

桂西北有色金属矿区周边桑园土壤污染评价及治理对策研究

韦兰新^{1*}, 罗锦连^{1*}, 覃勇荣^{1,2,3#}, 刘旭辉^{1,2,3#}, 蒙恩如¹, 杨丹妮¹

¹河池学院化学与生物工程学院, 广西 河池

²广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室, 广西 河池

³广西现代蚕桑丝绸协同创新中心, 广西 河池

收稿日期: 2026年1月9日; 录用日期: 2026年2月7日; 发布日期: 2026年2月24日

摘要

为了说明矿业生产和金属冶炼加工对有色金属矿区周边农作物生长及其品质的影响, 以桂西北地区特色农作物桑树为研究对象, 用电感耦合等离子体质谱仪测定了桑树根茎叶及其根部0 cm~20 cm表层土壤的重金属含量, 分别用单因子污染指数、内梅罗综合污染指数和地累积指数对不同调查区域桑园样地土壤的污染状况进行评价。结果表明: 大部分桑园调查样地土壤的锰、铜、锌、砷、硒、镉、铅含量超出了广西土壤背景值, 最大超标倍数分别为187.58、10.42、40.80、87.69、12.76、270.08、37.24, 其中镉超标最为严重; 近邻矿区周边桑园土壤的重金属污染比较严重, 非近邻矿区桑园土壤的重金属污染相对较轻, 所有桑园调查样地土壤的内梅罗综合污染指数均达到重度以上; 参照我国食品、饲料及中药材的重金属限量标准, 部分桑树根茎叶的重金属含量已超标; 矿区周边桑园土壤的重金属含量较高, 但桑树的重金属含量比较低, 重金属富集系数较小, 说明其对重金属的耐受性较强。由此可见, 桂西北有色金属矿区周边桑园土壤的重金属污染严重, 栽种重金属低累积及耐性强的桑树品种, 并辅以必要的农艺措施, 或通过其他改良土壤措施, 可以达到蚕桑产品质量安全及土地资源合理利用的目的。

关键词

桂西北, 有色金属矿区, 桑园土壤, 重金属污染, 土地资源合理利用

Evaluation and Countermeasures for Soil Pollution in Mulberry Fields around the Non-Ferrous Metal Mining Area in Northwest Guangxi

*共同第一作者。

#共同通讯作者。

文章引用: 韦兰新, 罗锦连, 覃勇荣, 刘旭辉, 蒙恩如, 杨丹妮. 桂西北有色金属矿区周边桑园土壤污染评价及治理对策研究[J]. 环境保护前沿, 2026, 16(2): 204-221. DOI: 10.12677/aep.2026.162022

Lanxin Wei^{1*}, Jinlian Luo^{1*}, Yongrong Qin^{1,2,3#}, Xuhui Liu^{1,2,3#}, Enru Meng¹, Danni Yang¹

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

²Guangxi Key Laboratory of Sericulture Ecology and Intelligent Technology Application, Hechi Guangxi

³Guangxi Collaborative Innovation Center of Modern Sericulture Silk, Hechi Guangxi

Received: January 9, 2026; accepted: February 7, 2026; published: February 24, 2026

Abstract

In order to explain the effects of mining production and metal smelting on the growth and quality of crops around non-ferrous metal mining areas, taking mulberry, a characteristic crop in northwest Guangxi as the research object, the heavy metal content in 0 cm~20 cm surface soil of mulberry roots, stems, leaves and roots was determined by inductively coupled plasma mass spectrometer. Single factor pollution index, Nemerow comprehensive pollution index and geo-accumulation index were used to evaluate the soil pollution status of mulberry field sample plots in different investigation areas. The results showed that the contents of manganese, copper, zinc, arsenic, selenium, cadmium and lead in the soil of most mulberry plots were higher than the background values in Guangxi, the maximum multiples of exceeding standard were 187.58, 10.42, 40.80, 87.69, 12.76, 270.08 and 37.24 respectively, and the most serious was cadmium. The heavy metal pollution in the soil of the mulberry field in the adjacent mining area is more serious than that in the non-adjacent mining area. The Nemerow Comprehensive Pollution Index of the soil in all the mulberry plots was over serious. According to the national standard of heavy metal limit for food, feed and Chinese medicinal materials, the heavy metal content of some mulberry roots, stems and leaves has exceeded the standard, and the heavy metal content of mulberry soil around the mining area is higher, however, the content of heavy metals in mulberry is relatively low and the enrichment coefficient of heavy metals is relatively small, which indicates that mulberry has a strong tolerance to heavy metals. Therefore, it can be seen that the heavy metal pollution in the mulberry soil around the non-ferrous metal mining area in northwest Guangxi is serious, and mulberry varieties with low accumulation of heavy metals and strong tolerance are planted, supplemented with necessary agronomic measures or other measures to improve the soil, the aim of quality safety of sericulture products and rational utilization of land resources can be achieved.

Keywords

Northwest Guangxi, Non-Ferrous Metal Mines, Soil of Mulberry Field, Heavy Metal Pollution, Rational Utilization of Land Resources

Copyright © 2026 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

广西是中国有色金属之乡, 也是我国乃至当今世界蚕桑产业的主产区[1]。在矿物开采和矿冶加工过程中, 不可避免地对矿区周边环境造成一些不良影响, 重金属污染即是其中最突出的问题[2][3]。桑树具有极高的经济价值, 其生态效益和服务价值也引起了研究者的高度关注, 其在环境污染修复中的应用常有文献公开报道[4]-[6]。桑叶蛋白质含量高, 富含维生素、氨基酸和矿物质, 易被动物吸收和消化, 是优

质的饲料资源[7],也可制作各种特色风味食品[8][9]。桑树枝叶是中药材,具有清热解毒、降血糖等药理功能[10][11]。桑树根系发达,抗逆性强,对重金属具有较强的耐性和一定的吸收转运能力,可作为荒漠化治理的优良树种,也可以作为土壤重金属污染治理的先锋树种[12][13]。

河池地处桂西北,是典型的喀斯特地区和有色金属矿区,生态环境十分脆弱。重金属含量超标,不仅造成环境污染,土地生产力下降,而且会对农作物生长及其产品质量造成不良影响,直接或间接影响人们的身体健康[14]。蚕桑产业是拉动河池经济增长和乡村振兴的重要支柱,全市桑园面积超过93万亩。为了解决收入增长问题,当地群众在矿区周边栽种了不少面积的桑树。目前,关于有色金属矿区周边桑园土壤重金属污染状况,以及土壤重金属污染对桑树产品质量影响的文献报道相对较少[13],尤其是关于桂西北有色金属矿区周边地区蚕桑产品质量安全的深入研究鲜有报道[15]。因此,对桂西北有色金属矿区周边桑树种植的环境风险进行科学分析,并提出可行的解决对策,不仅具有一定的理论意义,还具有重要的现实价值。

2. 材料与方法

2.1. 样品采集与处理

在实地调研的基础上,2019年7月至2025年7月,先后到河池有色金属矿区及周边桑园进行采样,选择的桑园的面积不小于667 m²,按采样技术规范,在桑园的中心点及四周各选一个点,将5点采集的样品混合作为一个混合样。使用GPS进行定位,记录每个采样点的地理坐标及海拔高度等有关信息,在每个桑园样地分别选择5株正常生长的桑树,采集其根部周围50 cm范围0 cm~20 cm表土,以及桑树根部、茎干及成熟叶片的样品,共采集了40个混合土壤样品及桑树根、茎、叶样品120个。其中,FS县金牙外里屯金矿采样点5个(01~05#),YZ区怀远冶炼厂采样点4个(06~09#),YZ区龙头锰矿采样点11个(10~20#),HJ县北山矿采样点2个(21~22#),JCJ区东江采样点2个(23~24#),ND县城区采样点3个(25~27#),DA县三只羊乡采样点1个(28#),HJ县川山镇下寨屯采样点1个(29#),LC县四把镇采样点1个(30#),YZ区石别镇清潭村等地采样点10个(31~40#)。植物样品及土壤样品的采集和处理均按常规方法进行。样品采集地编号中,01~28#为近邻矿区样地,29~40#为非近邻矿区样地。

2.2. 重金属含量的测定

土壤及植物样品重金属含量的测定,用湿法消解、电感耦合等离子体质谱法进行[16]。

2.3. 土壤重金属污染评价

调查样地桑园土壤重金属污染的评价,分别用单因子污染指数法、内梅罗综合污染指数法和地累积指数法进行[17][18]。

2.4. 数据处理分析

每个样品的测定均做三个重复,结果取平均值,数值用“平均值±标准差”表示。数据处理分析用Excel 2010和IBM SPSS Statistics 22进行,绘图用Origin 2024进行。

3. 结果与分析

3.1. 桑园土壤的重金属含量

不同调查样地桑园土壤的pH和重金属含量见表1和表2。参照相关元素的广西土壤背景值[19],在被测元素中,锰、铜、锌、砷、硒、镉、铅含量均有不同程度的超标,最大超标倍数分别为187.58、10.42、

