

# 利用乡土树种修复重金属污染土壤的可行性分析

陈乐, 张治坤, 覃春, 黄慧琳, 刘旭辉\*, 覃勇荣\*

河池学院化学与生物工程学院, 广西 宜州

收稿日期: 2022年7月13日; 录用日期: 2022年8月12日; 发布日期: 2022年8月19日

## 摘要

为了说明利用乡土树种进行土壤重金属污染治理的可行性, 本研究利用ICP-MS测定了酸枣、桂花、阴香、大叶女贞和拐枣等5种乡土树种的叶片及其根际土壤的重金属含量, 采用单因子污染指数法、内梅罗污染指数法和地累积指数法对不同乡土树种根际土壤的重金属污染情况进行了评价, 并对不同乡土树种叶片的重金属富集系数和富集能力进行了比较分析。结果表明: 1) 研究区域土壤中的Mn、Cu、Zn、As、Cd、Pb等重金属元素含量远高于广西土壤和全国土壤的背景值, 达到重度污染, 其污染原因可能与矿物开采有关; 2) 酸枣、桂花、阴香、大叶女贞和拐枣对重金属具有较强的耐性, 虽然这些乡土树种叶片对重金属的富集系数较小, 但其累积的重金属总量较大; 3) 乡土树种生物量大, 适应性强, 对生境要求不高。因此, 如能对其进行合理配置, 再结合其他有效措施, 利用乡土树种对土壤重金属污染进行治理是可行的。

## 关键词

桂西北, 乡土树种, 重金属污染, 土壤修复

# Feasibility Analysis of Using Native Tree Species to Remediate Heavy Metal Contaminated Soil

Le Chen, Zhikun Zhang, Chun Qin, Huilin Huang, Xuhui Liu\*, Yongrong Qin\*

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

Received: Jul. 13<sup>th</sup>, 2022; accepted: Aug. 12<sup>th</sup>, 2022; published: Aug. 19<sup>th</sup>, 2022

\*通讯作者。

文章引用: 陈乐, 张治坤, 覃春, 黄慧琳, 刘旭辉, 覃勇荣. 利用乡土树种修复重金属污染土壤的可行性分析[J]. 环境保护前沿, 2022, 12(4): 793-808. DOI: 10.12677/aep.2022.124100

## Abstract

In order to illustrate the feasibility of using native tree species for soil heavy metal pollution control, ICP-MS was used to determine the heavy metal content in leaves and rhizosphere soils of five native tree species, including *Choerospondias axillaris*, *Osmanthus fragrans*, *Cinnamomum burmannii*, *Ligustrum lucidum* and *Hovenia dulcis*. The single-factor pollution index method, Nemerow pollution index method and geoaccumulation index method were used to evaluate the heavy metal pollution in the rhizosphere soil of different native tree species, and the heavy metal enrichment coefficient and enrichment capacity of leaves of different native tree species were compared and analyzed. The results show that: 1) The content of heavy metal elements such as Mn, Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the soil of the study area is much higher than the background value of the soil in Guangxi and the soil of the whole country, and has reached severe pollution. The cause of the pollution may be related to mineral mining. 2) *Choerospondias axillaris*, *Osmanthus fragrans*, *Cinnamomum burmannii*, *Ligustrum lucidum* and *Hovenia dulcis* have strong tolerance to heavy metals. Although the enrichment coefficients of these native tree species to heavy metals are small, the total amount of accumulated heavy metals is relatively large; 3) Native tree species have large biomass, strong adaptability and low requirements for habitat. Therefore, if it can be reasonably configured and combined with other effective measures, it is feasible to use native tree species to control soil heavy metal pollution.

