

土壤重金属在桑树体内的分配及富集特征研究

杨丹妮¹, 覃家蕊¹, 覃晟², 蒙恩如¹, 刘旭辉^{1*}, 覃勇荣^{1*}

¹河池学院化学与生物工程学院, 广西 河池

²河池市产品质量监督检验所, 广西 河池

收稿日期: 2024年6月2日; 录用日期: 2024年7月4日; 发布日期: 2024年7月31日

摘要

为了探讨利用桑树作为土壤重金属污染修复树种的可行性, 以桂西北某锰矿周边的桑园作为研究样地, 采集其土壤、桑树根部、茎部、皮部及叶片样品, 用湿法消解—火焰原子吸收光谱法, 测定了样品中的Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Pb等6种重金属元素的含量, 分析了不同调查样地桑树根部土壤的单因子污染指数、内梅罗综合污染指数及地累积指数。结果表明: 1) 调查样地桑园土壤中的Zn为无污染到中度污染, Pb为中度污染到强污染, Mn和Cd均达到重度污染。2) 桑树对重金属具有较强的耐受性, 但对不同重金属的吸收、富集和转运能力有一定的差异。3) 在被测的6种重金属元素中, 桑树对Cr、Zn、Cu的富集能力相对较强, 对Pb、Cd、Mn的富集能力相对较弱; 桑树对Cr和Mn的转运能力相对较强, 对Pb的转运能力最弱, 其吸收的重金属元素主要是累积在根部。因为桑树对锰等重金属复合胁迫具有较强的耐性, 同时具有一定的吸收和转运能力, 经济效益高, 所以, 桑树可用于土壤重金属污染的植物修复。

关键词

土壤重金属, 复合污染, 植物修复, 桑树, 富集特征

Study on Distribution and Enrichment Characteristics of Heavy Metals in Soil within Mulberry Trees

Danni Yang¹, Jiarui Qin¹, Sheng Qin², Enru Meng¹, Xuhui Liu^{1*}, Yongrong Qin^{1*}

¹School of Chemistry and Bio-Engineering, Hechi University, Hechi Guangxi

²Hechi Institute for Product Quality Supervision and Inspection, Hechi Guangxi

Received: Jun. 2nd, 2024; accepted: Jul. 4th, 2024; published: Jul. 31st, 2024

*通讯作者。

文章引用: 杨丹妮, 覃家蕊, 覃晟, 蒙恩如, 刘旭辉, 覃勇荣. 土壤重金属在桑树体内的分配及富集特征研究[J]. 土壤科学, 2024, 12(3): 167-181. DOI: 10.12677/hjss.2024.123020

Abstract

In order to explore the feasibility of using mulberry trees as tree species for soil heavy metal pollution remediation, mulberry fields around a manganese mine in northwest Guangxi were used as research site. Samples of soil, mulberry roots, stems, bark, and leaves were collected. The content of six heavy metal elements, including Cd, Cr, Cu, Zn, Mn, Pb, in the samples was determined using wet digestion flame atomic absorption spectroscopy. The single factor pollution index, Nemero comprehensive pollution index, and geo-accumulation index of mulberry root soil in different survey sites were analyzed. The results showed that: 1) Zn in the surveyed mulberry orchard soil ranged from no pollution to moderate pollution, Pb ranged from moderate pollution to strong pollution, and both Mn and Cd reached severe pollution. 2) Mulberry trees have strong tolerance to heavy metals, but there are certain differences in their ability to absorb, enrich, and transport different heavy metals. 3) Among the six tested heavy metal elements, mulberry trees have relatively strong enrichment abilities for Cr, Zn, and Cu, while their enrichment abilities for Pb, Cd, and Mn are relatively weak; Mulberry trees have relatively strong transport capacity for Cr and Mn, while their transport capacity for Pb is the weakest. The heavy metal elements they absorb are mainly accumulated in the roots. Due to the strong tolerance of mulberry trees to combined stress of heavy metals such as manganese, as well as their ability to absorb and transport, and high economic benefits, mulberry trees can be used for phytoremediation of soil heavy metal pollution.

Keywords

Heavy Metal of Soil, Combined Pollution, Plant Restoration, Mulberry, Enrichment Characteristics

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

广西矿产资源丰富，河池是著名的有色金属之乡，但由于不合理开采及其他诸多原因，导致矿区周边农地受到一定程度的重金属污染。土壤重金属污染是危害最大的环境问题之一[1]，在重金属污染土壤中种植的农作物，其生长发育必定受到重金属的不良影响，使其产量减少、品质下降[2]。人类如果长期食用重金属污染的农产品，重金属通过食物链进入并累积在人体中，可能对人的健康造成严重危害[3]，因而土壤重金属污染治理一直是人们高度关注的热点问题。

目前，重金属污染土壤的修复技术，主要包括物理化学修复和植物修复[4]，物理修复中的大部分方法，仅适用于污染物含量不高且取土方便的地区[5]。深耕翻土法容易破坏土壤结构，降低土壤肥力[6]；换土法仅适用于小面积污染治理[7]；电动修复法能耗和成本较高[8]。植物修复可分为植物挥发、植物固定和植物提取，是目前修复重金属污染土壤的一种有效途径和方法[9] [10]。其中，植物挥发多应用于挥发性较强的重金属污染土壤修复，对汞和硒污染土壤的处理效果比较好[11]；植物固定技术主要通过降低重金属活性来实现[12]；植物提取技术主要是利用植物根系的吸收能力及植物的抗逆性和运转能力，减少重金属在土壤中的累积[13]。

我国栽培桑树历史悠久，是世界上第一个开始种桑养蚕的国家。被誉为树中王者的桑树，不仅种类多，品质好，而且浑身是宝[14]，其组织器官含有丰富的营养成分，不但蕴含多种抗氧化物质，还含有十

几种氨基酸[15]。董中凯[16]等人研究发现,对重金属复合污染区域进行植物修复时,可以优先考虑种植桑树。曾鹏[17]等人的相关研究结果表明,桑树可对尾矿区重金属污染的土壤进行原位修复。陈明[18]等人研究表明,桑树生长不受其周边环境的影响,且耐受性很强,可以种植在尾矿等土壤污染严重的地方。覃勇荣[19]等人研究了 EDTA 对桑树幼苗吸收 Pb 的影响,发现桑树具有较大的土壤铅污染修复潜力。Taghizadeh [20]等人研究了伊朗阿拉克城市景观中栽培桑树的重金属累积情况,结果发现,桑树果实和桑叶中累积的多种重金属元素,其含量已大大超过了伊朗食品安全国家标准和联合国相关机构规定的食品安全限值,对人体健康具有较大的潜在风险。

为了进一步说明桑树对重金属污染土壤的修复潜力,本研究选取广西河池市宜州区龙头锰矿周边的桑园为研究对象,通过对桑树不同组织器官及其根部土壤 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Pd 六种重金属元素含量的测定,分析桑树不同组织器官对被测重金属元素的富集能力及转运能力,旨在充分发挥桑树的生态和经济效益,促进区域经济发展,为有色金属矿区及周边地区土地资源的合理利用和土壤重金属污染治理提供理论支持。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域概况