40.80、87.69、12.76、270.08、37.24。比对我国农用地土壤污染风险管控标准(试行) [20], 铜、锌、砷、镉、铅的最大值远超风险筛选值; 镉的中位数和平均值, 以及砷和锌的平均值高于风险筛选值; 镉和砷的最大值远超风险管控值。本研究的桑园土壤重金属变异系数 CV 表现为砷 > 锰 > 铅 > 镉 > 锌 > 铜 > 硒, 其中砷、锰、铅、镉、锌表现为强变异性, 铜和硒表现为中等变异性, 说明研究区域土壤重金属含量的空间分布不均匀, 总体比较离散, 主要是人为活动干扰所致。调查样地桑园土壤重金属含量超标情况的统计结果见表 3。由此可见, 在检测的重金属元素中, 镉的污染最为严重, 砷和锌的污染次之, 铜和铅的污染相对较轻。因为我国尚未颁布农用地土壤锰和硒污染的风险筛选值和管控值, 故其污染程度无法判断。

Table 1. The pH value and heavy metal content of mulberry plantation soil in different survey plots
表 1. 不同调查样地桑园土壤的 pH 和重金属含量

样地编号 Sample plot number	pH value	重金属含量 Heavy metal content/mg·kg ⁻¹						
		Mn	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb
01	4.55 ± 0.09	345.75 ± 54.19	56.84 ± 9.55	234.81 ± 36.95	36.89 ± 4.50	2.38 ± 0.21	0.47 ± 0.07	54.17 ± 3.88
02	5.24 ± 0.01	660.38 ± 125.92	45.67 ± 8.99	203.10 ± 37.46	61.09 ± 9.79	1.45 ± 0.23	0.63 ± 0.13	36.09 ± 2.79
03	6.71 ± 0.00	770.79 ± 128.90	70.97 ± 12.42	351.54 ± 59.32	36.94 ± 4.74	1.99 ± 0.05	0.78 ± 0.06	107.73 ± 7.49
04	6.87 ± 0.01	837.57 ± 144.18	60.06 ± 10.26	345.25 ± 62.26	69.04 ± 9.96	2.35 ± 0.28	1.04 ± 0.11	64.00 ± 5.34
05	7.33 ± 0.07	1090.09 ± 160.68	100.18 ± 17.49	1147.75 ± 191.86	118.03 ± 16.94	4.49 ± 0.69	2.85 ± 0.20	201.09 ± 13.29
06	6.18 ± 0.02	565.97 ± 69.01	32.41 ± 3.22	119.84 ± 7.64	61.31 ± 5.66	2.76 ± 0.33	0.57 ± 0.09	40.56 ± 4.11
07	5.42 ± 0.66	18327.94 ± 3541.66	216.64 ± 40.02	423.16 ± 49.72	872.55 ± 221.84	5.08 ± 0.57	2.97 ± 0.40	336.45 ± 37.91
08	5.09 ± 0.08	829.87 ± 1.51	28.32 ± 1.56	80.12 ± 9.29	55.30 ± 0.58	1.65 ± 0.03	0.22 ± 0.02	30.60 ± 0.43
09	4.09 ± 0.02	928.05 ± 7.11	37.19 ± 1.44	89.83 ± 12.90	63.08 ± 0.54	2.58 ± 0.09	0.22 ± 0.01	39.94 ± 0.43
10	5.83 ± 0.02	2726.27 ± 443.50	64.43 ± 12.03	353.42 ± 64.18	42.67 ± 7.01	3.22 ± 0.14	1.06 ± 0.12	85.49 ± 5.95
11	6.13 ± 0.01	15017.66 ± 2026.70	50.47 ± 4.11	155.06 ± 7.29	20.14 ± 1.26	2.25 ± 0.22	2.12 ± 0.16	42.34 ± 3.39
12	7.46 ± 0.01	27173.25 ± 2363.86	43.42 ± 2.55	188.01 ± 4.04	27.07 ± 1.01	2.88 ± 0.37	2.24 ± 0.17	35.63 ± 1.67
13	7.52 ± 0.01	32405.61 ± 2736.84	41.50 ± 2.33	199.57 ± 4.44	22.94 ± 1.10	3.40 ± 0.18	2.90 ± 0.13	208.89 ± 11.29
14	7.63 ± 0.03	25193.35 ± 94.89	40.71 ± 1.03	128.63 ± 3.42	23.93 ± 0.57	2.33 ± 0.01	1.54 ± 0.02	37.56 ± 1.26
15	6.33 ± 0.05	15779.16 ± 185.29	42.51 ± 0.53	138.96 ± 4.79	21.34 ± 1.33	1.39 ± 0.13	0.64 ± 0.02	34.43 ± 0.77
16	8.06 ± 0.01	26708.58 ± 319.68	47.92 ± 1.15	187.81 ± 0.00	28.77 ± 1.00	3.56 ± 0.03	2.45 ± 0.07	31.53 ± 0.69
17	5.45 ± 0.04	23637.16 ± 149.22	65.61 ± 0.69	223.80 ± 0.00	27.87 ± 0.95	3.10 ± 0.12	1.72 ± 0.03	34.14 ± 0.16
18	4.69 ± 0.28	20358.04 ± 303.02	45.06 ± 1.06	186.62 ± 3.92	21.12 ± 0.20	2.51 ± 0.11	1.90 ± 0.03	35.98 ± 0.56
19	6.80 ± 0.03	24756.86 ± 307.87	47.81 ± 0.66	206.24 ± 13.84	22.21 ± 0.04	2.18 ± 0.25	2.56 ± 0.02	36.09 ± 0.56
20	5.87 ± 0.04	12321.38 ± 430.08	40.27 ± 0.20	120.20 ± 9.57	23.10 ± 0.35	1.46 ± 0.07	0.43 ± 0.03	35.01 ± 0.14
21	6.39 ± 0.01	1595.54 ± 226.13	50.66 ± 5.08	646.13 ± 43.16	33.72 ± 3.67	2.89 ± 0.47	1.09 ± 0.12	411.37 ± 37.45
22	7.20 ± 0.01	1187.77 ± 194.76	35.59 ± 4.04	1894.16 ± 179.14	93.48 ± 11.00	2.08 ± 0.48	16.21 ± 1.73	700.88 ± 74.97
23	7.05 ± 0.01	336.90 ± 78.69	20.29 ± 4.06	118.27 ± 18.04	22.94 ± 4.83	1.03 ± 0.45	0.78 ± 0.18	30.89 ± 4.94
24	7.60 ± 0.02	616.49 ± 153.80	71.69 ± 15.29	724.87 ± 114.44	81.72 ± 16.65	1.91 ± 0.49	5.16 ± 1.01	476.9 ± 71.53
25	7.90 ± 0.02	1288.99 ± 289.47	44.59 ± 15.22	255.94 ± 55.11	61.21 ± 26.82	1.39 ± 1.34	1.23 ± 1.23	34.09 ± 14.92
26	7.70 ± 0.14	346.60 ± 73.13	47.03 ± 7.13	422.78 ± 133.76	54.93 ± 2.80	0.73 ± 0.33	4.71 ± 1.08	117.39 ± 8.18
27	7.29 ± 0.04	238.04 ± 65.86	53.00 ± 6.70	631.99 ± 111.80	63.92 ± 25.64	1.30 ± 0.30	2.31 ± 1.48	92.61 ± 11.16

续表

28	6.40 ± 0.02	3562.12 ± 555.51	64.43 ± 4.84	481.14 ± 10.51	74.58 ± 4.57	7.53 ± 0.11	13.86 ± 1.08	92.64 ± 8.54
29	6.92 ± 0.01	103.09 ± 10.09	35.11 ± 2.36	107.57 ± 2.20	12.50 ± 0.76	1.33 ± 0.02	0.78 ± 0.04	40.44 ± 2.86
30	5.94 ± 0.01	113.25 ± 31.96	17.44 ± 5.21	163.61 ± 37.13	16.86 ± 4.71	0.83 ± 0.51	0.96 ± 0.23	45.48 ± 27.70
31	7.55 ± 0.02	263.45 ± 39.98	15.82 ± 1.94	131.92 ± 9.96	16.82 ± 1.68	1.50 ± 0.40	1.99 ± 0.16	27.36 ± 3.44
32	6.64 ± 0.02	268.28 ± 76.35	16.57 ± 4.26	200.55 ± 38.95	13.85 ± 3.48	1.89 ± 1.11	2.20 ± 0.46	32.07 ± 5.32
33	7.31 ± 0.01	456.16 ± 117.64	35.08 ± 8.10	339.19 ± 59.39	39.75 ± 10.07	0.98 ± 0.42	1.35 ± 0.29	38.84 ± 5.90
34	7.20 ± 0.01	865.42 ± 106.65	93.85 ± 7.29	224.78 ± 10.59	24.58 ± 2.02	6.57 ± 0.47	2.19 ± 0.23	69.52 ± 6.11
35	5.48 ± 0.02	347.98 ± 106.90	174.69 ± 51.85	121.86 ± 19.88	22.62 ± 6.29	0.60 ± 0.40	0.99 ± 0.34	37.70 ± 6.96
36	6.82 ± 0.01	209.87 ± 45.84	25.28 ± 5.13	163.52 ± 24.40	16.86 ± 3.37	1.18 ± 0.57	1.89 ± 0.53	35.57 ± 5.41
37	6.89 ± 0.02	376.88 ± 99.06	20.30 ± 5.01	259.97 ± 171.42	20.61 ± 5.04	2.26 ± 0.93	1.88 ± 0.35	27.29 ± 4.70
38	4.41 ± 0.02	413.61 ± 104.25	40.91 ± 9.06	156.15 ± 29.37	26.84 ± 4.70	0.95 ± 0.37	0.35 ± 0.06	58.06 ± 9.91
39	5.58 ± 0.01	536.81 ± 156.38	31.63 ± 8.46	236.16 ± 51.26	29.81 ± 8.66	3.05 ± 1.20	1.76 ± 0.46	63.54 ± 11.29
40	5.57 ± 0.02	839.72 ± 209.64	59.18 ± 12.73	254.32 ± 41.54	67.56 ± 15.37	1.86 ± 0.85	1.63 ± 0.37	75.10 ± 11.65

