 0.245 | 0.612* | 0.410 | 0.644** | 0.281 | 0.011 | -0.013 | -0.306 | 0.358 | -0.294 |
| Cr _土 | 0.364 | 0.226 | -0.106 | 0.450 | 0.120 | -0.249 | -0.283 | -0.143 | 0.416 | -0.230 |
| Cd _土 | -0.259 | 0.572* | 0.288 | 0.236 | 0.204 | 0.027 | 0.224 | -0.362 | 0.206 | -0.241 |
| Mn _土 | -0.024 | -0.221 | -0.439 | -0.247 | 0.626* | 0.601* | -0.193 | -0.439 | 0.419 | -0.016 |

由此可知，土壤重金属含量与桑树根部及叶片中的被测重金属元素含量有一定的相关性。其中，土壤中的铜与桑树根部及叶片中的铬分别呈极显著或显著的正相关，与桑叶中的镉呈显著的负相关；土壤中的锌与桑树根部的锌和镉呈显著或极显著正相关；土壤中的铬与桑树根部及叶片中的被测元素的相关性均不显著；土壤中的镉与桑树根部的锌呈显著正相关；土壤中的锰与桑树根部的锰及桑叶中的铜均呈显著正相关。

4. 讨论

4.1. 桑园土壤的基本理化特性

本研究调查样地桑园土壤的 pH 均为酸性，与刘斌等[40]的研究结果相似；在调查的 15 个桑园样地土壤中，风干土水分含量相对较低，可能与桂西北岩溶地区的特殊地质背景有关[41] [42]。矿山开采、金属冶炼、化工生产、化肥施用及大气沉降是土壤重金属含量异常的重要原因[43] [44]。由于 LT1-LT12 采样点比较靠近锰矿作业区，所以其周边桑园土壤的锰含量远高于当地土壤背景值。在被测的土壤养分指标中，有机质、全磷、速效磷、全氮和碱解氮的含量比较高，可能与人工施肥有关[45]，该结果与刘斌等人的结果不一致。

4.2. 重金属在桑树根部和叶片的累积

桑树对重金属胁迫具有较强耐受性[46] [47]，通常情况下，其对低浓度的重金属富集及转移系数比较高[48]。在本研究的矿区周边桑园样地中，桑树根部的重金属含量与土壤中相应的重金属元素含量大多呈正相关(部分呈显著正相关)，而桑叶中的重金属含量，与其土壤中对应的重金属元素含量大多呈不显著的负相关。在本研究的 5 种被测重金属元素中，从平均结果来看，不同调查样地桑树根部累积的锰、锌、铜和镉比叶片高，说明桑树从土壤中吸收的重金属主要累积在根部，而转移到地上部分的重金属相对较少，该结果与耿丽莎[49]和王谢[50]等的研究结果相似。在对照的桑园样地中，桑叶中的锰含量均比桑树根部高，可能与对对照样地桑园土壤中的锰含量相对较低有关，具体原因有待进一步分析[51]。

4.3. 重金属胁迫对桑树营养代谢的影响

4.3.1. 对桑树叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物的光合色素，在植物营养代谢中具有重要的作用，其合成受到植物体内及体外多种环境因素的影响。曾燕蓉等人发现，干旱等不利环境因子胁迫，不仅导致桑树叶片黄化脱落，还影响其剩

余叶片叶绿素的形成和积累[52]。Mn 和 Cu 虽是维持植物叶绿体结构的必需元素，但其过量或者不足，均会破坏叶绿体的结构，使叶绿素含量下降，从而影响植物的光合作用[53] [54] [55]。在本研究的 15 个桑园调查样地中，桑叶的 Cu 含量与土壤的 Mn 含量呈显著正相关，实验样品的检测数据也表明，绝大部分(91.67%)矿区周边桑园调查样地桑叶的 Cu 含量高于远离矿区的对照桑园样地；在矿区周边桑园和对照桑园调查样地中，桑叶的 Cu 含量分别与相应调查样地桑树叶片的叶绿素含量呈显著负相关和不显著负相关，可能与矿区周边桑园土壤的 Mn 和 Cu 含量比较高有关，具体问题有待进一步研究。