本研究区域位于河池市宜州区龙头乡锰矿周边受重金属污染的桑园。龙头锰矿位于宜州正西方向约 60 km 处,属于典型的海相沉积型矿床,主要以氧化锰和碳酸锰为主。该矿床于 20 世纪 50 年代被发现并探明,经过 60 多年的开采,可采资源储量明显不足。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[21]。龙头乡属亚热带季风气候区,年均气温为摄氏 19.6℃~20.2℃,年日照时数为 1496.7 h,年平均降水量为 1600 mm。

2.2. 样品采集及处理

2022 年 7 月至 9 月,按照常规的采样方法,采集了 6 个矿区周边桑园调查样地的样品,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 m 的五点采样,选定桑树采样的植株后,同时采集相应桑树根部 0~20 cm 的表土,过 2 mm 尼龙筛,按照四分法取适量装入聚乙烯密封袋中保存。

采集桑树样品后,及时带回实验室,先用自来水冲洗干净样品中的灰尘和泥土等杂质,然后用纯净水对样品进行超声洗涤,最后再用超纯水反复清洗 3 次,将样品晾干后,将其分为根、茎、叶、皮 4 部分,置于 105℃电热恒温鼓风干燥箱内杀青 30 min,65℃烘干至恒重,然后再用微型植物样品粉碎机粉碎,过 100 目筛[22],最后装入塑料自封袋中干燥保存。同时,剔除桑树根部土壤样品中的砾石等异物,室内自然风干后,磨碎过筛,置于塑料自封袋中保存,备用。

2.3. 实验方法

2.3.1. 重金属含量的测定

土壤和植物样品重金属含量的测定,用湿法消解-火焰原子吸收光谱法,具体参考陈晓红[23]和范春辉的方法[24]。

2.3.2. 研究区域土壤重金属污染评价

利用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法、地累积污染指数法,分析研究区域土壤的重金属污染情况,对土壤污染程度进行评价,根据植物的重金属富集系数和重金属转运系数,探讨利用桑树修复该研究区域土壤重金属污染的可行性[25]-[30]。

2.3.3. 数据处理分析

样品测定设置 3 个平行, 结果取平均值, 实验数据的统计用 Excel 2010 进行, 桑树不同组织器官中的重金属含量数据图用 Origin 2018 进行绘制, 桑树根部土壤与桑树不同组织器官重金属含量的相关性分析用 SPSS 27.0 进行。

3. 结果与分析

3.1. 不同调查样地桑树根部土壤的重金属含量

不同调查样地桑树根部土壤重金属含量的测定结果见表 1。由此可知, 在被测的重金属元素中, Cd、Cr、Zn、Cu、Mn、Pb 的含量分别为: 4.03~6.54 mg/kg、15.64~27.44 mg/kg、113.94~138.37 mg/kg、12.56~24.92 mg/kg、4686.34~27033.64 mg/kg、76.21~189.21 mg/kg。参照广西土壤重金属含量的背景值[31], LT 采样点镉、锌、锰、铅的含量均超过广西土壤背景值, 铬、铜的平均含量则低于广西土壤背景值。其中, 锰和镉的含量分别超过广西土壤背景值的 96.32 倍和 53.89 倍, 锌和铅的含量分别是广西背景值的 2.21 倍和 7.32 倍, 铬和铜的含量分别是广西土壤背景值的 0.31 和 0.94 倍。

Table 1. Heavy metal content in the root soil of mulberry trees in different survey sites (mg/kg)

表 1. 不同调查样地桑树根部土壤的重金属含量(mg/kg)

样品编号	Cd	Cr	Cu	Zn	Mn	Pb
LT1	5.51 ± 0.03c	25.57 ± 1.51ab	18.83 ± 0.98ab	118.23 ± 1.49d	27033.64 ± 388.39a	182.27 ± 10.47a
LT2	4.03 ± 0.01d	23.09 ± 0.89b	16.70 ± 0.37b	113.94 ± 0.87b	5832.36 ± 25.74d	76.21 ± 5.37a
LT3	6.54 ± 0.04ab	18.33 ± 0.28c	18.68 ± 0.44	129.92 ± 0.30b	22826.04 ± 456.4c	137.34 ± 0.01a
LT4	5.97 ± 0.12bc	15.64 ± 0.46d	24.92 ± 0.04	122.85 ± 0.89c	24859.44 ± 88.29b	189.21 ± 6.19a
LT5	5.60 ± 0.51c	25.78 ± 0.66ab	12.56 ± 0.05ab	138.37 ± 0.61a	4686.34 ± 36.19e	81.44 ± 4.18a
LT6	5.18 ± 0.14c	27.44 ± 0.34a	14.38 ± 1.70a	122.99 ± 2.27c	5053.97 ± 39.60e	107.75 ± 1.37a

注: ① 大写字母“LT”表示样地名称; ② 同一行数据中不同小写字母表示差异显著($p < 0.05$), 下同。

对表 1 数据的比较分析可知, 桑树根部土壤的重金属含量高低排序为: Mn > Pb > Zn > Cr > Cu > Cd, LT1 采样点 Mn 含量最高, 达到 27033.64 mg/kg, 表明桑树对 Mn 具有很强的耐受性, 能在 Mn 元素污染严重的土壤中正常生长。

3.2. 不同调查样地桑园土壤重金属污染评价

桑树根部土壤的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数计算结果见表 2。由此可知, 不同调查样地桑树根部土壤锰、铜、锌、铬、镉和铅的单因子污染指数分别为 29.99~173.03、0.67~1.32、2.03~2.46、0.22~0.38、39.70~64.43 和 4.32~10.73。单因子污染指数平均值小于 1 的是铜和铬, 说明其未受这两种重金属的污染; 锰、锌、镉、铅的单因子污染指数均大于 1, 说明该研究区域的桑园土壤均受到这 4 种重金属的污染; 单因子污染指数大小排序为: 锰 > 镉 > 铅 > 锌 > 铜 > 铬, 说明在调查样地被测的重金属元素中, 锰的污染最为严重。根据内梅罗综合污染指数的等级划分标准, LT 各采样点的综合污染指数均大于 5, 属于重污染。表 3 为不同调查样地被测重金属元素地累积污染指数的计算结果, 由此可知, 铬和铜的地累积污染指数均小于 0, 说明未受污染。锌的地累积污染指数 $0 < I_{geo-Zn} < 1$, 为 1 级污染; 铅的地累积污染指数 $1 < I_{geo-Pb} < 3$, 为 2~3 级污染; 2/3 以上采样点镉和锰的地累积污染指数超过 5, 为 6 级污染, 表明该研究区域桑园土壤受到了重度的镉和锰的污染。

Table 2. Single factor pollution index and Nemeró pollution index of mulberry root soil in different survey sites
表 2. 不同调查样地桑树根部土壤的单因子污染指数和内梅罗污染指数