注: 检测元素的广西土壤背景值分别为: 锰 172.75 mg/kg, 铜 20.79 mg/kg, 锌 46.43 mg/kg, 砷 9.95 mg/kg, 硒 0.59 mg/kg, 镉 0.06 mg/kg, 铅 18.82 mg/kg。

Table 2. Statistical analysis of heavy metal content in mulberry plantation soils in different survey plots
表 2. 不同调查样地桑园土壤重金属含量的统计分析

检测元素 Detect elements	重金属含量 Heavy metal content/mg·kg ⁻¹					变异系数 Coefficient of variation/%
	最大值	最小值	中位数	算术均值	几何均值	
Mn	32405.61	103.09	838.65	6610.02	1518.33	152.66
Cu	216.64	15.82	44.82	53.28	45.15	71.96
Zn	1894.16	80.12	204.67	315.46	237.32	104.72
As	872.55	12.50	29.29	61.26	37.07	218.49
Se	7.53	0.60	2.13	2.37	2.02	62.03
Cd	16.21	0.22	1.68	2.31	1.45	136.80
Pb	700.88	27.29	40.50	100.88	62.00	140.41

Table 3. Statistics on the number of mulberry plantation whose detected element content is higher than the soil pollution risk screening value and control value of agricultural land

表 3. 检测元素含量高于农用地土壤污染风险筛选值和管控值的桑园数量统计

元素名称 Element name	Mn	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb
高于筛选值 Above filter value	—	10/25%	18/45%	18/45%	—	38/95%	7/17.5%
高于管控值 Above control value	—	—	—	1/2.5%	—	8/20%	0/0

注: ① 因目前颁布的农用地土壤风险管控标准(GB 15618-2018)中缺少部分重金属元素含量的限值, 所以其超标情况无法统计, 用“-”表示; ② 表中数据“/”前后的数字, 分别为该元素含量超标的桑园数及所占的百分比。

3.2. 桑园土壤的重金属污染状况

3.2.1. 单因子污染指数和内梅罗综合污染指数

根据 2.1 的实验数据, 参照广西相应元素的土壤背景值, 不同调查样地桑园土壤重金属的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数计算结果见表 4。从单因子污染指数来看, 绝大部分(92.9%)近邻矿区桑园土壤的硒为中度至重度或重度污染, 半数以上(58.3%)非近邻矿区桑园土壤的硒为中度至重度或重度污染, 所有调查样地桑园土壤的镉为重度污染; 从内梅罗综合污染指数来看, 所有调查桑园土壤均为重度污染。

3.2.2. 地累积指数

为了进一步说明桂西北有色金属矿区周边桑园土壤的重金属污染情况, 以便更好地说明桑树对不同重金属元素的耐受性, 根据业界常用的污染评价数学模型, 可对不同调查样地桑园土壤重金属污染的地累积指数进行比较分析, 具体结果见表 5。

Table 4. The single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index of heavy metals in mulberry plantation soil from different survey sites

表 4. 不同调查样地桑园土壤重金属的单因子污染指数和内梅罗综合污染指数

样地编号 Sample plot number	单因子污染指数 Single factor pollution index														内罗综合污染指数 Nemerow comprehensive pollution index	
	P_{i-Mn}	污染 等级	P_{i-Cu}	污染 等级	P_{i-Zn}	污染 等级	P_{i-As}	污染 等级	P_{i-Se}	污染 等级	P_{i-Cd}	污染 等级	P_{i-Pb}	污染 等级	P_N	污染 等级
01	2.00	II	2.73	III	5.06	IV	3.71	IV	4.03	IV	7.83	IV	2.88	III	6.23	IV
02	3.82	IV	2.20	III	4.37	IV	6.14	IV	2.45	III	10.50	IV	1.92	II	8.07	IV
03	4.46	IV	3.41	IV	7.57	IV	3.71	IV	3.36	IV	12.92	IV	5.72	IV	10.04	IV
04	4.85	IV	2.89	III	7.44	IV	6.94	IV	3.98	IV	17.25	IV	3.40	IV	13.08	IV
05	6.31	IV	4.82	IV	24.72	IV	11.86	IV	7.61	IV	47.50	IV	10.68	IV	35.49	IV
06	3.28	IV	1.56	II	2.58	III	6.16	IV	4.68	IV	9.42	IV	2.15	III	7.31	IV
07	106.10	IV	10.42	IV	9.11	IV	87.69	IV	8.60	IV	49.42	IV	17.88	IV	80.51	IV
08	4.80	IV	1.36	II	1.73	II	5.56	IV	2.80	III	3.58	IV	1.63	II	4.49	IV
09	5.37	IV	1.79	II	1.93	II	6.34	IV	4.36	IV	3.58	IV	2.12	III	5.17	IV
10	15.78	IV	3.10	IV	7.61	IV	4.29	IV	5.46	IV	17.58	IV	4.54	IV	13.76	IV
11	86.93	IV	2.43	III	3.34	IV	2.02	III	3.81	IV	35.33	IV	2.25	III	62.99	IV
12	157.30	IV	2.09	III	4.05	IV	2.72	III	4.87	IV	37.33	IV	1.89	II	113.27	IV
13	187.59	IV	2.00	III	4.30	IV	2.31	III	5.75	IV	48.33	IV	11.10	IV	135.25	IV
14	145.84	IV	1.96	II	2.77	III	2.40	III	3.94	IV	25.58	IV	2.00	III	104.79	IV
15	91.34	IV	2.04	III	2.99	III	2.14	III	2.36	III	10.58	IV	1.83	II	65.59	IV
16	154.61	IV	2.30	III	4.05	IV	2.89	III	6.03	IV	40.83	IV	1.68	II	111.41	IV
17	136.83	IV	3.16	IV	4.82	IV	2.80	III	5.25	IV	28.67	IV	1.81	II	98.51	IV
18	117.85	IV	2.17	III	4.02	IV	2.12	III	4.25	IV	31.67	IV	1.91	II	84.96	IV
19	143.31	IV	2.30	III	4.44	IV	2.23	III	3.69	IV	42.58	IV	1.92	II	103.34	IV
20	71.32	IV	1.94	II	2.59	III	2.32	III	2.47	III	7.17	IV	1.86	II	51.24	IV

续表

21	9.24	IV	2.44	III	13.92	IV	3.39	IV	4.90	IV	18.08	IV	21.86	IV	17.16	IV
22	6.88	IV	1.71	II	40.80	IV	9.39	IV	3.53	IV	270.08	IV	37.24	IV	194.59	IV
23	1.95	IV	0.98	I	2.55	III	2.31	III	1.74	II	12.92	IV	1.64	II	9.45	IV
24	3.57	IV	3.45	IV	15.61	IV	8.21	IV	3.24	IV	85.92	IV	25.34	IV	62.51	IV
25	7.46	IV	2.14	III	5.51	IV	6.15	IV	2.35	III	20.50	IV	1.81	II	15.22	IV
26	2.01	III	2.26	III	9.11	IV	5.52	IV	1.23	II	78.42	IV	6.24	IV	56.45	IV
27	1.38	II	2.55	III	13.61	IV	6.42	IV	2.20	III	38.42	IV	4.92	IV	28.06	IV
28	20.62	IV	3.10	IV	10.36	IV	7.50	IV	12.76	IV	230.92	IV	4.92	IV	165.89	IV
29	0.60	I	1.69	II	2.32	III	1.26	II	2.25	III	12.92	IV	2.15	III	9.43	IV
30	0.66	I	0.84	I	3.52	IV	1.69	II	1.41	II	15.92	IV	2.42	III	11.57	IV
31	1.53	II	0.76	I	2.84	III	1.69	II	2.54	III	33.08	IV	1.45	II	24.91	IV
32	1.55	II	0.80	I	4.32	IV	1.39	II	3.19	IV	36.58	IV	1.70	II	26.35	IV
33	2.64	III	1.69	II	7.31	IV	3.99	IV	1.66	II	22.42	IV	2.06	III	16.40	IV
34	5.01	IV	4.51	IV	4.84	IV	2.47	III	11.14	IV	36.42	IV	3.69	IV	26.66	IV
35	2.01	III	8.40	IV	2.62	III	2.27	III	1.02	II	16.50	IV	2.00	III	12.19	IV
36	1.21	II	1.22	II	3.52	IV	1.69	II	1.99	II	31.42	IV	1.89	II	22.64	IV
37	2.18	III	0.98	I	5.60	IV	2.07	III	3.82	IV	31.25	IV	1.45	II	22.61	IV
38	2.39	III	1.97	II	3.36	IV	2.70	III	1.60	II	5.83	IV	3.08	IV	4.63	IV
39	3.11	IV	1.52	II	5.09	IV	3.00	IV	5.17	IV	29.25	IV	3.38	IV	21.30	IV
40	4.86	IV	2.85	III	5.48	IV	6.79	IV	3.15	IV	27.17	IV	3.99	IV	19.98	IV