## Keywords

The Northwest Guangxi, Native Tree Species, Heavy Metal Pollution, Soil Remediation

Copyright © 2022 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

我国土壤主要受镉、汞、砷、铜、铅、铬、锌、镍等重金属污染，镉的点位超标率最高，镍次之，分别为 7.0% 和 4.8% [1]；在我国现有的耕地中，重金属中度至重度污染的面积达 3488 万亩，轻微至轻度污染的面积达 7899 万亩。重金属毒性大，进入土壤后难以被降解，且具有累积性，会导致土壤环境质量恶化，食物链被污染，对人类的健康构成严重威胁，对生态系统的稳定造成不良影响[2] [3] [4]。

土壤重金属污染治理有多种方法。物理修复工程量大，难以大面积推广；化学修复不仅成本高，而且容易造成二次污染，植物修复则被认为是一种环境友好的绿色技术，具有处理成本低、效果持久、无二次污染的特点[5] [6]。因为目前发现的重金属超富集植物大多为草本植物[7]-[12]，所以，以往开展的土壤重金属污染植物修复试验，大多是考虑草本植物的应用，而对木本植物的研究相对较少，即使应用木本植物，关注的树种也主要是杨、柳、松、桦、杏、李、刺槐、泡桐、构树等[13] [14]。尽管超富集植物对土壤重金属的吸收效率比较高，但大部分草本超富集植物的生物量较小，从土壤中吸收和转运重金属的数量有限，如果单独利用草本超富集植物对重金属污染的土壤进行修复，则需要的时间比较长，难以快速取得人们预期的效果，因而在实际应用中往往不能很好地推广[15] [16]。与草本植物相比，木本植物具有根系发达、生命周期长、生物量大、重金属耐性强等优势。利用矿区周边自然生长或人工种植的乡土树种对重金属污染土壤进行修复，有助于充分发挥木本植物在环境修复中的各种优势，优化土壤重

金属污染植物修复的技术方案,提高土壤重金属污染治理的效率。

广西矿产资源丰富,但多年的开采和冶炼加工,对环境造成了一定程度的污染[17][18]。在土壤重金属污染植物修复方面,速生、分布广、耐性强的木本植物具有极大的开发利用潜力[19][20]。邱媛等人曾对广西河池大厂有色金属矿区周边三个村屯的沙梨(*pyrus pyrifolia*)、板栗(*Castanea mollissima*)、拐枣(*Hovenia acerba*)等8种乔木树种的叶片及其根部周围表土的重金属含量进行测定。结果发现,调查区域的土壤重金属含量均超过广西土壤背景值,其中Cd超标最为严重(超出广西土壤背景值1200倍);不同树种叶片对Mn、Zn、Cu、As、Cd、Sn、Sb、Pb等重金属元素均有一定程度的吸收能力,综合考虑食品安全和生态风险等因素,拐枣和樟树可以作为矿区土壤重金属污染修复的优选树种[21]。笔者对桂西北有色金属矿区重金属污染的植物修复问题进行了多年的调查研究[22]-[27],发现枫香(*Liquidambar formosana*)、银杏(*Ginkgo biloba*)、国槐(*Styphnolobium japonicum*)、紫玉兰(*Yulania liliiflora*)等乡土树种对Mn、Zn、As、Pb、Cu、Cd等重金属具有较强耐性和吸收能力[28],南酸枣(*Choerospondi asaxillaris*)、桂花(*Osmanthus fragrans*)、阴香(*Cinnamomum burmannii*)、大叶女贞(*Ligustrum lucidum*)及拐枣在桂西北有色金属矿区及其周边地区长势良好,猜想其对土壤重金属污染可能有较强的耐性和一定的修复作用。因此,采集了上述5种乡土树种的叶片及根际土壤样品,通过对样品重金属含量的测定,并结合常规的土壤理化分析,根据不同植物对重金属的耐性和吸收能力及其对环境的适应性,综合分析利用其修复重金属污染土壤的可行性,以便为广西有色金属矿区生态环境保护,以及土壤重金属污染植物修复优良树种的选择提供理论参考。

## 2. 材料与方 法

### 2.1. 样品的采集及处理

采样点选择在广西壮族自治区融安县和南丹县境内的选矿厂、冶炼厂及厂区周边等重金属异常区域。2019年8月及2021年8月,在选定的乡土树种采样点采集叶片样品和土壤样品并做好记录。采集植物叶片时,均选取3株以上长势良好的乡土树种,对其不同部位的正常叶片进行采集;采集相应植株的根际土壤时,按照常规采样方法采集0~20 cm的表土,做好相应标记和采样记录,尽快带回实验室进行处理。