采样点	Pi_{-Mn}	Pi_{-Cu}	Pi_{-Zn}	Pi_{-Cr}	Pi_{-Cd}	Pi_{-Pb}	P_N
LT1	173.03	1.00	2.10	0.35	54.29	10.34	38.43
LT2	37.33	0.89	2.03	0.32	39.70	4.32	28.10
LT3	146.10	0.99	2.31	0.25	64.43	7.79	45.60
LT4	159.11	1.32	2.18	0.22	58.82	10.73	41.63
LT5	29.99	0.67	2.46	0.36	55.17	4.62	39.03
LT6	32.35	0.76	2.19	0.38	51.03	6.11	36.10
平均值	96.32	0.94	2.21	0.31	53.91	7.32	38.15

Table 3. Geo-accumulation index of mulberry root soil in different survey sites
表 3. 不同调查样地桑树根部土壤的地累积污染指数

采样点	Cd	Cr	Cu	Zn	Mn	Pb
LT1	5.18	-2.08	-0.59	0.49	6.85	2.79
LT2	4.73	-2.23	-0.76	0.43	4.64	1.53
LT3	5.42	-2.56	-0.60	0.62	6.61	2.38
LT4	5.29	-2.79	-0.18	0.54	6.73	2.84
LT5	5.20	-2.07	-1.17	0.71	4.32	1.62
LT6	5.09	-1.98	-0.97	0.54	4.43	2.03
平均值	5.15	-2.29	-0.71	0.56	5.60	2.20

根据不同采样点桑园土壤被测重金属元素地累积污染指数的平均值,其大小排序为: 锰 > 镉 > 铅 > 锌 > 铜 > 铬。该结果与单因子污染指数的计算结果一致。

3.3. 桑树不同组织器官中的重金属含量

桑树不同组织器官中的重金属含量测定结果见图 1~4。由图 1 可知, 不同采样点桑树根部 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Pd 的含量分别为: 1.19~1.96 mg/kg、1.20~2.14 mg/kg、4.20~9.34 mg/kg、27.92~52.72 mg/kg、304.21~2106.67 mg/kg、20.27~51.76 mg/kg, 其平均含量的高到低排序为: Mn > Pb > Zn > Cu > Cr > Cd。由图 2 可知, 不同采样点桑树茎部 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Pd 的含量分别为: 0~0.85 mg/kg、8.99~13.00 mg/kg、1.67~23.97 mg/kg、16.35~23.86 mg/kg、370.73~408.64 mg/kg、4.61~5.79 mg/kg, 其平均含量的高到低排序为: Mn > Zn > Cr > Pb > Cu > Cd。由图 3 可知, 不同采样点桑树叶部 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Pd 的含量分别为: 0.00~0.48 mg/kg、11.78~30.50 mg/kg、1.53~9.46 mg/kg、23.41~64.45 mg/kg、439.78~920.10 mg/kg、13.13~18.17 mg/kg, 其平均含量高到低排序为: Mn > Zn > Pb > Cr > Cu > Cd。由图 4 可知, 不同采样点桑树皮部 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn、Pd 的含量分别为: 0 mg/kg、2.23~7.52 mg/kg、1.78~4.60 mg/kg、9.19~49.79 mg/kg、415.14~616.03 mg/kg、5.65~8.30 mg/kg, 其平均含量高低排序为: Mn > Zn > Pb > Cr > Cu > Cd, 与叶片中的重金属含量高低排序一致。在被测的 6 种重金属元素中, 桑树不同组织器官中的重金属含量均为 Mn 最高、Cd 最低; 其余被测的重金属元素, 其含量高低排序在桑树不同组织器官中有一定的差异。

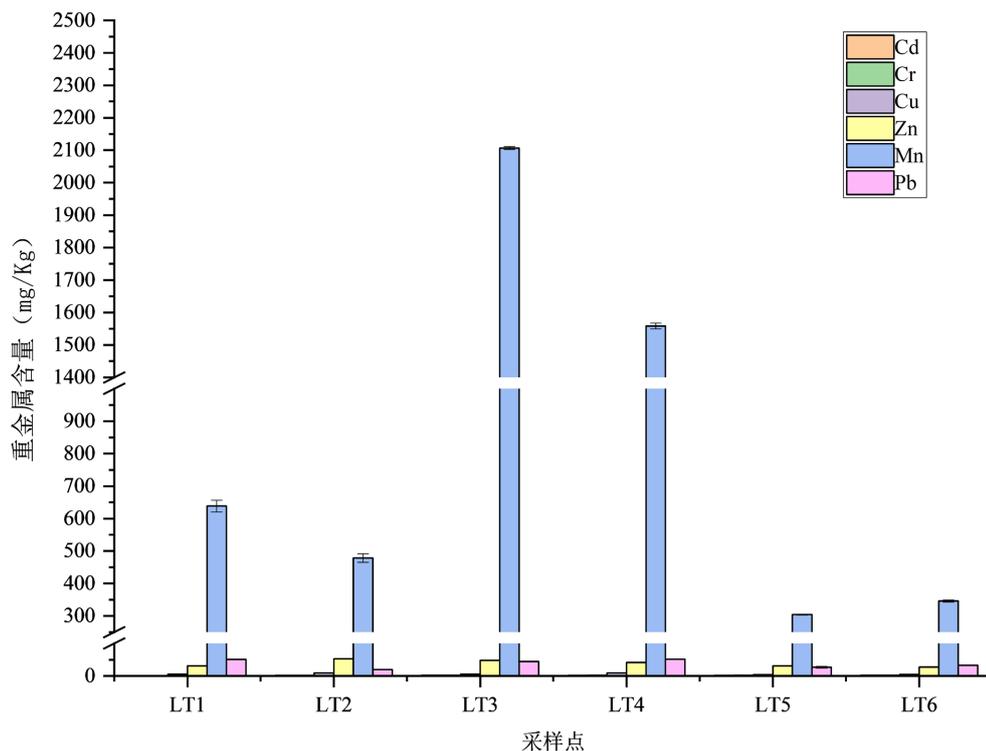


Figure 1. Heavy metal content in the roots of mulberry trees at different sampling points
图 1. 不同采样点桑树根部重金属含量