注: 表中 P_i 和 P_N 分别为单因子污染指数和综合污染指数, 单因子污染指数 $P_i < 1$, 属于无污染, 用I表示; $1 < P_i < 2$, 属于轻度污染, 用II表示; $2 < P_i < 3$, 属于中度污染至重度污染, 用III表示; $P_i > 3$, 属于重度污染, 用IV表示。内梅罗综合污染指数 $P_N \leq 0.7$, 属于清洁无污染; $0.7 < P_N \leq 1$, 属于尚清洁, 但达到污染的警戒线; $1 < P_N < 2$, 属于轻度污染, 用II表示, $2 < P_N < 3$ 属于中度污染, 用III表示; $P_N > 3$, 属于重度污染, 用IV表示。

Table 5. Comparison of geo-accumulation index of heavy metals in mulberry plantation soil among different sample plots
表 5. 不同调查样地桑园土壤重金属的地累积指数比较

样地编号 Sample plot number	I_{geo} 污染等级 Pollution level						
	Mn	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb
01	0.42/1	0.87/1	1.75/2	1.31/2	1.42/2	2.38/3	0.94/1
02	1.35/2	0.55/1	1.54/2	2.03/3	0.71/1	2.81/3	0.35/1
03	1.57/2	1.19/2	2.34/3	1.31/2	1.17/2	3.11/4	1.93/2
04	1.69/2	0.95/1	2.31/3	2.21/3	1.41/2	3.52/4	1.18/2
05	2.07/3	1.68/2	4.04/5	2.98/3	2.34/3	4.98/5	2.83/3
06	1.13/2	0.06/1	0.78/1	2.04/3	1.64/2	2.65/3	0.52/1
07	6.14/6	2.80/3	2.60/3	5.87/6	2.52/3	5.04/6	3.58/4
08	1.68/2	-0.14/0	0.20/1	1.89/2	0.90/1	1.26/2	0.12/1
09	1.84/2	0.25/1	0.37/1	2.08/3	1.54/2	1.26/2	0.50/1

续表

10	3.40/4	1.05/2	2.34/3	1.52/2	1.86/2	3.55/4	1.60/2
11	5.86/6	0.69/1	1.15/2	0.43/1	1.34/2	4.56/5	0.58/1
12	6.71/6	0.48/1	1.43/2	0.86/1	1.70/2	4.64/5	0.34/1
13	6.97/6	0.41/1	1.52/2	0.62/1	1.94/2	5.01/6	2.89/3
14	6.60/6	0.38/1	0.89/1	0.68/1	1.39/2	4.09/5	0.41/1
15	5.93/6	0.45/1	1.00/1	0.52/1	0.65/1	2.82/3	0.29/1
16	6.69/6	0.62/1	1.43/2	0.95/1	2.01/3	4.77/5	0.16/1
17	6.51/6	1.07/2	1.68/2	0.90/1	1.81/2	4.26/5	0.27/1
18	6.30/6	0.53/1	1.42/2	0.50/1	1.50/2	4.40/5	0.35/1
19	6.58/6	0.62/1	1.57/2	0.57/1	1.30/2	4.83/5	0.35/1
20	5.57/6	0.37/1	0.79/1	0.63/1	0.72/1	2.26/3	0.31/1
21	2.62/3	0.70/1	3.21/4	1.18/2	1.71/2	3.59/4	3.87/4
22	2.20/3	0.19/1	4.77/5	2.65/3	1.23/2	7.49/6	4.63/5
23	0.38/1	-0.62/0	0.76/1	0.62/1	0.21/1	3.11/4	0.13/1
24	1.25/2	1.20/2	3.38/4	2.45/3	1.11/2	5.84/5	4.08/5
25	2.31/3	0.52/1	1.88/2	2.04/3	0.65/1	3.77/4	0.27/1
26	0.42/1	0.59/1	2.60/3	1.88/2	-0.29/0	5.71/5	2.06/3
27	-0.12/0	0.77/1	3.18/4	2.10/3	0.55/1	4.68/5	1.71/2
28	3.78/4	1.05/2	2.79/3	2.32/3	3.09/4	7.27/6	1.71/2
29	-1.33/0	0.17/1	0.63/1	-0.26/0	0.58/1	3.11/4	0.52/1
30	-1.19/0	-0.84/0	1.23/2	0.18/1	-0.09/0	3.41/4	0.69/1
31	0.02/1	-0.98/0	0.92/1	0.17/1	0.76/1	4.46/5	-0.05/0
32	0.05/1	-0.91/0	1.53/2	-0.11/0	1.09/2	4.61/5	0.18/1
33	0.82/1	0.17/1	2.28/3	1.41/2	0.15/1	3.90/4	0.46/1
34	1.74/2	1.59/2	1.69/2	0.72/1	2.89/3	4.60/5	1.30/2
35	0.43/1	2.49/3	0.81/1	0.60/1	-0.56/0	3.46/4	0.42/1
36	-0.30/0	-0.30/0	1.23/2	0.18/1	0.41/1	4.39/5	0.33/1
37	0.54/1	-0.62/0	1.90/2	0.47/1	1.35/2	4.38/5	-0.05/0
38	0.67/1	0.39/1	1.16/2	0.85/1	0.09/1	1.96/2	1.04/2
39	1.05/2	0.02/1	1.76/2	1.00/1	1.79/2	4.29/5	1.17/2
40	1.70/2	0.92/1	1.87/2	2.18/3	1.07/2	4.18/5	1.41/2

注: ① “/”后的数字为污染等级; ② 按照地累积指数的分级标准, $I_{geo} < 0$, 为0级, 表示无污染; $0 \leq I_{geo} < 1$, 为1级, 表示无污染到中度污染; $1 \leq I_{geo} < 2$, 为2级, 表示中度污染; $2 \leq I_{geo} < 3$, 为3级, 表示中度污染到强污染; $3 \leq I_{geo} < 4$, 为4级, 表示强污染; $4 \leq I_{geo} < 5$, 为5级, 表示强污染到极强度污染; $I_{geo} \geq 5$, 为6级, 表示极强污染。

由表4和表5可知, 在本研究的桑园调查样地中, 锰、铜、锌、砷、硒、镉、铅等7种重金属均存在不同程度的污染; 从污染状况评价的结果来看, 所有调查样地桑园土壤的内梅罗综合污染指数均达到重

度以上, 单因子污染指数和地累积指数则因金属元素的不同而有一定的差异, 总体来说, 污染问题都比较严重, 具体情况见图 1、图 2。

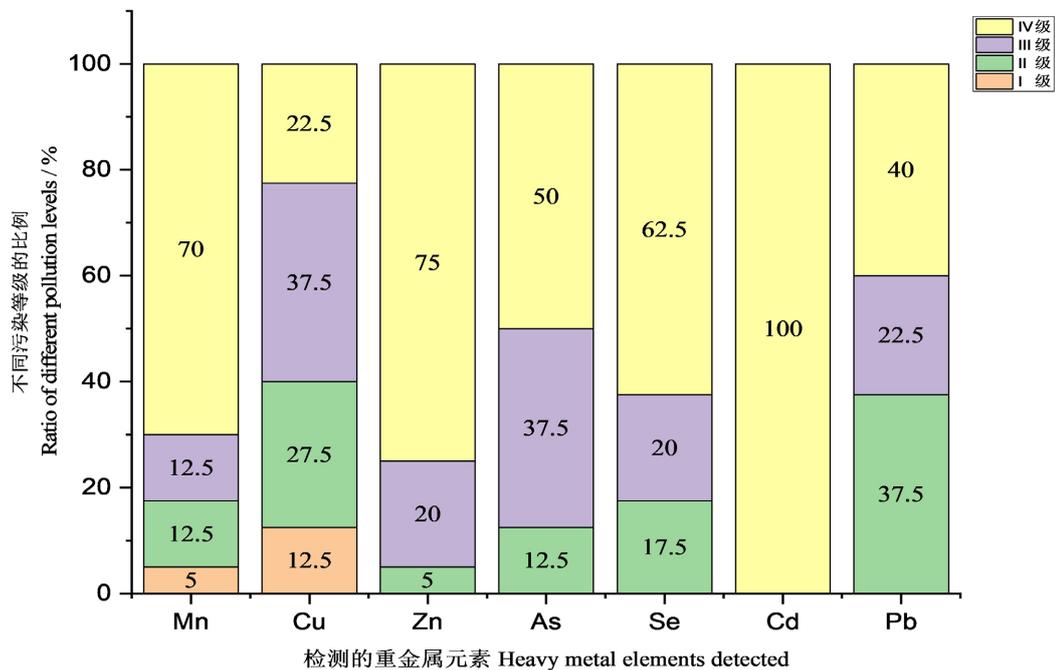


Figure 1. Comparison of grade differences in single-factor pollution index of different heavy metals in the survey plots
图 1. 调查样地中不同重金属单因子污染指数的等级差异比较