叶片样品带回实验室后,将叶片表面的杂质洗涤干净后超声15 min,再用去离子水洗涤,置于干燥箱中60℃烘干,粉碎后过100目尼龙筛,装入标记好的塑料密封袋中,保存在阴凉干燥处,备用。土壤样品则置于阴凉干燥处自然风干,研磨过筛后,装入塑料密封袋中保存并做好标记,供土壤理化性质及重金属含量的测定。

### 2.2. 实验方法

#### 2.2.1. 土壤理化性质的测定

土壤pH的测定用电位法(水土比为2.5:1);土壤水分含量的测定用重量法,土壤全磷含量的测定用氢氧化钠熔融—钼锑抗比色法,土壤速效磷含量的测定用碳酸氢钠浸提法[29];土壤有机质含量的测定用重铬酸钾氧化—分光光度法[30];土壤全氮含量的测定用凯氏定氮法[31]。

#### 2.2.2. 重金属含量的测定

采用湿法消解植物和土壤样品后,用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)对锰、铜、锌、砷、镉及铅6种金属元素的全量进行测定[32][33][34];土壤样品重金属元素有效态含量的测定,用EDTA-2Na浸提,电感耦合等离子体质谱法[35][36]。

### 2.2.3. 土壤重金属污染评价

研究区域不同乡土树种根际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[37]。

### 2.3. 数据处理

在本样品测试的过程中, 每个样品的测定均做 3 个重复, 结果取平均值, 以“平均值  $\pm$  标准差”形式表示。数据的处理分析, 分别用数据统计软件 Excel 2010、SPSS 22.0 进行, 实验结果数据图的绘制用 Origin 9.0 进行; 用最小显著差异法(LSD)进行实验数据的多重比较分析。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 不同乡土树种根际土壤的理化特性

不同乡土树种根际土壤理化性质的测定结果见表 1。由此可知, 采样点土壤的 pH 为 5.61~7.28, 含水量为 0.20~5.84%, 土壤有机质含量为 9.51~65.37 g/kg, 全氮含量为 0.16~1.54 g/kg, 全磷含量为 0.03~1.21 g/kg, 速效磷含量为 7.66~159.84 mg/kg。土壤 pH 中性偏酸, 含水量较低。根据全国第二次土壤普查养分分级标准[38], 本研究不同乡土树种根际土壤有机质含量普遍丰富; 而不同采样点乡土树种根际土壤的全氮含量则比较缺乏; 酸枣树种根际土壤全磷含量极缺乏, 桂花、阴香及大叶女贞根际土壤全磷含量介于极缺乏、很缺乏和缺乏之间, 拐枣根际土壤全磷含量总体较缺乏; 速效磷含量总体较丰富。以上结果说明本研究的 5 种乡土树种具有一定的耐旱能力, 且在缺氮、缺磷的土壤环境中均能正常生长。多重比较结果显示, 在相同树种的不同个体中, 同一土壤理化指标的数值均存在一定的差异, 说明乡土树种的适应性广, 对生境没有特殊要求。

**Table 1.** Results of physical and chemical properties of rhizosphere soils of different native tree species  
**表 1.** 不同乡土树种根际土壤的理化性质测定结果