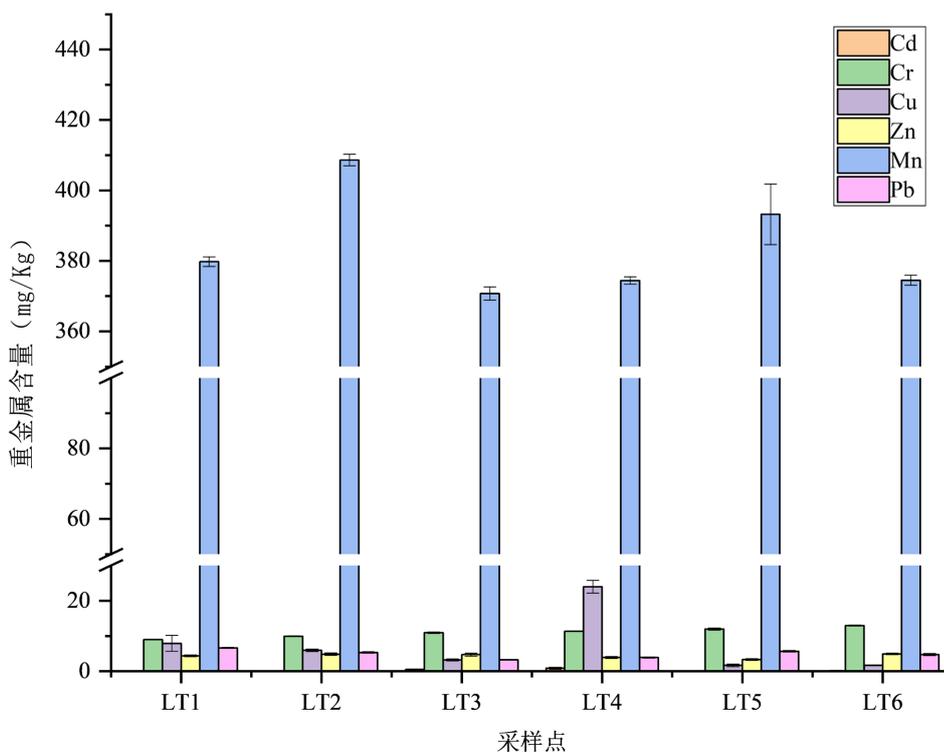


Figure 2. Heavy metal content in mulberry stem at different sampling points
图 2. 不同采样点桑树茎部重金属含量

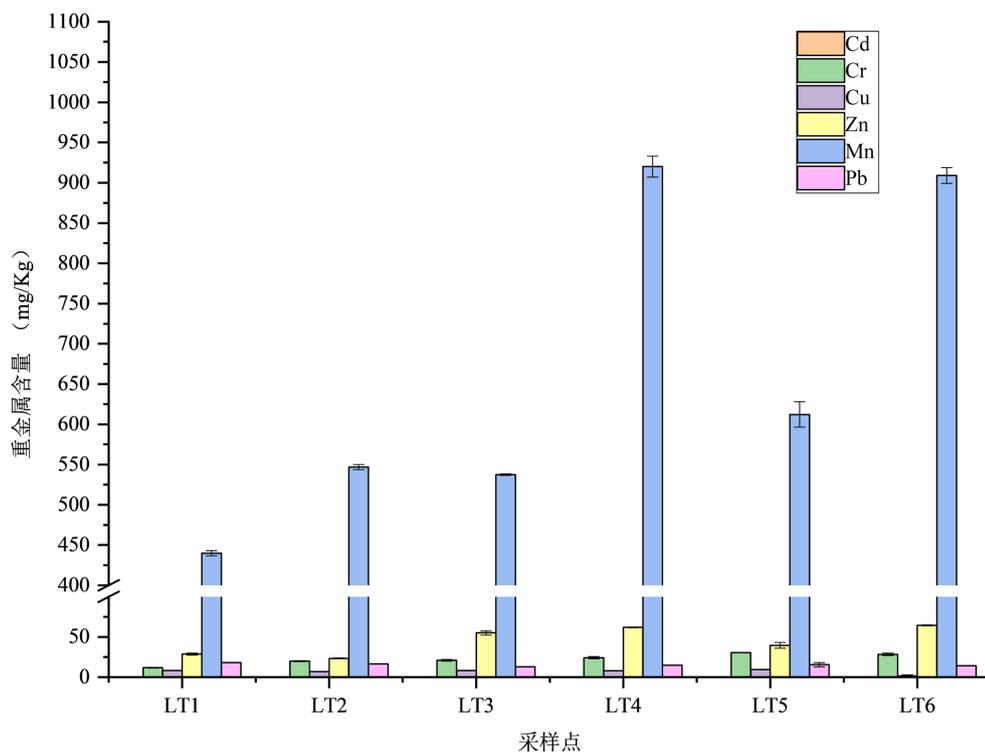


Figure 3. Heavy metal content in mulberry leaves at different sampling points

图 3. 不同采样点桑树叶部重金属含量

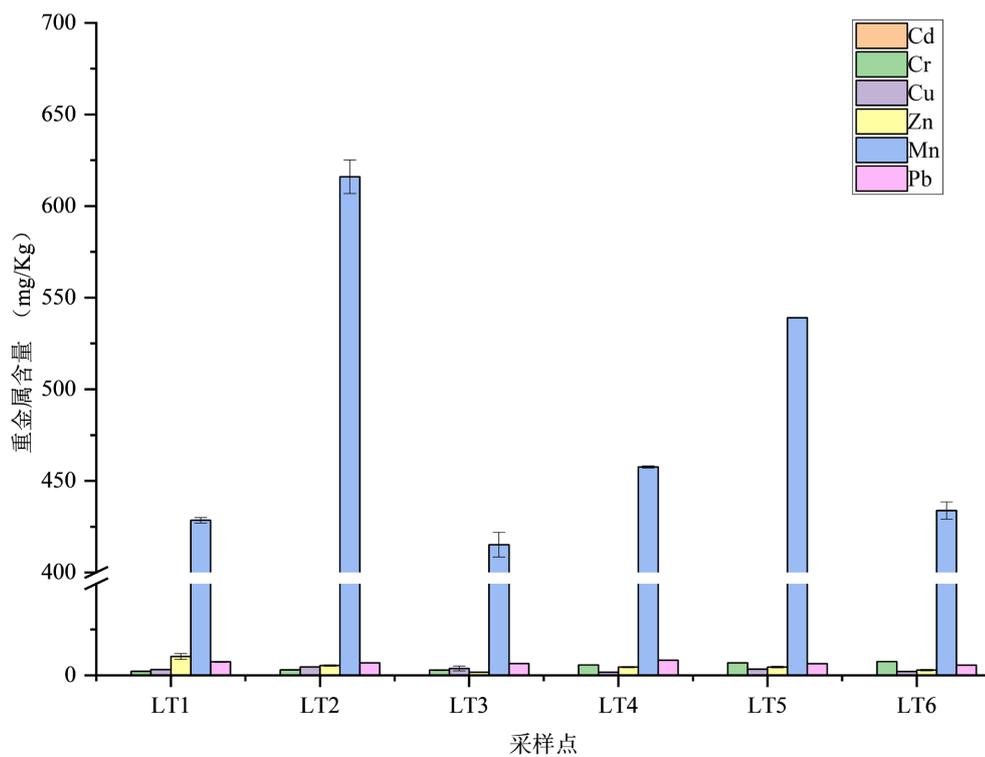


Figure 4. Heavy metal content in mulberry bark at different sampling points

图 4. 不同采样点桑树皮部重金属含量

3.4. 桑树不同组织器官中的重金属富集系数

桑树不同组织器官的重金属富集系数计算结果见表 4。除了 LT3~LT6 采样点桑叶的 Cr 富集系数高于 1 以外, 其余样地桑树不同组织器官对六种被测重金属元素的富集系数均小于 1。除 LT2 之外, 桑树根部对 6 种被测元素 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn 和 Pb 的富集系数均小于 0.5, 其富集系数平均值大小排序为: $Cu > Zn > Cd > Pb > Cr > Mn$; 茎部的重金属富集系数平均值大小排序为: $Cr > Cu > Zn > Mn > Cd、Pb$; 叶部的重金属富集系数平均值大小排序为: $Cr > Cu > Zn > Pb > Mn > Cd$; 皮部的重金属富集系数平均值大小排序为: $Cr > Zn > Cu > Pb > Mn > Cd$ 。