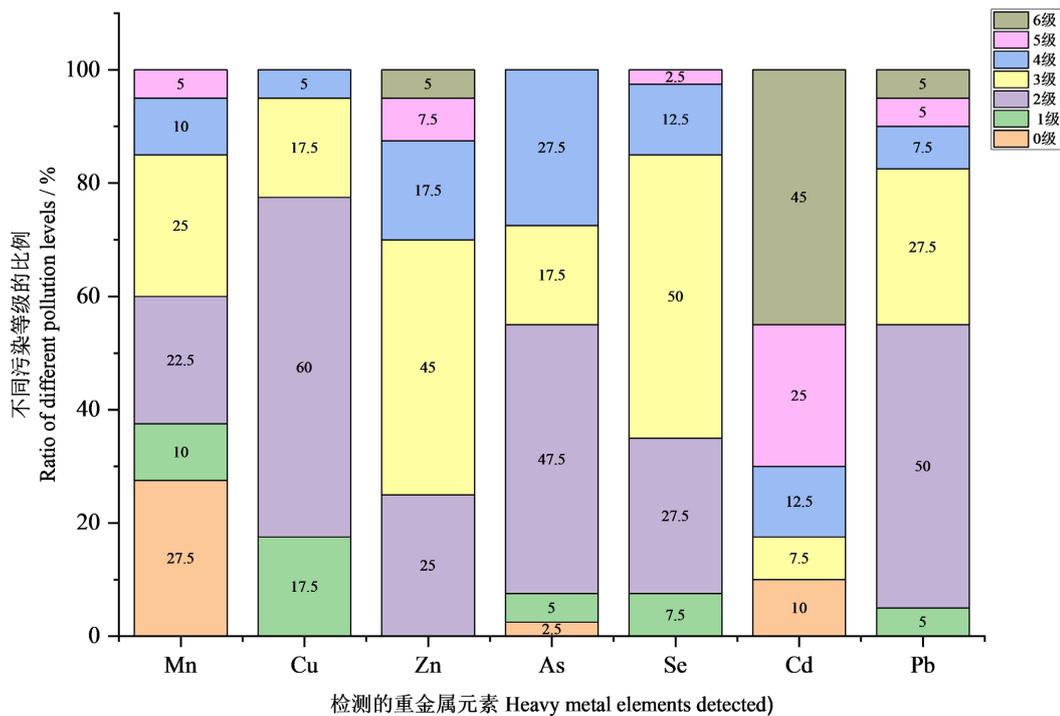


Figure 2. Comparison of grade differences in geo-accumulation indices of different heavy metals in the survey plots
图 2. 调查样地中不同重金属地累积指数的等级差异比较

3.3. 桑树不同部位的重金属含量

不同调查样地桑树地上部分(茎、叶)和地下部分(根)的重金属含量分析结果见表 6。从算术均值来看, 桑树根、茎和叶中不同重金属元素含量的高低排序分别为: 锰 > 锌 > 铜 > 铅 > 砷 > 镉 > 硒、锰 > 锌 > 铅 > 铜 > 砷 > 镉 > 硒、锰 > 锌 > 铜 > 铅 > 砷 > 硒 > 镉, 三者稍有不同。按照我国食品、饲料及药用植物的有关质量标准, 部分桑树根、茎、叶的重金属含量已超标, 且部分桑园样品的超标情况比较严重[21]-[24]。

Table 6. Contents of heavy metals in the above-ground and underground parts of mulberry trees in different survey plots
表 6. 不同调查样地桑树地上和地下部分的重金属含量

桑树组织 Mulberry organization	元素 Element	重金属含量 Heavy metal content/ mg·kg ⁻¹					变异系数 Coefficient of variation/%
		最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	中位数 Median	算术均值 Arithmetic mean	几何均值 Geometric mean	
根 Root	Mn	541.45	29.42	12.42	151.61	113.01	80.39
	Cu	31.40	1.78	4.36	6.74	5.73	96.13
	Zn	229.21	15.03	8.39	52.71	74.52	81.25
	As	25.62	0.20	1.56	3.17	1.92	157.41
	Se	1.41	0.03	0.21	0.28	0.19	93.38
	Cd	2.19	0.11	0.40	0.50	0.55	91.29
	Pb	24.90	0.71	2.63	4.90	11.75	118.83
茎 Stem	Mn	259.44	19.18	68.54	88.88	115.30	66.55
	Cu	19.08	3.44	8.89	8.78	8.52	36.22
	Zn	202.23	14.99	38.40	42.80	44.13	72.55
	As	46.00	0.14	1.40	3.17	1.26	229.02
	Se	0.78	0.03	0.15	0.22	0.13	77.27
	Cd	1.66	0.05	0.13	0.23	0.16	134.78
	Pb	144.80	0.84	13.44	26.32	44.96	117.02
叶 Leaf	Mn	753.19	23.08	159.32	210.86	249.17	87.25
	Cu	22.26	5.19	7.23	8.41	10.47	46.61
	Zn	245.12	20.65	37.08	49.10	55.87	96.02
	As	10.69	0.21	0.98	1.91	1.92	125.13
	Se	2.44	0.02	0.22	0.33	0.16	121.21
	Cd	1.38	0.03	0.07	0.14	0.13	178.57
	Pb	8.09	0.81	1.60	2.24	1.80	75.89

3.4. 重金属富集系数

根据调查样地桑园土壤及桑树不同部位的重金属含量, 可计算其不同部位的重金属富集系数, 具体

结果见表 7。从算术均值来看, 桑树根、茎、叶的重金属富集系数大小排序分别为: 镉 > 锌 > 铜 > 硒 > 锰 > 砷 > 铅, 铅 > 铜 > 锌、镉 > 硒 > 锰 > 砷, 锰 > 锌 > 铜 > 硒 > 镉 > 砷 > 铅。由此可知, 桑树不同部位(根、茎、叶)对重金属元素的富集能力有差异, 其同一部位对不同重金属元素的富集能力也有不同。

Table 7. Comparison of the enrichment ability of different parts of mulberry roots, stems and leaves for heavy metal elements
表 7. 桑树根茎叶不同部位对重金属元素的富集能力比较

桑树组织 Mulberry organization	元素 Element	富集系数 Enrichment coefficient					变异系数 Coefficient of variation/%
		最大值 Maximum value	最小值 Minimum value	中位数 Median	算术均值 Arithmetic mean	几何均值 Geometric mean	
根 Root	Mn	0.53	0.01	0.10	0.13	0.21	96.28
	Cu	0.59	0.02	0.12	0.16	0.10	90.58
	Zn	1.02	0.04	0.19	0.22	0.30	76.55
	As	0.62	0.00	0.04	0.09	0.04	145.51
	Se	1.38	0.03	0.10	0.15	0.09	141.76
	Cd	2.58	0.05	0.25	0.41	0.63	113.80
	Pb	0.66	0.01	0.04	0.08	0.18	143.72
茎 Stem	Mn	0.56	0.00	0.06	0.11	0.21	125.14
	Cu	0.62	0.03	0.19	0.22	0.15	64.84
	Zn	0.43	0.02	0.18	0.19	0.18	54.21
	As	0.39	0.00	0.04	0.07	0.03	121.12
	Se	0.51	0.02	0.08	0.12	0.06	95.03
	Cd	1.02	0.01	0.09	0.19	0.19	119.41
	Pb	1.82	0.01	0.20	0.42	0.71	123.95
叶 Leaf	Mn	1.36	0.00	0.25	0.37	0.06	110.69
	Cu	0.65	0.04	0.16	0.21	0.18	67.92
	Zn	1.09	0.03	0.20	0.23	0.08	88.81
	As	0.56	0.00	0.03	0.06	0.11	182.86
	Se	0.54	0.01	0.13	0.18	0.21	89.93
	Cd	0.69	0.00	0.05	0.11	0.03	144.43
	Pb	0.20	0.00	0.03	0.05	0.02	99.88

3.5. 桑树地上部分的重金属转运能力

植物对重金属的转运能力可用转运系数来说明。根据桑树地上部分和地下部分的重金属含量, 可计算其对相应重金属元素的转运系数, 结果见图 3。由此可知, 桑树茎和叶对重金属元素的转运能力有一定的差异。相对而言, 桑叶对硒、锌和锰的转运能力较强, 桑秆(茎)对铅、镉、砷、铜的转运能力较强, 尤其是对铅的能力更强。