树种	pH	MC(%)	SOM(g/kg)	TN(g/kg)	TP(g/kg)	AP(mg/kg)
SZ1	7.11 $\pm$ 0.03 <sup>de</sup>	1.61 $\pm$ 0.00 <sup>P</sup>	16.68 $\pm$ 1.02 <sup>f</sup>	0.46 $\pm$ 0.02 <sup>m</sup>	0.14 $\pm$ 0.00 <sup>n</sup>	29.54 $\pm$ 1.21 <sup>hi</sup>
SZ2	7.24 $\pm$ 0.02 <sup>ab</sup>	0.20 $\pm$ 0.00 <sup>s</sup>	9.51 $\pm$ 1.01 <sup>s</sup>	0.16 $\pm$ 0.01 <sup>n</sup>	0.03 $\pm$ 0.00 <sup>P</sup>	9.68 $\pm$ 0.76 <sup>mn</sup>
SZ3	7.28 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	2.10 $\pm$ 0.00 <sup>lm</sup>	31.55 $\pm$ 0.38 <sup>o</sup>	0.44 $\pm$ 0.02 <sup>m</sup>	0.17 $\pm$ 0.00 <sup>lm</sup>	27.83 $\pm$ 1.42 <sup>i</sup>
SZ4	7.02 $\pm$ 0.03 <sup>fg</sup>	5.84 $\pm$ 0.00 <sup>a</sup>	49.36 $\pm$ 0.59 <sup>efg</sup>	1.02 $\pm$ 0.06 <sup>cd</sup>	0.15 $\pm$ 0.00 <sup>mn</sup>	8.69 $\pm$ 0.40 <sup>mn</sup>
SZ5	7.28 $\pm$ 0.02 <sup>a</sup>	1.03 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>	22.87 $\pm$ 0.07 <sup>q</sup>	0.46 $\pm$ 0.03 <sup>m</sup>	0.04 $\pm$ 0.02 <sup>o</sup>	9.98 $\pm$ 1.56 <sup>mn</sup>
GH1	6.90 $\pm$ 0.04 <sup>jk</sup>	2.57 $\pm$ 0.00 <sup>i</sup>	50.75 $\pm$ 0.96 <sup>de</sup>	0.69 $\pm$ 0.01 <sup>kl</sup>	0.14 $\pm$ 0.01 <sup>mn</sup>	14.47 $\pm$ 2.3 <sup>kl</sup>
GH2	6.94 $\pm$ 0.01 <sup>hij</sup>	2.74 $\pm$ 0.00 <sup>b</sup>	50.65 $\pm$ 0.48 <sup>de</sup>	0.84 $\pm$ 0.12 <sup>fgh</sup>	0.14 $\pm$ 0.01 <sup>mn</sup>	65.24 $\pm$ 1.51 <sup>c</sup>
GH3	6.94 $\pm$ 0.11 <sup>hij</sup>	1.30 $\pm$ 0.00 <sup>q</sup>	37.83 $\pm$ 0.04 <sup>kl</sup>	0.83 $\pm$ 0.03 <sup>fghi</sup>	0.30 $\pm$ 0.03 <sup>k</sup>	48.88 $\pm$ 2.08 <sup>e</sup>
GH4	6.42 $\pm$ 0.08 <sup>P</sup>	2.08 $\pm$ 0.00 <sup>m</sup>	55.92 $\pm$ 0.11 <sup>c</sup>	0.78 $\pm$ 0.03 <sup>hijk</sup>	0.36 $\pm$ 0.01 <sup>j</sup>	38.98 $\pm$ 1.49 <sup>f</sup>
GH5	6.77 $\pm$ 0.04 <sup>mn</sup>	2.19 $\pm$ 0.00 <sup>kl</sup>	47.80 $\pm$ 0.27 <sup>g</sup>	0.81 $\pm$ 0.05 <sup>ghi</sup>	0.31 $\pm$ 0.01 <sup>k</sup>	48.23 $\pm$ 1.19 <sup>e</sup>
YX1	6.82 $\pm$ 0.03 <sup>lm</sup>	2.17 $\pm$ 0.00 <sup>klm</sup>	48.12 $\pm$ 0.90 <sup>fg</sup>	0.96 $\pm$ 0.02 <sup>de</sup>	0.13 $\pm$ 0.00 <sup>n</sup>	11.75 $\pm$ 1.72 <sup>lm</sup>
YX2	7.01 $\pm$ 0.04 <sup>fgh</sup>	2.65 $\pm$ 0.00 <sup>hi</sup>	45.27 $\pm$ 0.56 <sup>h</sup>	0.80 $\pm$ 0.01 <sup>ghij</sup>	0.14 $\pm$ 0.00 <sup>n</sup>	16.84 $\pm$ 3.16 <sup>k</sup>
YX3	6.67 $\pm$ 0.04 <sup>o</sup>	2.27 $\pm$ 0.00 <sup>k</sup>	49.76 $\pm$ 0.39 <sup>ef</sup>	0.96 $\pm$ 0.01 <sup>de</sup>	0.46 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>	75.01 $\pm$ 3.58 <sup>b</sup>
YX4	6.82 $\pm$ 0.01 <sup>klm</sup>	2.25 $\pm$ 0.00 <sup>k</sup>	48.34 $\pm$ 0.34 <sup>fg</sup>	0.90 $\pm$ 0.06 <sup>efg</sup>	0.40 $\pm$ 0.02 <sup>hi</sup>	57.49 $\pm$ 1.13 <sup>d</sup>
YX5	7.19 $\pm$ 0.04 <sup>bc</sup>	3.55 $\pm$ 0.00 <sup>f</sup>	36.96 $\pm$ 0.49 <sup>lm</sup>	0.72 $\pm$ 0.03 <sup>ijkl</sup>	0.43 $\pm$ 0.00 <sup>g</sup>	50.18 $\pm$ 2.52 <sup>e</sup>