由此可知, 桑树对 Cr、Zn、Cu 的富集能力相对较强, 而对 Pb、Cd、Mn 的富集能力相对较弱。

Table 4. Heavy metal enrichment coefficients in different tissues and organs of mulberry trees

表 4. 桑树不同组织器官的重金属富集系数

富集系数	Cd	Cr	Cu	Zn	Mn	Pb
LT1-根	0.22	0.05	0.30	0.26	0.02	0.28
LT2-根	0.40	0.07	0.56	0.46	0.08	0.27
LT3-根	0.30	0.10	0.30	0.37	0.09	0.33
LT4-根	0.29	0.12	0.37	0.34	0.06	0.27
LT5-根	0.29	0.08	0.33	0.23	0.06	0.33
LT6-根	0.34	0.07	0.32	0.23	0.07	0.31
平均	0.31	0.08	0.36	0.32	0.06	0.30
LT1-叶	0.06	0.46	0.43	0.24	0.02	0.10
LT2-叶	0.08	0.87	0.42	0.21	0.09	0.22
LT3-叶	0.07	1.15	0.44	0.42	0.02	0.10
LT4-叶	0.00	1.54	0.32	0.50	0.04	0.08
LT5-叶	0.00	1.18	0.75	0.29	0.13	0.19
LT6-叶	0.00	1.04	0.03	0.52	0.18	0.13
平均	0.04	1.04	0.40	0.36	0.08	0.14
LT1-皮	0.00	0.09	0.17	0.42	0.02	0.04
LT2-皮	0.00	0.13	0.28	0.23	0.11	0.09
LT3-皮	0.00	0.16	0.20	0.07	0.02	0.05
LT4-皮	0.00	0.36	0.07	0.18	0.02	0.04
LT5-皮	0.00	0.26	0.27	0.16	0.12	0.08
LT6-皮	0.00	0.27	0.15	0.12	0.09	0.05
平均	0.00	0.21	0.19	0.20	0.06	0.06

续表

LT1-茎	0.00	0.35	0.42	0.18	0.01	0.04
LT2-茎	0.01	0.43	0.36	0.21	0.07	0.07
LT3-茎	0.07	0.60	0.17	0.18	0.02	0.02
LT4-茎	0.14	0.73	0.96	0.16	0.02	0.02
LT5-茎	0.00	0.46	0.13	0.12	0.08	0.07
LT6-茎	0.02	0.47	0.12	0.19	0.07	0.04
平均	0.04	0.51	0.36	0.17	0.05	0.04

3.5. 桑树不同组织器官的重金属转运系数

桑树不同组织器官对被测重金属元素的转运系数计算结果见表 5。由此可知, 桑树叶部的 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn 和 Pb 转运系数分别为: 0.00~0.24、9.82~14.89、0.33~2.25、0.44~2.31、0.26~2.63 和 0.29~0.81, 其平均值大小排序为: Cr > Zn > Mn > Cu > Pb > Cd; 桑树皮部的 Cd、Cr、Cu、Zn、Mn 和 Pb 转运系数分别为 0、1.52~3.93、0.19~0.81、0.19~1.59、0.20~1.77 和 0.14~0.33, 其平均值大小排序为: Cr > Cd > Mn > Zn > Cu > Pb; 桑树茎部的 6 种被测重金属元素转运系数为: 0.00~0.49、5.76~7.49、0.37~2.60、0.45~0.85、0.18~1.29 和 0.07~0.26, 其平均值大小排序为: Cr > Cu > Mn > Zn > Cd > Pb。由此可知, 桑树不同组织器官对重金属元素的转运能力有较大的差异, 在本研究中, 桑树对 Cr 和 Mn 的转运能力相对较强, 对 Pb 的转运能力最弱。

Table 5. Comparison of heavy metal transport coefficients in different tissues and organs of mulberry trees

表 5. 桑树不同组织器官的重金属转运系数比较

转运系数	Cd	Cr	Cu	Zn	Mn	Pb
LT1-叶	0.00	9.82	1.44	0.92	0.69	0.35
LT2-叶	0.20	12.04	0.76	0.44	1.14	0.81
LT3-叶	0.24	11.07	1.45	1.14	0.26	0.29
LT4-叶	0.00	13.34	0.88	1.48	0.59	0.29
LT5-叶	0.00	14.25	2.25	1.26	2.01	0.58
LT6-叶	0.00	14.89	0.33	2.31	2.63	0.43
平均	0.07	12.57	1.19	1.26	1.22	0.46
LT1-皮	0.00	1.86	0.55	1.59	0.67	0.14
LT2-皮	0.00	1.79	0.49	0.50	1.29	0.33
LT3-皮	0.00	1.52	0.67	0.19	0.20	0.14
LT4-皮	0.00	3.13	0.19	0.54	0.29	0.16
LT5-皮	0.00	3.18	0.81	0.71	1.77	0.24
LT6-皮	0.00	3.93	0.47	0.52	1.25	0.17
平均	0.00	2.57	0.53	0.68	0.91	0.20

续表

LT1-茎	0.00	7.49	1.39	0.69	0.59	0.13
LT2-茎	0.20	5.99	0.64	0.45	0.85	0.26
LT3-茎	0.25	5.76	0.57	0.47	0.18	0.07
LT4-茎	0.49	6.27	2.60	0.46	0.24	0.08
LT5-茎	0.00	5.59	0.40	0.52	1.29	0.21
LT6-茎	0.07	6.81	0.37	0.85	1.08	0.14
平均	0.17	6.32	1.00	0.57	0.71	0.15