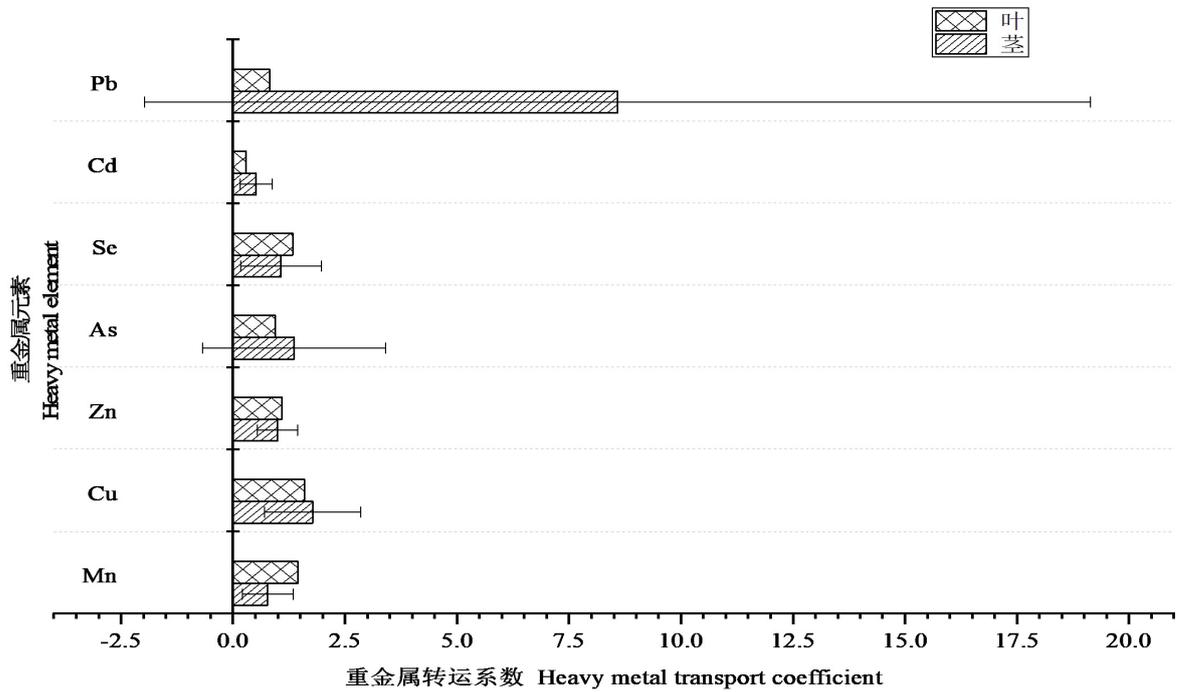


Figure 3. Comparison of the average transport coefficients of mulberry for different heavy metal elements
图 3. 桑树对不同重金属元素的平均转运系数比较

4. 讨论

4.1. 不同桑园土壤重金属含量的差异

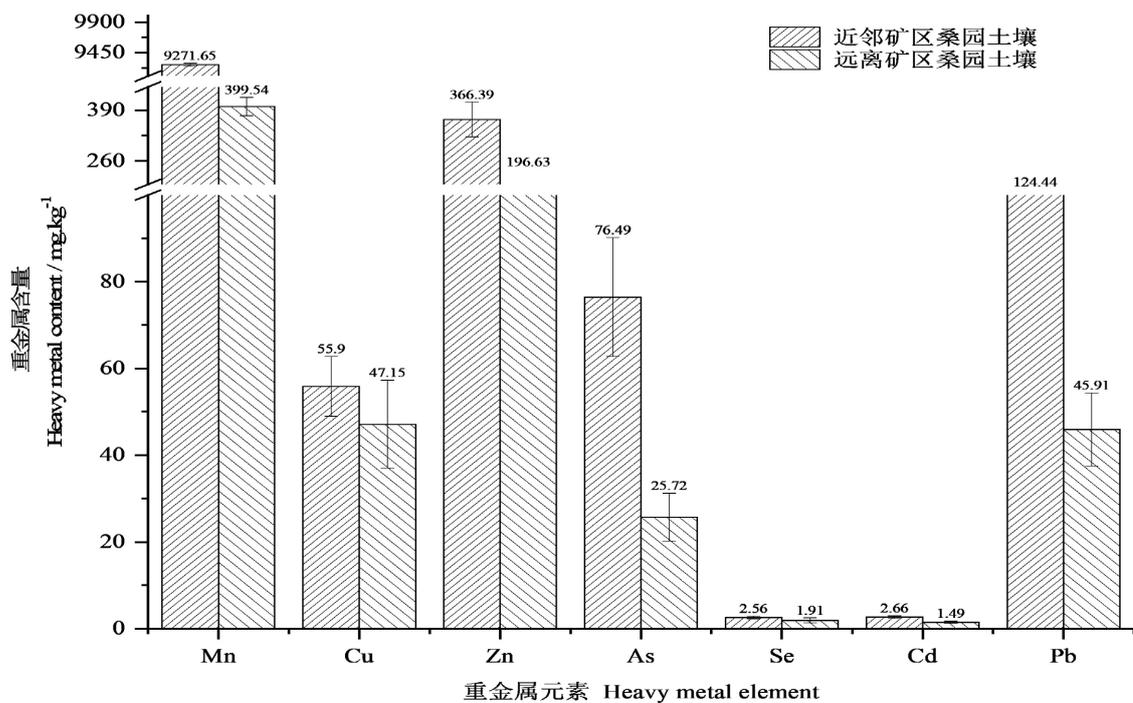


Figure 4. Comparison of heavy metal content in soil of mulberry plantations around non-ferrous metal mining areas
图 4. 有色金属矿区周边桑园土壤重金属含量的比较

在桂西北有色金属矿区及其周边的调查样地中, 不同桑园土壤的重金属含量差异较大, 从检测的 7 种重金属元素来看, 近邻矿区桑园土壤重金属的平均含量明显高于非近邻矿区(见图 4), 该结果与任超、霍任慧、黄钟霆、王谢、王新帅等人所得结果相似[25]-[30]。在桑园调查样地中, 污染最严重的重金属元素依次为镉、砷、锌、锰, 其次为铜和铅, 该结果与黄奎贤等人相关研究结果相似[31]。造成厂矿周边桑园土壤重金属污染的主要原因, 通常与矿业活动和化工生产有关[32]-[34]。在作物栽培过程中, 化肥和农药的施用, 也是造成土壤重金属污染的原因之一[35][36]。不同桑园土壤重金属含量的差异, 与当地的产业布局有一定的关系。河池是一个资源型的城市, 被誉为“有色金属之乡”, 有色金属产业是其经济的重要支柱, 由于过去粗放式的经营管理及监管缺失, 历史欠账过多, 因此给矿区周边生态环境带来了较大的负面影响, 再加上河池是经济欠发达地区, 土壤重金属污染治理和生态环境修复任重道远[31]。

4.2. 桑树不同部位重金属含量的差异

Table 8. Correlation of heavy metal content in different parts of mulberry tree and corresponding heavy metal content in soil
表 8. 桑树不同部位重金属含量与土壤相应重金属含量的相关性

桑树组织 Mulberry organization	重金属元素 Heavy metal element						
	Mn	Cu	Zn	As	Se	Cd	Pb
根 Root	0.791**	0.071	0.348*	0.041	0.376*	0.263	0.309
茎 Stem	0.473**	-0.051	0.238	0.050	0.122	0.111	0.214
叶 Leaf	0.503**	-0.034	0.178	0.113	0.535**	0.090	0.439**

注: 表中数字后面的“*”表示显著相关(P < 0.05), 数字后面的“**”表示极显著相关(P < 0.01)。

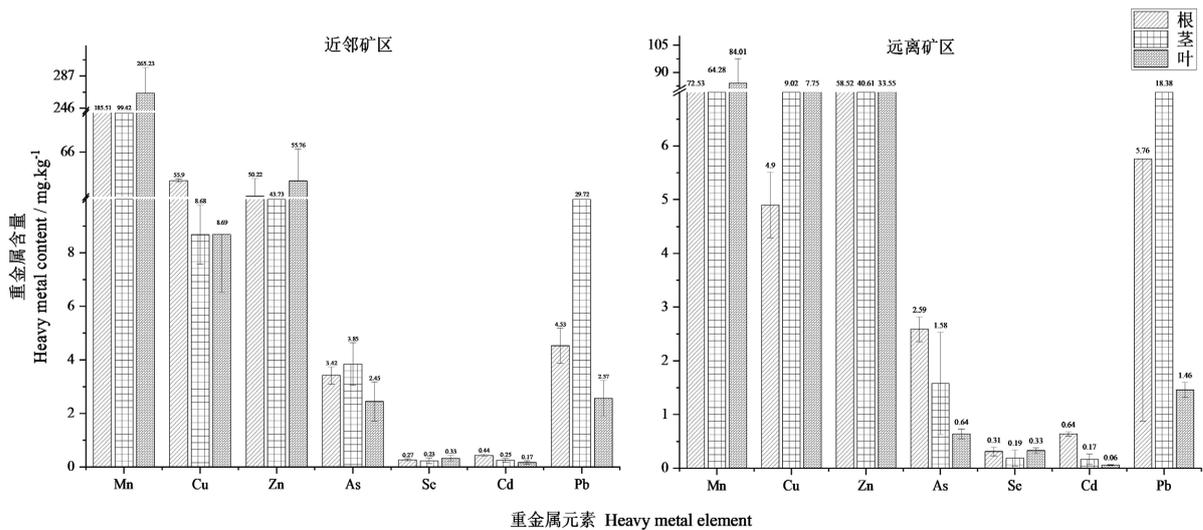


Figure 5. Comparison of heavy metal contents in different parts of mulberry trees in mulberry plantations around nonferrous metal mining areas