4.3.2. 对桑叶可溶性糖和水溶性蛋白含量的影响

当植物面临不良环境胁迫时，通常会增加其体内可溶性糖和水溶性蛋白质等渗透调节物质的含量，以提高自身的抗逆性[21]，本研究所得结果与之相似。卢圣凡[56]等研究了镉胁迫对忍冬根系分泌物的影响，结果发现，忍冬对镉胁迫的响应表现为“低促高抑”效应。在本研究中，桑园土壤和桑树根部的镉含量相对较高，桑树从土壤中吸收的镉主要累积在根部，往地上部分转移的镉较少，因而桑叶中的镉含量较低，桑园土壤中的镉含量对桑叶中的可溶性糖含量虽有一定的影响，但不显著。水溶性蛋白是植物体内的重要营养物质，可增加植物细胞的保水能力，因此可以作为植物抗性生理的重要监测指标之一。穆海婷[57]等的研究表明，在重金属 Cu 胁迫下，东方山羊豆幼苗内的可溶性糖呈先下降后上升的趋势，可溶性蛋白含量总体呈下降趋势。在本研究中，调查样地的桑树生长受到锰、锌、铬、铜、镉等多种重金属复合胁迫，土壤中的各种重金属元素也可能存在一定的相互作用，因此情况比较复杂。矿区周边桑园调查样地土壤中的铜含量，与桑叶中的可溶性糖含量呈极显著负相关，与桑叶中的水溶性蛋白质含量呈不显著的负相关；非矿区对照桑园样地土壤中的铜含量，与桑叶中的可溶性糖含量和水溶性蛋白含量分别呈不显著的负相关和正相关。该结果与穆海婷等的结果相似，但不完全一致。

4.3.3. 对桑叶总氨基酸含量的影响

桑叶中的氨基酸含量丰富，具有较高的营养价值，可用于开发氨基酸类的功能性食物[58]。在本研究中，矿区周边桑园调查样地与非矿区桑园对照样地，其桑叶中的总氨基酸含量平均值并无明显差异，但矿区周边桑园土壤的 Zn 含量与桑叶的总氨基酸含量呈显著正相关，而非矿区对照桑园样地土壤的 Zn 含量与桑叶中的总氨基酸含量呈不显著的负相关，其原因有待进一步分析。

4.4. 重金属污染土壤的修复及蚕桑产品的安全利用

桑树具有较强的重金属耐性和一定的吸收转运能力[59]。黄仁志等的研究表明，适宜桑树栽植的重金属污染土壤中镉、铅含量最大值分别为 39.25 mg/kg 和 601.69 mg/kg；若以桑叶产量减少 25%时所对应的土壤重金属含量作为桑树对镉、铅胁迫的耐受值，桑树对重金属污染土壤中镉、铅的平均耐受阈值分别为 40.88 mg/kg 和 527.00 mg/kg [60]。从本研究的结果来看，桑树可在多种重金属复合胁迫的土壤中正常生长，且矿区周边桑园土壤的锰含量高达 27033.64 mg/kg，由此可知，桑树是一种对锰具有极强耐性的植物，若能弄清其对锰等重金属的耐受机理，必定能在土壤重金属污染治理中发挥更大的作用。

生态环保是社会高度关注的热点话题，在利用桑树修复重金属污染土壤的过程中，在保证蚕桑产品质量的前提下，充分发挥桑树的生态经济效应是值得认真考虑的问题。刘秀宇等的研究表明，与同一废弃铅锌矿区其他优势植物相比，利用五节芒和桑树为原料造纸的质量较好，且产品的重金属含量接近我国国家标准对食品包装用原纸的理化指标要求[61]。此外，桑叶可作为优质的禽畜蛋白饲料[62]，谭勇壁等对广西环江矿区周边重金属污染农田发展桑树种植产业的可行性进行了研究，结果表明，重金属污染桑叶对蚕的生物毒性小，养蚕产物生态安全，污染桑叶的蛋白质含量较高，养蚕所得的蚕丝、蚕蛹及蚕沙等产物的重金属含量符合国家相关行业标准[63]，该研究结果，为矿区周边蚕桑产业发展提供了重