3.6. 相关性分析

为说明不同调查样地桑树根部土壤重金属含量与其不同组织器官重金属含量的相关性, 可对其被测重金属元素的相关性进行分析, 结果见表 6~9。

由表 6 可知, 桑树根部的 Zn 含量与根部土壤的 Cd 含量有显著正相关, 桑树根部 Cr 含量与根部土壤的 Zn 含量有显著正相关, 桑树根部的 Pb 含量与其根部土壤的 Mn 和 Pb 含量均有极显著正相关; 桑树根部其余被测元素含量与其根部土壤被测重金属元素含量有一定的相关性, 但不显著。由表 7 可知, 桑树茎部 Cu 含量与其根部土壤的 Mn 和 Pb 含量有显著正相关, 桑树茎部的 Zn 含量与其根部土壤的 Cr 含量有显著负相关; 桑树茎部其余被测元素含量与其根部土壤被测重金属元素含量有一定的相关性, 但不显著。由表 8 可知, 桑树叶部的 Cr 含量与其根部土壤 Mn 含量有显著负相关; 桑树叶部其余被测元素含量与其根部土壤被测重金属元素含量有一定的相关性, 但不显著。由表 9 可知, 桑树皮部的 Mn 含量与其根部土壤的 Pb 含量有显著负相关, 桑树皮部的 Pb 含量与其根部土壤的 Mn 和 Pb 含量均有显著正相关; 桑树皮部其余被测元素含量与土壤被测重金属元素含量有一定的相关性, 但不显著。

Table 6. Correlation between heavy metal content in root soil and of mulberry root at different sampling points

表 6. 不同采样点桑树根部土壤重金属含量和桑树根部重金属含量的相关性

重金属	Cd _土	Cr _土	Cu _土	Zn _土	Mn _土	Pb _土	Cd _根	Cr _根	Cu _根	Zn _根	Mn _根	Pb _根
Cd _土	1											
Cr _土	0.212	1										
Cu _土	0.250	-0.092	1									
Zn _土	-0.492*	-0.262	-0.217	1								
Mn _土	-0.216	0.071	0.195	0.261	1							
Pb _土	0.006	-0.230	0.072	-0.013	0.546*	1						
Cd _根	-0.264	-0.030	0.011	0.282	-0.306	-0.191	1					
Cr _根	-0.448	-0.264	-0.119	0.535*	0.173	-0.157	-0.153	1				
Cu _根	-0.232	-0.051	-0.326	-0.148	0.129	0.162	0.008	-0.264	1			
Zn _根	0.469*	0.022	-0.297	-0.211	-0.272	-0.259	-0.025	-0.010	-0.040	1		
Mn _根	-0.225	-0.397	0.268	0.192	0.139	0.202	0.516*	0.143	-0.076	0.093	1	
Pb _根	0.149	-0.085	0.225	0.073	0.604**	0.778**	0.048	-0.127	-0.022	0.035	0.395	1

注: *在 $p < 0.05$ 水平(双尾), 相关性显著。**在 $p < 0.01$ 水平(双尾), 相关性显著。下表同。

Table 7. Correlation between heavy metal content in root soil and mulberry stem at different sampling points
表 7. 不同采样点根部土壤重金属含量与桑树茎部重金属含量的相关性

重金属	Cd _±	Cr _±	Cu _±	Zn _±	Mn _±	Pb _±	Cd _茎	Cr _茎	Cu _茎	Zn _茎	Mn _茎	Pb _茎
Cd _±	1											
Cr _±	0.212	1										
Cu _±	0.250	-0.092	1									
Zn _±	-0.492*	-0.262	-0.217	1								
Mn _±	-0.216	0.071	0.195	0.261	1							
Pb _±	0.006	-0.230	0.072	-0.013	0.546*	1						
Cd _茎	-0.163	-0.167	-0.136	0.144	-0.116	-0.107	1					
Cr _茎	-0.002	-0.033	0.034	0.033	-0.321	-0.222	0.479*	1				
Cu _茎	0.120	-0.368	0.282	0.203	0.489*	0.533*	-0.130	-0.432	1			
Zn _茎	-0.270	-0.487*	-0.335	0.205	-0.140	0.133	0.171	0.310	-0.201	1		
Mn _茎	-0.124	-0.196	-0.152	-0.244	0.028	-0.201	-0.132	-0.473	0.171	-0.386	1	
Pb _茎	-0.019	0.096	-0.101	0.077	-0.045	-0.110	-0.704**	-0.539*	0.231	-0.357	0.378	1

Table 8. Correlation between heavy metal content in root soil of mulberry trees and heavy metal content in mulberry leaves at different sampling points

表 8. 不同采样点桑树根部土壤重金属含量与桑树叶片重金属含量的相关性

重金属	Cd _±	Cr _±	Cu _±	Zn _±	Mn _±	Pb _±	Cd _叶	Cr _叶	Cu _叶	Zn _叶	Mn _叶	Pb _叶
Cd _±	1											
Cr _±	0.212	1										
Cu _±	0.250	-0.092	1									
Zn _±	-0.492*	-0.262	-0.217	1								
Mn _±	-0.216	0.071	0.195	0.261	1							
Pb _±	0.006	-0.230	0.072	-0.013	0.546*	1						
Cd _叶	0.180	-0.545	-0.064	0.157	-0.057	-0.254	1					
Cr _叶	-0.088	-0.061	-0.503	0.190	-0.674*	-0.239	0.371	1				
Cu _叶	0.221	0.032	0.195	-0.043	0.277	0.164	-0.019	-0.356	1			
Zn _叶	0.098	-0.448	-0.020	-0.198	-0.034	0.201	0.229	0.223	-0.206	1		
Mn _叶	0.058	-0.413	0.082	-0.181	-0.020	-0.026	0.176	0.133	-0.181	0.937**	1	
Pb _叶	0.175	0.334	0.148	0.140	-0.137	0.035	-0.177	0.110	-0.193	-0.747**	-0.752**	1

Table 9. Correlation between soil heavy metal content in mulberry root and mulberry bark at different sampling points
表 9. 不同采样点桑树根部土壤重金属含量与桑树皮部重金属含量的相关性

重金属	Cd _土	Cr _土	Cu _土	Zn _土	Mn _土	Pb _土	Cd _皮	Cr _皮	Cu _皮	Zn _皮	Mn _皮	Pb _皮
Cd _土	1											
Cr _土	0.212	1										
Cu _土	0.250	-0.092	1									
Zn _土	-0.492*	-0.262	-0.217	1								
Mn _土	-0.216	0.071	0.195	0.261	1							
Pb _土	0.006	-0.230	0.072	-0.013	0.546*	1						
Cd _皮	-0.074	-0.178	0.208	-0.048	0.402	0.229	1					
Cr _皮	-0.020	0.045	-0.011	0.061	-0.295	-0.132	-0.889**	1				
Cu _皮	0.002	0.170	-0.248	-0.233	-0.267	0.054	0.427	-0.566*	1			
Zn _皮	0.206	0.127	-0.045	-0.176	0.194	0.308	0.218	-0.325	0.259	1		
Mn _皮	0.014	0.055	-0.313	-0.018	-0.363	-0.670*	0.114	-0.102	0.017	0.197	1	
Pb _皮	-0.174	0.094	0.209	-0.049	0.515*	0.520*	0.408	-0.312	-0.037	0.435	-0.178	1