图 5. 有色金属矿区周边桑园桑树不同部位重金属含量比较

桑树具有较强的重金属耐性[37], 但不同桑树品种及同一桑树品种的不同部位对重金属的吸收和转运能力均有一定差异[38]。曾鹏等人发现, 桑树地上部分的镉、锌和锰含量明显大于其根部[39], 但本实验结果与其研究结果有较大差异。桑树不同部位对重金属吸收能力的差异, 既与其自身对重金属元素的吸收和转运能力有关, 也与其所在桑园的土壤理化性质、重金属元素的种类及有效态含量、栽培管理措

施、气候环境条件等因素有关。刘旭辉等人发现, 在桑树耐受的范围内, 尤其是栽培基质中重金属离子浓度较低时, 桑体内的重金属含量与栽培基质的重金属含量呈正相关, 但不一定呈线性关系[40]。在本研究中, 桑树不同部位的重金属含量与桑园土壤重金属含量的相关性分析结果见表 8。其中, 桑树地上部分(茎和叶)的铜含量与土壤中的铜含量呈负相关, 可能是由于桑树地上部分对铜的转运能力比较弱, 其根部从土壤中吸收的铜, 大部分累积在地下部分, 因而根部的铜含量相对较高, 该结果与黄秋娴、张兴等人所得结果相似[41] [42]。由于紧邻矿区桑园土壤的重金属含量相对较高(图 4), 所以, 紧邻矿区桑园中, 桑树不同部位重金属的平均含量大部分高于非紧邻矿区, 具体情况见图 5。

4.3. 桑树及相关产品的安全利用问题

过去, 由于人们的环保意识淡薄, 企业经营管理技术落后等诸多原因, 桂西北有色金属矿区及矿冶加工企业周边的大气、水体和土壤均受到不同程度的污染, 紧邻厂矿的区域污染问题更加严重[31]。厂矿周边的桑园及其他农地, 由于长期受到重金属等不良环境因子的影响, 农产品重金属含量超标是比较突出的问题[43]。桑树全身都是宝, 桑叶可饲用、食用和药用; 桑树茎皮纤维发达, 可以用于纺织, 也可用作其他轻工原材料; 桑枝、桑秆可用作薪柴, 也可以作为栽培食用菌、造纸和制作活性炭的原材料, 还可以提取生物活性成分, 用于疾病治疗[10] [44] [45]。在蚕桑资源合理利用和产品开发过程中, 如何在符合国家相关产品质量标准的前提下, 对有色金属矿区和矿冶加工企业周边的蚕桑产业进行合理布局和规划, 是值得认真考虑的问题[33]。在本研究所采样品的检测数据中, 部分桑树样品的重金属含量超标, 其中, 22.5%的桑叶铅含量和 15%的桑叶砷含量超出了食品安全国家标准, 27.5%的桑叶砷含量和 2.5%的桑叶镉含量超出了国家的饲料卫生标准。此外, 在所有的桑树根茎叶样品中, 被检测重金属的总量均超出了 20 mg/kg, 不宜直接作为药材使用[21]-[24], 该结果与王谢等人的研究结果相似[27], 但与谭勇壁[37]所得结果不完全一致。究其原因, 一方面可能是由于调查研究的地域及桑树品种不同, 另一方面可能是由于部分调查样地桑园土壤的重金属含量过高所致。

4.4. 矿区周边土地资源合理利用问题

相关研究表明, 桑树具有较强的重金属耐性和一定的吸收转运能力, 可以作为矿区周边重金属污染土壤的修复植物[5] [46]。蒋诗梦等人研究了桑树对土壤镉和铅复合污染的修复问题, 发现添加中浓度的螯合剂 DTPA 有利于土壤中 Cd 被桑苗吸收及 Pb 聚集在桑苗根部[47], 为利用桑树修复土壤重金属污染提供了有价值的参考。因此, 根据土壤重金属污染的具体情况, 不同植物的重金属耐性及富集和转运能力差异, 合理配置土壤重金属污染的修复物种, 充分发挥桑树及其他非粮作物在土壤环境治理中的作用, 同时兼顾生态效益和经济效益, 可促进有色金属矿区及周边地区经济可持续发展[6] [39] [42]。

4.5. 桑园土壤重金属污染的治理对策

土壤重金属污染治理是一个长期而复杂的过程, 涉及诸多因素, 不可能一蹴而就, 必须从源头治理, 节能减排, 综合施策。桑树具有重要的经济价值和生态价值[11] [12] [46]。在乡村振兴, 建设美丽中国, 推动绿色发展的时代背景下, 桂西北有色金属矿区周边桑园土壤重金属污染修复及蚕桑资源安全利用具有重要的现实意义。如何选择适合欠发达地区土壤重金属污染修复的技术方法, 使之更具操作性和推广价值, 是值得认真思考的问题。国内外学者对土壤重金属污染生态修复进行大量的研究和探索, 并取得了一些理论成果和实践经验[39] [48]-[50], 但是, 不同研究区域的土壤重金属污染状况不同, 气候地理、物种分布及其他环境因子也有较大差异, 因此, 必须因地制宜, 具体问题具体分析。目前, 土壤重金属污染生物修复的主要方法有: 超富集植物修复、植物-微生物联合修复[51]-[54]、菌根和根内生菌强化植

物修复[55]-[58]、钝化剂 + 植物修复[59]-[62]、螯合剂 + 植物修复[63] [64]、农艺措施辅助植物修复[65]、筛选重金属低累积品种进行植物修复[66] [67], 等等。笔者认为, 在综合考虑成本及经济效益的前提下, 桂西北有色金属矿区周边桑园土壤重金属污染的治理, 可以通过筛选低累积、重金属耐性强的桑树品种与其他植物套种, 并辅以各种必要的农艺措施来实施; 也可以通过添加重金属钝化剂改良桑园土壤的方法, 逐步降低土壤重金属的生物有效性及其危害, 从而保证桑树的正常生长发育及产品安全利用的目的。若从实际运行的可行性角度考虑, 前者可能优于后者。

5. 结论

根据以上实验数据及分析讨论, 可得出以下结论:

- 1) 桂西北有色金属矿区周边桑园土壤的重金属污染比较严重, 被检测的 7 种重金属元素锰、铜、锌、砷、硒、镉、铅含量均超出广西土壤背景值, 最大超标倍数分别为 187.58、10.42、40.80、87.69、12.76、270.08、37.24, 其中, 镉的污染最为严重。
- 2) 不同重金属元素及不同桑园土壤的污染程度有一定的差异, 近邻矿区桑园土壤的重金属含量较高, 非近邻矿区桑园土壤的重金属含量相对较低, 前者污染比较严重, 后者污染程度相对较轻, 所有调查样地土壤的内梅罗综合污染指数均达到重度以上。
- 3) 调查样地桑园土壤重金属含量较高, 但桑树的重金属富集系数和转运系数较低, 说明桑树的重金属抗耐性较强, 有较强的土壤重金属污染修复及开发利用潜力。
- 4) 在有色金属矿区周边桑园栽种低累积及重金属耐性强的桑树品种, 并辅以其他农艺措施, 或通过改良土壤, 可以达到土地资源合理利用及蚕桑产品质量安全的目的。

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工程中心(桂教科研[2012] 9 号), 广西高校大学生创新创业训练计划项目(202010605066, 202510605028)。

参考文献

- [1] 乔小胖. 广西蚕桑产业发展现状与对策研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [2] 陈志明, 梁桂云, 莫招育, 等. 广西某矿区附近居民区道路灰尘重金属污染健康风险评估[J]. 环境与职业医学, 2016, 33(11): 1101-1105.
- [3] 王新帅, 林华, 俞果, 等. 桂北典型锰矿区周边土壤重金属污染状况及主要植物富集特征[J]. 广西植物, 2022, 42(7): 1160-1169.
- [4] Wan, X., Lei, M., Chen, T. and Yang, J. (2017) Intercropped *Pteris vittata* L. and *Morus alba* L. Presents a Safe Utilization Mode for Arsenic-Contaminated Soil. *Science of the Total Environment*, **579**, 1467-1475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.148>
- [5] Wan, X., Lei, M., Chen, T., Tan, Y. and Yang, J. (2017) Safe Utilization of Heavy-Metal-Contaminated Farmland by Mulberry Tree Cultivation and Silk Production. *Science of the Total Environment*, **599**, 1867-1873. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.150>
- [6] Si, L., Zhang, J., Hussain, A., Qiao, Y., Zhou, J. and Wang, X. (2021) Accumulation and Translocation of Food Chain in Soil-Mulberry (*Morus alba* L.)-Silkworm (*Bombyx mori*) under Single and Combined Stress of Lead and Cadmium. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **208**, Article 111582. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111582>
- [7] 蔡明. 桑叶作为动物饲料的安全性及饲用价值评价研究[D]: [博士学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [8] 钟志惠, 毛鸿霖, 徐向波, 等. 无糖桑叶紫米饼干的研制[J]. 粮食与油脂, 2021, 34(5): 87-90.
- [9] 管彦辉, 梁正维, 刘琨毅, 等. 三七茎叶-桑叶固体饮料工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6221-6229.