Continued

DYNZ1	7.05 ± 0.05 <sup>ef</sup>	1.35 ± 0.00 <sup>q</sup>	48.70 ± 1.35 <sup>fg</sup>	0.69 ± 0.04 <sup>kl</sup>	0.19 ± 0.00 <sup>l</sup>	21.24 ± 2.66 <sup>j</sup>
DYNZ2	6.50 ± 0.02 <sup>p</sup>	1.61 ± 0.00 <sup>p</sup>	52.03 ± 1.04 <sup>d</sup>	0.93 ± 0.03 <sup>def</sup>	0.53 ± 0.00 <sup>e</sup>	159.84 ± 3.06 <sup>a</sup>
DYNZ3	6.44 ± 0.02 <sup>p</sup>	3.16 ± 0.00 <sup>s</sup>	46.02 ± 0.35 <sup>h</sup>	0.85 ± 0.04 <sup>gh</sup>	0.18 ± 0.01 <sup>l</sup>	7.66 ± 0.59 <sup>n</sup>
GZ1	6.92 ± 0.03 <sup>ij</sup>	1.73 ± 0.00 <sup>o</sup>	39.17 ± 0.44 <sup>jk</sup>	0.69 ± 0.03 <sup>kl</sup>	0.29 ± 0.01 <sup>k</sup>	32.97 ± 0.48 <sup>gh</sup>
GZ2	6.98 ± 0.05 <sup>ghi</sup>	2.66 ± 0.00 <sup>hi</sup>	38.94 ± 0.62 <sup>k</sup>	0.93 ± 0.02 <sup>def</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>hi</sup>	27.94 ± 1.21 <sup>i</sup>
GZ3	6.83 ± 0.04 <sup>klm</sup>	3.82 ± 0.00 <sup>d</sup>	41.43 ± 0.52 <sup>i</sup>	1.54 ± 0.13 <sup>a</sup>	1.21 ± 0.00 <sup>a</sup>	157.35 ± 1.41 <sup>a</sup>
GZ4	6.96 ± 0.02 <sup>ghij</sup>	1.83 ± 0.00 <sup>n</sup>	24.91 ± 0.20 <sup>p</sup>	0.69 ± 0.03 <sup>kl</sup>	0.39 ± 0.01 <sup>i</sup>	35.16 ± 0.56 <sup>fg</sup>
GZ5	6.71 ± 0.01 <sup>no</sup>	4.36 ± 0.00 <sup>b</sup>	54.66 ± 1.87 <sup>c</sup>	1.11 ± 0.05 <sup>bc</sup>	0.54 ± 0.02 <sup>e</sup>	34.04 ± 1.00 <sup>g</sup>
GZ6	5.61 ± 0.01 <sup>t</sup>	4.11 ± 0.00 <sup>c</sup>	48.27 ± 1.35 <sup>fg</sup>	1.09 ± 0.06 <sup>bc</sup>	0.88 ± 0.01 <sup>b</sup>	34.01 ± 1.62 <sup>g</sup>
GZ7	6.00 ± 0.04 <sup>q</sup>	3.68 ± 0.00 <sup>e</sup>	40.84 ± 0.86 <sup>ij</sup>	1.02 ± 0.02 <sup>cd</sup>	0.41 ± 0.01 <sup>ghi</sup>	67.24 ± 0.70 <sup>c</sup>
GZ8	7.15 ± 0.04 <sup>cd</sup>	2.40 ± 0.00 <sup>j</sup>	34.23 ± 0.10 <sup>n</sup>	0.65 ± 0.05 <sup>l</sup>	0.65 ± 0.01 <sup>c</sup>	72.49 ± 3.46 <sup>b</sup>
GZ9	6.89 ± 0.04 <sup>kl</sup>	2.57 ± 0.00 <sup>i</sup>	35.36 ± 0.14 <sup>mn</sup>	0.89 ± 0.02 <sup>efg</sup>	0.42 ± 0.01 <sup>gh</sup>	74.55 ± 1.20 <sup>b</sup>
GZ10	5.72 ± 0.02 <sup>s</sup>	3.74 ± 0.00 <sup>de</sup>	65.37 ± 0.69 <sup>a</sup>	1.13 ± 0.05 <sup>b</sup>	0.58 ± 0.02 <sup>d</sup>	23.72 ± 2.86 <sup>j</sup>
GZ11	5.85 ± 0.01 <sup>t</sup>	3.82 ± 0.00 <sup>d</sup>	59.21 ± 0.68 <sup>b</sup>	1.09 ± 0.05 <sup>bc</sup>	0.59 ± 0.02 <sup>d</sup>	21.66 ± 1.21 <sup>j</sup>