4. 讨论

4.1. 研究区域土壤重金属的来源及污染状况

人类社会经济活动是造成土壤重金属污染的重要原因[32]。广西碳酸岩分布区是典型的重金属地质高背景区，秦旭芝等人用溯源研究的方法，解析了桂西北某有色金属冶炼工业园区周边土壤重金属的来源及贡献率，结果表明，土壤中的 Cd、Hg、As、Pb、Cu、Zn 主要来源为冶炼活动，Cr、Ni 主要来源为地质高背景[33]。覃勇荣等人对广西宜州龙江河沿岸桑树种植的重金属污染风险进行了调查研究，测定了桑园土壤及桑树叶片中的 Mn、Cu、Zn、As、Hg、Se 等 6 种重金属元素含量，结果发现，部分桑园土壤的锰含量超过了广西土壤的背景值，存在轻度到中度的污染[34]。根据不同调查样地桑树根部土壤重金属含量的分析结果可知，本研究区域桑树根部土壤中的 Cd、Zn、Mn、Pb 四种重金属的含量明显超过了广西土壤的背景值，而 Cr 和 Cu 的含量则小于广西土壤的背景值。由单因子污染指数和内梅罗综合污染指数的计算结果可知，该调查区域重金属 Mn 的污染程度最为严重。在 LT 各采样点中，内梅罗综合污染指数均大于 5，根据该污染指数的分级标准，调查区域土壤中的重金属含量已达到重度污染等级，地累积污染指数的计算结果，也得到与之一致的结果。超过 2/3 的采样点， I_{geo-Cd} 和 I_{geo-Mn} 大于 5，说明调查样地土壤被测重金属元素的污染级别达到了 6 级，属于重度污染水平。究其原因，可能是由于长期过度的矿物开采及其他人为活动干扰所致，该锰矿开采时间已超过 60a，在许多有色金属矿区，由于粗放经营和管理不善等原因导致的环境污染问题十分常见，因此，重金属污染治理任重道远。

4.2. 桑树不同组织器官的重金属富集和转运能力

通过对桑树不同组织器官的重金属富集系数比较分析可知，桑树对 Cr、Zn 和 Cu 的富集能力较强，与李顺[35]等研究结果一致。也就是说，桑树能够从重金属复合污染的土壤中有效地吸收和累积这些元素。

相比之下, 桑树对 Cd、Mn 和 Pb 的富集能力相对较弱, 究其原因, 一方面可能与被测元素的化学性质及不同品种桑树的生物学特性(遗传特性)有关[36], 另一方面可能与栽培密度及土壤中不同重金属元素的含量有关。蒋诗梦等人对不同品种桑树镉的分布及富集规律进行了研究, 结果发现, 品种及种植密度对桑树不同组织器官镉的分布及富集具有较大影响, 从土壤中吸收的镉 50%分布在桑树根部[37], 本研究所得结果与之相似。植物对土壤重金属的富集和转运机制比较复杂, 在一定的浓度范围内, 当土壤中的重金属有效态含量较高时, 有利于植物根部的吸收和向地上组织运输[38]。根据桑树不同组织器官中的重金属转运系数分析, 桑树对 Cr 具有较强的转运能力, 意味着 Cr 离子在桑树体内能够比较容易从根部转运到其他组织器官, 因此主要累积在桑树的地上部分组织器官之中。相比之下, 桑树对 Pb 和 Cd 元素的转运能力相对比较弱, 表明这两种重金属元素在桑树体内的转运效率较低, 因此主要累积在桑树的根部。

4.3. 有色金属矿区桑树产品及资源的开发利用

桑树的利用价值比较高, 不仅具有良好的经济效益, 还具有较高的药用、饲用和食用价值[14]。根据我国药用植物的质量标准, 与本研究相关的重金属限值为: $Cd \leq 0.3 \text{ mg/kg}$, $Cu \leq 20.0 \text{ mg/kg}$, $Pb \leq 5.0 \text{ mg/kg}$ [39]。根据桑树不同组织器官重金属含量的测定结果, 比对我国药用植物的行业标准, 在本研究的 6 个采样点中, Cd 含量只有 LT1~6 采样点的桑树皮部、LT1~2 和 LT5~6 采样点的桑树茎部、LT4~6 采样点的桑树叶部没有超标; Cu 含量只有 LT4 采样点桑树茎部超标; Pb 含量只有 LT3、LT4、LT6 三个采样点的桑树茎部没有超标。因为国内药用植物质量标准中暂无 Zn、Mn、Cr 三种元素的限量值, 所以, 桑树不同组织器官中这些元素的含量是否超标无法判断。有人曾对蚕蛹中的砷、汞、硒、镉含量进行检测, 结果发现矿区及其周边地区的蚕蛹重金属超标问题尤为严重[40]。因此, 针对蚕桑产品重金属含量的超标情况, 在对其进行开发利用时, 一定要制定严格的防范措施, 确保安全。

4.4. 利用桑树修复重金属污染土壤的可行性

国内外相关研究结果表明, 桑树对土壤重金属具有较强的富集和转运能力[41]。桑树能够正常生长在多种重金属复合污染的土壤中, 说明了其在土壤重金属修复方面具有较大的开发利用潜力。从桑树不同组织器官中的重金属含量来看, 其不同部位的重金属累积量可能会有所不同。在本研究的调查样地中, 桑树根部吸收和累积的 Mn 的量明显高于其他被测元素, 一方面是因为根部为植物与土壤直接接触的器官, 具有强大的吸收功能, 另一方面是因为调查样地为锰矿区, 锰的含量远高于其他被测元素。在 LT3 采样点, 桑树根部的 Mn 含量高达 2106.67 mg/kg , 说明桑树对 Mn 具有较强的耐受性和吸收能力。正是因为桑树的这一特性, 使其在土壤锰污染的修复中具有较大的应用潜力。此外, 桑树不同组织器官累积的重金属数量有较大差异, 可能与桑树对不同重金属的吸收、转运和解毒机制有关。因此, 需要综合考虑多种因素的影响, 才能准确评估桑树对重金属污染环境的修复能力。

5. 结论

综上所述研究结果及分析讨论, 初步得到以下结论:

- 1) 调查样地桑园土壤的镉、锌、锰、铅 4 种重金属元素的含量, 均高于广西土壤背景值, 根据土壤重金属污染评价的相关标准, 本研究的桑园土壤已达到重度污染。其中, 锰和镉的污染情况最为严重, 铅和锌的污染次之, 铜和铬则未受污染。
- 2) 桑树对不同重金属元素的吸收、富集和转运能力存在一定的差异, 在被测的 6 种重金属元素中, 桑树对 Cr、Zn、Cu 的富集能力相对较强, 而对 Pb、Cd、Mn 的富集能力相对较弱; 桑树对 Cr 和 Mn 的转运能力相对较强, 对 Pb 的转运能力最弱, 其吸收的重金属元素主要是累积在根部。

3) 桑树对锰等重金属复合胁迫具有较强的耐性,同时具有一定的吸收和转运能力,经济效益高,生态效益好,可用于土壤重金属污染的植物修复。

基金项目

广西现代蚕桑丝绸协同创新中心资助项目(2022GXCSSC18),广西高校大学生创新创业训练计划项目(202310605033),河池学院高层次人才科研启动费项目(XJ2018GKQ015),桂西北地方资源保护与利用工程中心资助项目(桂教科研[2012]9号)。