要的理论参考。

5. 结论

1) 土壤重金属胁迫对桑树营养代谢各种生理指标均有一定的影响,其影响大小因重金属元素差异及作用浓度高低而不同;

2) 在土壤重金属复合胁迫条件下,各种重金属元素之间存在复杂的相互作用,共同影响桑树的营养代谢过程;

3) 桑树从土壤中吸收的重金属主要累积在根部,转移到地上部分叶片的重金属相对较少,低浓度的重金属对桑树营养代谢有一定促进作用;

4) 桑树叶片中的重金属元素含量对其营养代谢具有直接的影响,而土壤中的重金属元素,则通过桑树根部的吸收和转运,间接影响桑树的营养代谢过程;

5) 桑树具有较强的重金属抗耐性,在其耐受的范围内,可通过增加体内可溶性糖、水溶性蛋白质、总氨基酸等渗透调节物质的含量或其他代谢调节机制,增强其对重金属胁迫的抗性,从而维持正常的生长发育。

基金项目

广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室(桂科基字[2022] 60 号),广西现代蚕桑丝绸协同创新中心资金资助项目(2022GXCSSC18),桂西北地方资源保护与利用中心资助项目(桂教科研[2012] 9 号),广西高校大学生创新创业计划训练项目(202310605033)。

参考文献

- [1] 亏开兴,李乔仙,吴文荣,等. 桑叶与蚕沙作为畜禽饲料的营养价值评定[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2018, 33(2): 233-239.
- [2] 姜贝贝,罗阳,王洪荣. 桑叶的营养价值及作为畜禽饲料的研究进展[J]. 饲料工业, 2017, 38(5): 51-54.
- [3] 宁军权,李芳红,梁嘉俊,等. 食用桑叶粗蛋白粉的制备及蛋白质营养与加工特性评价[J]. 蚕业科学, 2018, 44(3): 435-441.
- [4] 徐瑛,张英,雷语. 蚕桑资源的多元价值及创新利用[J]. 湖南农业, 2020(11): 42.
- [5] 王忠,厉彦翔,骆新. 桑葚多糖抗疲劳作用及其机制[J]. 中国实验方剂学杂志, 2012, 18(17): 234-236.
- [6] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典(一部) [M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2010.
- [7] 郑晓珂,袁培培,克迎迎,等. 桑白皮水煎液及化学拆分组分降糖作用研究[J]. 世界科学技术-中医药现代化, 2014, 16(9): 1957-1967.
- [8] 董德刚,张秀英,刘小雪. 桑白皮不同有效部位群对小鼠呼吸道合胞病毒肺炎肺指数及肺组织病毒载量的影响[J]. 世界中西医结合杂志, 2016, 11(6): 785-787.
- [9] 黄康东,陈振烽,韦志惠. 河池市蚕桑产业高质量发展的思考与对策建议[J]. 广西蚕业, 2023, 60(2): 39-44.
- [10] 曾燕蓉,朱方容,潘启寿,等. 浅论桑树在广西石漠化土地利用中的重要性[J]. 广西蚕业, 2016, 53(4): 43-47.
- [11] 蓝必忠,滕伟国,宾荣佩,等. 5 个桑树品种在石漠化地区不同种植模式试验[J]. 广西蚕业, 2020, 57(1): 1-7.
- [12] Ibrahim, A., et al. (2023) 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>
- [13] 曾鹏,郭朝晖,韩白玉,等. 桑树(*Morus alba* L.)原位修复某尾矿区重金属污染土壤[J]. 环境化学, 2020, 39(5): 1395-1403.
- [14] 陈露,张芳,罗泽虎,等. 不同桑树品种幼苗对镉的耐受性[J]. 贵州农业科学, 2021, 49(1): 10-16.
- [15] 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, 2023.
- [16] 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, 2020, 45(1): 1-6.