注：① SZ、GH、YX、DYNZ、GZ 分别为酸枣、桂花、阴香、大叶女贞和拐枣，下同；② 表中 pH、MC、SOM、TN、TP、AP 分别指土壤 pH 值、含水量、有机质、全氮、全磷和速效磷含量；③ 同一列数据中的不同小写字母表示差异显著(p < 0.05)，下同。

### 3.2. 不同乡土树种根际土壤的重金属含量

乡土树种根际土壤的重金属全量的测定结果见表 2，有效态含量的测定结果见表 3。由此可知，在所测的 Mn、Cu、Zn、As、Cd、Pb 等 6 种元素中，其有效态含量分别为全量的 4.55%~70.49%、6.37%~95.59%、8.70%~79.03%、0.02%~31.30%、12.18%~86.80%和 12.75%~89.54%。

**Table 2.** Total amount of heavy metals in the rhizosphere soil of different native tree species (mg/kg)

**表 2.** 不同乡土树种根际土壤的重金属全量(mg/kg)

编号	Mn	Cu	Zn	As	Cd	Pb
SZ1	85.69 ± 1.05 <sup>n</sup>	44.96 ± 1.88 <sup>q</sup>	2799.09 ± 29.45 <sup>qr</sup>	18.00 ± 3.05 <sup>m</sup>	36.11 ± 0.74 <sup>mn</sup>	379.94 ± 7.98 <sup>u</sup>
SZ2	139.61 ± 3.54 <sup>n</sup>	45.94 ± 8.10 <sup>pq</sup>	38967.58 ± 297.86 <sup>b</sup>	21.40 ± 1.92 <sup>lm</sup>	172.13 ± 3.36 <sup>c</sup>	1281.25 ± 22.43 <sup>qr</sup>
SZ3	1077.50 ± 18.42 <sup>ij</sup>	87.01 ± 0.53 <sup>mno</sup>	39645.09 ± 692.19 <sup>b</sup>	105.99 ± 5.21 <sup>klm</sup>	240.65 ± 3.04 <sup>b</sup>	11046.95 ± 69.39 <sup>b</sup>
SZ4	2410.02 ± 157.08 <sup>c</sup>	147.09 ± 26.51 <sup>hij</sup>	26941.92 ± 868.06 <sup>d</sup>	340.71 ± 49.15 <sup>j</sup>	168.67 ± 2.87 <sup>c</sup>	7377.40 ± 133.52 <sup>c</sup>
SZ5	838.81 ± 14.05 <sup>k</sup>	80.65 ± 0.95 <sup>mno</sup>	30836.03 ± 152.24 <sup>c</sup>	179.11 ± 0.29 <sup>iklm</sup>	243.34 ± 3.07 <sup>b</sup>	5121.11 ± 8.36 <sup>ef</sup>
GH1	3127.00 ± 46.22 <sup>a</sup>	151.94 ± 0.29 <sup>hi</sup>	21565.53 ± 281.59 <sup>s</sup>	169.38 ± 4.28 <sup>ijklm</sup>	170.79 ± 0.75 <sup>c</sup>	3862.93 ± 31.52 <sup>b</sup>