参考文献

- [1] 杨海琳. 低分子有机酸对红壤中重金属的化学萃取研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 中南林业科技大学, 2012.
- [2] 徐双圆, 朱家辉, 王栋茹, 等. 植物套作系统修复镉污染农田土壤的效应——以苏南地区为例[J]. 中国环境科学, 2024, 44(6): 3289-3300.
- [3] 马铁铮, 马友华, 徐露露, 等. 农田土壤重金属污染的农业生态修复技术[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 39-43.
- [4] 龙新宪, 杨肖娥, 倪吾钟. 重金属污染土壤修复技术研究现状与展望[J]. 应用生态学报, 2002, 13(6): 757-762.
- [5] 杜俊, 鲁先科, 蔡奎, 等. 土壤、植物中镉污染与治理技术研究现状与展望[J]. 中国地质: 1-42. <https://link.cnki.net/urlid/11.1167.P.20240515.1407.002>, 2024-07-29.
- [6] 佟洪金, 涂仕华, 赵秀兰. 土壤重金属污染的治理措施[J]. 西南农业学报, 2003(S1): 33-37.
- [7] 宋玉婷, 雷泞菲. 我国土壤镉污染的现状及其修复措施[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2018, 32(3): 79-83.
- [8] 陆小成, 陈露洪, 徐泉, 等. 污染土壤电动修复增强方法研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2005(1): 14-24.
- [9] 丽铎, 梁登裕, 冯嘉仪, 等. 重金属污染土壤的园林植物修复技术及其应用研究进展[J]. 林业与环境科学, 2021, 37(3): 124-132.
- [10] Pandey, J. Verma, R.K. and Singh, S. (2019) Suitability of Aromatic Plants for Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Areas: A Review. *International Journal of Phytoremediation*, **21**, 405-418. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1540546>
- [11] Amanullah, M., Ping, W., Amjad, A., et al. (2016) Challenges and Opportunities in the Phytoremediation of Heavy Metals Contaminated Soils: A Review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **126**, 111-121.
- [12] 龙良俊, 张晓娅, 罗晶晶, 等. 镉污染土壤的植物修复综述[J]. 应用化工, 2022, 51(7): 2143-2147.
- [13] 罗洋, 刘方, 任军. 重金属污染土壤的植物修复效果评价方法研究进展[J]. 应用化工, 2020, 49(3): 755-760.
- [14] 王钰婷, 李瑞雪, 夏家凤, 等. 桑树的经济价值及其在生态保护中的应用[J]. 中国市场, 2017(11): 239-240.
- [15] 李玲利, 杨卫. 浅谈桑树资源的开发利用[J]. 广西蚕业, 2010, 47(4): 35-39.
- [16] 董中凯, 阿丽亚·拜都热拉, 宋敏, 等. 桑树对土壤重金属污染修复潜力研究[J]. 防护林科技, 2023(1): 58-64.
- [17] 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.
- [18] 陈明, 范涛, 汪泰初, 等. 桑树在胁迫条件下的抗逆性研究进展[J]. 中国蚕业, 2018, 39(1): 55-59+65.
- [19] 覃勇荣, 覃艳花, 严军, 等. EDTA 对桑树和任豆幼苗吸收重金属 Pb 的影响[J]. 南方农业学报, 2011, 42(2): 168-172.
- [20] 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>
- [21] 严新沛, 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.
- [22] 张迪, 丁爱芳. 组配钝化剂对镉铅复合污染土壤修复效果研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(12): 2718-2726.
- [23] 陈晓红, 杨慧, 徐玲. 湿法消解-火焰原子吸收光谱法测定青麻不同部位中微量元素[J]. 中国无机分析化学, 2017, 7(2): 69-71.
- [24] 范春辉, 杜波, 张颖超, 等. 湿法消解火焰原子吸收法测定黄土复合污染修复植物金盏菊幼苗中的铅和镉[J]. 光

- 谱学与光谱分析, 2016, 36(8): 2625-2628.
- [25] 望兆博, 任大军, 肖宇伦, 等. 大冶古铜矿遗址周边农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 金属矿山, 2023(11): 290-298.
- [26] 刘子赫, 孟瑞红, 代辉祥, 等. 基于改进地累积指数法的沉积物重金属污染评价[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(9): 2157-2164.
- [27] Rapant, S. and Kordík, J. (2003) An Environmental Risk Assessment Map of the Slovak Republic: Application of Data from Geochemical Atlases. *Environmental Geology*, **44**, 400-407. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0772-7>
- [28] 施建飞, 靳正忠, 周智彬, 等. 额尔齐斯河流域典型尾矿库区周边土壤重金属污染评价[J]. 生态环境学报, 2022, 31(5): 1015-1023.
- [29] 郑富海, 黎宁, 张卫, 等. 桂西北稻田重金属污染及健康风险评价[J]. 西南农业学报, 2017, 30(8): 1886-1893.
- [30] 魏树和, 周启星. 重金属污染土壤植物修复基本原理及强化措施探讨[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 65-72.
- [31] 广西环境保护科学研究所. 土壤背景值研究方法及其广西土壤背景值[M]. 南宁: 广西科学技术出版社, 1992: 216-223.
- [32] 冯韶华, 俞一帆, 张旭峰, 等. 中国农田土壤重金属污染源解析研究进展[J]. 环境污染与防治, 2023, 45(9): 1300-1306.
- [33] 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.
- [34] 覃勇荣, 罗志勇, 陆素芬, 等. 广西宜州龙江河沿岸桑树种植的重金属污染风险分析[J]. 中国蚕业, 2019, 40(4): 5-13.
- [35] 李顺, 李科林, 朱健, 等. 株洲霞湾港典型植物重金属分布状况研究[J]. 中国农学通报, 2013, 29(11): 151-157.
- [36] 刘超, 郑直, 董小龙, 等. 桑树幼苗对重金属镉和铅的富集特征研究[C]//中国蚕学会, 国家蚕桑产业技术体系. 全国桑树产业发展学术研讨会论文集. 咸阳: 西北农林科技大学蚕桑丝绸研究所, 2017: 259.
- [37] 蒋诗梦, 颜新培, 龚昕, 等. 桑树品种间重金属镉的分布与富集规律研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(22): 76-83.
- [38] 张璐, 何录秋, 杨学乐. 不同镉背景值农田中芥麦镉积累转运特性研究[J]. 中国农学通报, 2021, 37(23): 77-83.
- [39] GB13078-2017 饲料卫生标准[J]. 饲料与畜牧, 2018(1): 16-24.
- [40] 覃勇荣, 李宏森, 陆锡东, 等. 广西蚕蛹的砷汞硒镉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.
- [41] 王谢, 赵兴, 上官宇先, 等. 铅锌矿复耕栽桑多元化产品的安全性评价及其对人体的健康风险研究[J]. 西南农业学报, 2021, 34(8): 1715-1720.