- [10] 陶程. 广西现行桑树品种枝条总生物碱、多糖、总黄酮含量的研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2018.
- [11] 何雪梅, 孙健, 梁贵秋, 等. 广西蚕区 16 个桑树品种的桑枝药用品质评价[J]. 蚕业科学, 2017, 43(3): 453-458.
- [12] Zhang, H.H., Li, X., Xu, Z.S., *et al.* (2020) Toxic Effects of Heavy Metals Pb and Cd on Mulberry (*Morus alba* L.) Seedling Leaves: Photosynthetic Function and Reactive Oxygen Species (ROS) Metabolism Responses. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **195**, Article 110469. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110469>
- [13] Nahvi, A., Hashemi, S.A. and Fallahchai, M.M. (2017) Studying the Ability to Absorb Heavy Metal of Cadmium on the Amount of Sugar and Chlorophyll Using Seedlings of Berry Specie (*Morus alba*) in Pollution Area. *Acta Ecologica Sinica*, **37**, 35-37. <https://doi.org/10.1016/j.chnaes.2016.08.006>
- [14] 阮玉龙, 李向东, 黎廷宇, 等. 喀斯特地区农田土壤重金属污染及其对人体健康的危害[J]. 地球与环境, 2015, 43(1): 92-97.
- [15] 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.
- [16] 李旭, 韦靖, 欧杨丽桃, 等. 不同有色金属矿区的三种植物中五种重金属元素含量的测定[J]. 福建分析测试, 2015, 24(5): 18-22.
- [17] 赵家印, 杨地, 杨湘智, 等. 云南省某煤矿开采遗址周边农用地土壤重金属污染评价及源解析研究[J]. 生态与农村环境学报, 2022, 38(11): 1473-1481.
- [18] 陈锦, 郭锦. 单因子法及综合污染指数法在矿山土壤重金属污染评价中的应用[J]. 世界有色金属, 2020(9): 281-282.
- [19] 广西环境科学研究所. 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: 215-223.
- [20] 生态环境部, 国家市场监督管理总局. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [21] 中华人民共和国卫生部. 食品安全国家标准: 食品营养强化剂使用标准: GB14880-2012 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2012.
- [22] 中华人民共和国国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局. 食品安全国家标准: 食品中污染物限量: GB 2762-2022 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料卫生标准: GB 13078-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [24] 中华人民共和国商务部. 药用植物及制剂进口绿色行业标准: WM/T2-2004 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [25] 任超, 杜倩倩, 夏炎, 等. 典型矿区农用地土壤重金属污染评价分区探讨[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(12): 1562-1567+1595.
- [26] 霍彦慧, 王美娥, 谢天, 等. 典型矿冶区周边农业用地农产品安全风险及影响因素[J]. 环境科学, 2021, 42(11): 5526-5534.
- [27] 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.
- [28] 范俊楠, 贺小敏, 陆泗进, 等. 湖北省重点行业企业周边土壤重金属污染现状及潜在生态危害评价[J]. 华中农业大学学报, 2018, 37(5): 74-80.
- [29] 黄钟霆, 易盛炜, 陈贝贝, 等. 典型锰矿区周边农田土壤-农作物重金属污染特征及生态风险评价[J]. 环境科学, 2022, 43(2): 975-984.
- [30] 杨利霞, 李颖, 刘靖祎, 等. 我国冶炼厂周边土壤重金属污染现状与风险评价[J]. 地球环境学报, 2022, 13(5): 618-630.
- [31] 黄奎贤, 覃柳妹, 吴少珍, 等. 广西河池市重金属污染现状分析与治理对策[J]. 广西科学院学报, 2012, 28(4): 320-324+329.
- [32] 曹见飞, 段欣荣, 吴泉源, 等. 金矿区周边农田土壤重金属源解析研究——以焦家金矿为例[J]. 环境污染与防治, 2021, 43(5): 546-552.
- [33] 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.
- [34] 刘旭辉, 覃勇荣, 黄振球, 等. 河池市矿产资源可持续利用与生态环境保护[J]. 河池学院学报, 2013, 33(2): 1-6.
- [35] 柴冠群, 刘桂华, 周玮, 等. 贵州乌蒙山区设施土壤重金属污染风险评估与来源解析[J]. 中国农业科技导报,

- 2022, 24(8): 144-153.
- [36] 黄卫, 庄荣浩, 刘辉, 等. 农田土壤镉污染现状与治理方法研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2022, 45(1): 49-56.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 刘旭辉, 李月兰, 李秋明, 等. 锌和镉胁迫下的桑树幼苗盆栽试验[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(4): 335-339.
- [41] 黄秋娟, 石娟华, 李玉灵, 等. 铁尾矿区沙棘-桑树混交林中重金属元素的积累与分配[J]. 蚕业科学, 2016, 42(5): 783-792.
- [42] 张兴, 王治, 揭雨成, 等. 桑树对矿区土壤中重金属的原位去除效应研究[J]. 中国农学通报, 2012, 28(7): 59-63.
- [43] 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.
- [44] 宋琼莉, 韦启鹏, 邹志恒, 等. 桑叶粉对育肥猪生长性能、肉质和血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(2): 541-547.
- [45] 王芳, 乔璐, 张庆庆, 等. 桑叶蛋白氨基酸组成分析及营养价值评价[J]. 食品科学, 2015, 36(1): 225-228.
- [46] 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.
- [47] 蒋诗梦, 黄仁志, 蒋勇兵, 等. 螯合剂对桑苗修复 Cd、Pb 复合污染土壤的影响[J]. 中国蚕业, 2020, 41(3): 4-8.
- [48] 彭瑜, 王海娟, 王宏锭. 农田土壤砷、镉协同钝化修复的研究进展[J]. 土壤, 2021, 53(4): 692-699.
- [49] 陈荣强, 雷小文, 欧阳克蕙, 等. 蚯蚓粪、沼液+饲料桑模式对废弃稀土矿区土壤改良效果研究[J]. 江西科学, 2020, 38(6): 881-902.
- [50] 樊宇红, 凌宏文, 朴河春. 桑树(*Morus alba*)与丛枝菌根的共生对重金属元素吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 477-484.
- [51] 张珣, 陈宝楠, 孙丽娜. 植物-微生物联合修复佳乐麝香与镉复合污染土壤的研究[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(2): 166-172.
- [52] 李海燕, 熊帜, 李欣亚, 等. 植物-微生物联合修复重金属污染土壤研究进展[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2017, 42(3): 81-88.
- [53] 杨晶, 孟晓庆, 李雪瑞. 植物-微生物联合修复重金属污染土壤现状研究[J]. 环境科学与管理, 2018, 43(11): 67-70.
- [54] 刘劲松, 张健君, 杨淑芳, 等. 内生菌参与植物/微生物联合修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 中国植保导刊, 2014, 34(2): 27-30.
- [55] 张玮川, 李剑, 王志宇, 等. 内生菌-植物联合修复污染土壤研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(3): 355-364.
- [56] 刘陈静. 内生菌强化商陆修复镉污染土壤效应及机制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 北京科技大学, 2022.
- [57] 古添源, 余黄, 曾伟民, 等. 功能内生菌强化超积累植物修复重金属污染土壤的研究进展[J]. 生命科学, 2018, 30(11): 1228-1235.
- [58] 胡睿. 重金属污染土壤的生物修复——菌根技术的应用[J]. 环境与可持续发展, 2013, 38(6): 50-52.
- [59] 何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8): 1734-1740.
- [60] 涂春艳, 蒋林伶, 张超兰, 等. 蚕沙有机肥-铁基复配材料对镉砷锌复合污染土壤的修复效应[J]. 南方农业学报, 2019, 50(11): 2436-2442.
- [61] 袁林, 赖星, 杨刚, 等. 钝化材料对镉污染农田原位钝化修复效果研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(3): 90-97.
- [62] 李飞跃, 沈皖豫, 吴旋, 等. 生物炭复配矿物质钝化修复重金属复合污染土壤的研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 195-200.
- [63] 刘晓娜, 赵中秋, 陈志霞, 等. 螯合剂、菌根联合植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(S2): 127-133.
- [64] 黄敏, 赵晓峰, 梁荣祥, 等. 3 种螯合剂对 Cd、Cu 复合污染土壤淋洗修复的对比研究[J]. 生态环境学报, 2022,

- 31(6): 1244-1252.
- [65] 彭红丽, 谭海霞, 王颖, 等. 不同种植模式下土壤重金属形态分布差异与生态风险评价[J]. 生态环境学报, 2022, 31(6): 1235-1243.
- [66] 冯爱焯, 贺红周, 李娜, 等. 基于多目标元素的重金属低累积水稻品种筛选及其吸收转运特征[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 988-1000.
- [67] 鄢小龙, 马宏朕, 李元, 等. 铅锌矿区周边农田 Cd、Pb 低累积玉米品种筛选[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2019, 34(6): 1076-1083.