GH2	606.68 ± 10.55 <sup>l</sup>	91.96 ± 4.73 <sup>lmn</sup>	19258.15 ± 98.09 <sup>h</sup>	134.29 ± 11.58 <sup>ijklm</sup>	199.60 ± 5.91 <sup>c</sup>	3273.86 ± 19.36 <sup>k</sup>
GH3	1215.00 ± 4.25 <sup>h</sup>	125.96 ± 3.92 <sup>ijkl</sup>	22898.57 ± 328.54 <sup>f</sup>	227.74 ± 2.37 <sup>ijklm</sup>	185.76 ± 2.41 <sup>d</sup>	4975.36 ± 103.13 <sup>fg</sup>
GH4	1055.69 ± 8.65 <sup>j</sup>	142.42 ± 1.23 <sup>hijk</sup>	13963.95 ± 333.40 <sup>j</sup>	153.37 ± 7.54 <sup>ijklm</sup>	120.58 ± 4.61 <sup>gh</sup>	3472.75 ± 9.92 <sup>j</sup>
GH5	613.70 ± 1.93 <sup>l</sup>	82.03 ± 4.09 <sup>mno</sup>	11828.44 ± 31.89 <sup>j</sup>	117.15 ± 1.10 <sup>ijklm</sup>	99.46 ± 1.73 <sup>i</sup>	2330.65 ± 0.49 <sup>m</sup>
YX1	2176.85 ± 29.00 <sup>d</sup>	132.61 ± 9.56 <sup>ijk</sup>	25369.65 ± 103.45 <sup>e</sup>	242.71 ± 0.24 <sup>ijkl</sup>	206.43 ± 0.83 <sup>c</sup>	4827.24 ± 38.92 <sup>g</sup>
YX2	445.84 ± 12.64 <sup>m</sup>	54.16 ± 2.62 <sup>opq</sup>	6704.61 ± 54.67 <sup>no</sup>	57.13 ± 2.97 <sup>klm</sup>	50.12 ± 2.29 <sup>kl</sup>	1184.00 ± 9.68 <sup>r</sup>
YX3	839.92 ± 16.17 <sup>k</sup>	113.30 ± 8.07 <sup>ijklm</sup>	14316.84 ± 955.49 <sup>j</sup>	220.78 ± 8.65 <sup>ijklm</sup>	151.48 ± 16.89 <sup>f</sup>	2960.65 ± 211.08 <sup>l</sup>
YX4	1206.99 ± 11.19 <sup>h</sup>	141.87 ± 1.83 <sup>hijk</sup>	14170.38 ± 32.79 <sup>j</sup>	223.14 ± 13.77 <sup>ijklm</sup>	129.89 ± 1.71 <sup>g</sup>	3269.23 ± 18.72 <sup>k</sup>
YX5	2107.46 ± 52.44 <sup>d</sup>	207.17 ± 10.69 <sup>ef</sup>	57359.10 ± 880.82 <sup>a</sup>	147.21 ± 4.91 <sup>ijklm</sup>	60.04 ± 0.79 <sup>k</sup>	14387.09 ± 118.96 <sup>a</sup>