- 2018, 33(3): 14-19.
- [17] 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.
- [18] 宋书巧, 吴浩东, 蓝唯源. 土壤镉污染对桑树的影响初探[J]. 资源开发与市场, 2008(1): 1-3+88.
- [19] 邱长玉, 朱方容, 林强, 等. 桑树叶片 SPAD 值及其与养蚕成绩的相关性[J]. 南方农业学报, 2015, 46(12): 2081-2086.
- [20] 戴凡炜, 李智毅, 王振江, 等. 桑树嫩芽营养成分含量及与口感的相关性分析[J]. 蚕业科学, 2018, 44(6): 968-972.
- [21] Mliya, S.P., Modi, A.T. and Testay, S.Z. (2018) Response of Soluble Sugar and Protein Content of Corn Grains to Simulated Hail Damage. *South African Journal of Plant and Soil*, **35**, 377-383.
<https://doi.org/10.1080/02571862.2018.1446222>
- [22] 郭王子杰, 陈一博, 于雪泽, 等. 铅胁迫下早开莖菜的耐性及富集转运[J]. 草业科学, 2023, 40(2): 338-351.
- [23] 黄筱涵. 铅胁迫对凹叶厚朴幼苗生长与生理特性的影响[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [24] 张泽锟, 张辰阳, 汪洋, 等. 不同质量分数生长素对 Cd 胁迫的香樟幼苗生理生化特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(5): 41-47.
- [25] 黄润生, 詹润钧, 陈壁煌, 等. 基于代谢组学的不同桑品种桑叶菜品质比较研究[J]. 蚕业科学, 2022, 48(4): 340-350.
- [26] 高绘菊, 付信芝, 董法宝, 等. 桑树内生拮抗细菌枯草芽孢杆菌 L144 对植物生长及营养代谢的影响[J]. 蚕业科学, 2010, 36(2): 214-220.
- [27] 岑忠用, 苏江, 覃勇荣, 等. 宜州市不同桑树品种生理生化性状研究[J]. 中国农学通报, 2009, 25(23): 254-257.
- [28] 严新添, 夏柳静, 胡华清, 等. 广西宜州市龙头锰矿床地质特征及深部找矿研究[J]. 地质与勘探, 2017, 53(1): 78-86.
- [29] 李旺霞, 陈彦云. 土壤水分及其测量方法的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(10): 335-339.
- [30] 吴淑娟, 任运涛, 吴彩霞, 等. 草地土壤 pH 值测定方法比较研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(2): 343-348.
- [31] 田云飞, 安俊芳, 陶士敏. 重铬酸钾氧化-分光光度法测定土壤有机碳含量的研究[J]. 现代化工, 2020, 40(4): 231-235.
- [32] 赵立红, 刘亚丽. 两种酸介质与国标方法测定土壤全磷的对比[J]. 光谱实验室, 2009, 26(2): 320-323.
- [33] 谢学俭, 陈晶中, 王正梅, 等. 土壤速效氮速效磷指标测定方法研究[J]. 江苏农业科学, 2007, 35(5): 235-237+251.
- [34] 张薇, 付昀, 李季芳, 等. 基于凯氏定氮法与杜马斯燃烧法测定土壤全氮的比较研究[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 172-175.
- [35] 孔凡伟. 简述土壤水解氮的测定方法[J]. 黑龙江农业科学, 2010(4): 159-160.
- [36] 李燕群. 原子吸收光谱法在重金属铅镉分析中的应用进展[J]. 冶金分析, 2008(6): 33-41.
- [37] 张宪政. 作物生理研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1992: 139-145.
- [38] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 190-191.
- [39] 王进, 王刚, 罗丽娟, 等. 茚三酮比色法测定聚谷氨酸含量的研究[J]. 食品与发酵科技, 2019, 55(2): 98-101.
- [40] 刘斌, 陈桂芬, 黄玉溢, 等. 广西桑园土壤养分状况及丰缺分级[J]. 南方农业学报, 2011, 42(2): 164-167.
- [41] 张信宝, 王世杰, 曹建华, 等. 西南喀斯特山地水土流失特点及有关石漠化的几个科学问题[J]. 中国岩溶, 2010, 29(3): 274-279.
- [42] 闫钊全, 刘琦, 邓大鹏, 等. 表层岩溶裂隙带土壤地表流失/地下漏失室内模拟实验[J]. 中国岩溶, 2022, 41(2): 240-248.
- [43] 黄艳波, 吴福忠, 杨玉盛, 等. 湿润亚热带森林锰、铜、锌随降雨分配的迁移动态特征[J]. 环境科学学报, 2021, 41(11): 4710-4719.
- [44] 陈丹利, 刘冠男, 行正松, 等. 河南栾川钼铅锌多金属矿集区土壤重金属累积及源解析[J]. 岩矿测试, 2023, 42(4): 839-851.
- [45] 张永亮, 于铁峰, 郝凤. 施肥和混播对人工草地土壤速效养分含量的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(9): 88-96.
- [46] 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.
- [47] 张嘉桐, 关颖慧, 司莉青, 等. Pb^{2+} 、 Cd^{2+} 复合胁迫对桑树光合作用的影响[J]. 北京林业大学学报, 2018, 40(4): 16-23.
- [48] 乔永, 周金星, 王小平. Pb 、 Cd 复合胁迫对桑树种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(4): 32-40.
- [49] 耿丽莎, 杨再福, 许志楠, 等. 梯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.
- [50] 王谢, 赵兴, 上官宇先, 等. 废弃铅锌矿复耕栽桑 14 年后桑树的镉富集特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(5): 1178-1184.
- [51] 王庆成, 张军, 牛玉贞, 等. 高产夏玉米养分吸收分配规律的研究[J]. 土壤肥料, 1993(3): 23-27.
- [52] 曾燕蓉, 林强, 石华月, 等. 广西主要桑树品种的耐旱性、耐盐性鉴定及植株剩余叶片叶绿素特性的分析[J]. 广西蚕业, 2022(4): 5-13.
- [53] 杨洪升, 吴恒梅, 薛春梅, 等. 铬-铜复合胁迫对凤仙花种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2018, 37(8): 9-11+15.
- [54] 张玉秀, 李林峰, 柴团耀, 等. 锰对植物毒害及植物耐锰机理研究进展[J]. 植物学报, 2010, 45(4): 506-520.
- [55] 殷宪强, 王国栋, 孙慧敏, 等. 干旱条件下锌、锰肥对玉米叶绿素含量的影响[J]. 中国农学通报, 2004, 20(6): 196-198+226.
- [56] 卢圣凡, 尹世杰, 王超, 等. 镉胁迫对忍冬根系形态与根系分泌物的影响[J]. 山东农业科学, 2023, 55(8): 96-100.
- [57] 穆海婷, 王英哲, 苗一凡, 等. 重金属铜和铅胁迫对东方山羊豆幼苗生长及生理特性的影响[J]. 草业学报, 2022, 31(11): 139-146.
- [58] 陈爽, 姚欢, 袁林, 等. 不同产地和品种桑叶游离氨基酸主成分分析及综合评价[J]. 天然产物研究与开发, 2023, 35(6): 938-948.
- [59] 徐晨阳, 毛晓瑜. 不同浓度酸雨对镉污染下桑树幼苗生物量和生理特性的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(12): 2112-2120.
- [60] 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.
- [61] 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.
- [62] 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.
- [63] 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.