Continued

DYNZ1	850.53 ± 30.86 <sup>k</sup>	125.54 ± 3.55 <sup>ijkl</sup>	18404.92 ± 473.33 <sup>h</sup>	263.00 ± 19.71 <sup>jk</sup>	163.84 ± 7.70 <sup>ef</sup>	3167.36 ± 45.85 <sup>k</sup>
DYNZ2	576.35 ± 6.91 <sup>l</sup>	74.49 ± 8.71 <sup>nopq</sup>	5214.71 ± 8.22 <sup>p</sup>	55.27 ± 2.42 <sup>klm</sup>	42.27 ± 2.29 <sup>lm</sup>	987.30 ± 15.79 <sup>st</sup>
DYNZ3	1564.37 ± 5.30 <sup>e</sup>	91.86 ± 2.83 <sup>lmn</sup>	7465.88 ± 43.76 <sup>n</sup>	109.46 ± 2.13 <sup>klm</sup>	60.05 ± 1.21 <sup>k</sup>	1468.99 ± 17.28 <sup>p</sup>
GZ1	607.15 ± 5.01 <sup>l</sup>	75.86 ± 2.38 <sup>nopq</sup>	7665.40 ± 25.16 <sup>n</sup>	78.38 ± 0.30 <sup>klm</sup>	60.69 ± 2.83 <sup>k</sup>	1422.39 ± 12.08 <sup>pd</sup>
GZ2	1219.83 ± 30.11 <sup>h</sup>	253.35 ± 1.97 <sup>d</sup>	9059.93 ± 21.48 <sup>m</sup>	3607.93 ± 59.52 <sup>e</sup>	78.36 ± 1.14 <sup>j</sup>	3857.06 ± 20.23 <sup>h</sup>
GZ3	1060.03 ± 2.45 <sup>j</sup>	170.84 ± 5.64 <sup>gh</sup>	5792.65 ± 170.78 <sup>op</sup>	4970.05 ± 197.30 <sup>c</sup>	42.70 ± 0.06 <sup>lm</sup>	1638.18 ± 17.27 <sup>no</sup>
GZ4	920.75 ± 14.85 <sup>k</sup>	234.85 ± 0.28 <sup>dc</sup>	6059.97 ± 144.00 <sup>op</sup>	4220.39 ± 115.47 <sup>f</sup>	52.41 ± 1.33 <sup>kl</sup>	986.53 ± 1.49 <sup>st</sup>
GZ5	1443.63 ± 28.40 <sup>fg</sup>	187.61 ± 13.10 <sup>fg</sup>	3633.01 ± 121.96 <sup>q</sup>	3699.28 ± 116.48 <sup>e</sup>	33.01 ± 1.19 <sup>mn</sup>	837.34 ± 21.23 <sup>t</sup>
GZ6	1489.52 ± 72.31 <sup>efg</sup>	468.75 ± 27.03 <sup>b</sup>	6709.91 ± 204.04 <sup>no</sup>	12226.51 ± 340.90 <sup>a</sup>	57.12 ± 0.20 <sup>k</sup>	1786.86 ± 94.33 <sup>n</sup>
GZ7	503.68 ± 6.66 <sup>lm</sup>	108.91 ± 6.44 <sup>klmn</sup>	2169.26 ± 5.41 <sup>r</sup>	866.46 ± 18.53 <sup>i</sup>	12.50 ± 1.07 <sup>o</sup>	999.67 ± 12.60 <sup>s</sup>
GZ8	2632.34 ± 26.39 <sup>b</sup>	301.32 ± 1.32 <sup>c</sup>	15363.60 ± 44.87 <sup>i</sup>	7947.55 ± 191.50 <sup>b</sup>	119.49 ± 1.58 <sup>gh</sup>	3639.70 ± 39.33 <sup>i</sup>
GZ9	1556.50 ± 28.47 <sup>ef</sup>	150.23 ± 12.63 <sup>hi</sup>	3697.75 ± 62.57 <sup>q</sup>	3050.23 ± 174.84 <sup>h</sup>	27.71 ± 0.58 <sup>n</sup>	1560.07 ± 12.73 <sup>op</sup>
GZ10	1193.25 ± 103.91 <sup>hi</sup>	462.63 ± 35.96 <sup>b</sup>	12851.79 ± 781.99 <sup>k</sup>	6195.35 ± 22.80 <sup>d</sup>	110.90 ± 14.37 <sup>hi</sup>	5549.03 ± 72.18 <sup>d</sup>
GZ11	1405.34 ± 56.94 <sup>g</sup>	1004.97 ± 30.46 <sup>a</sup>	27267.96 ± 262.42 <sup>d</sup>	7257.54 ± 83.76 <sup>c</sup>	296.43 ± 7.18 <sup>a</sup>	5140.86 ± 110.18 <sup>c</sup>

**Table 3.** The available content of heavy metals in the rhizosphere soil of different native tree species (mg/kg)  
**表 3.** 不同乡土树种根际土壤的重金属有效态含量(mg/kg)

编号	Mn	Cu	Zn	As	Cd	Pb
SZ1	59.55 ± 1.58 <sup>no</sup>	9.11 ± 0.49 <sup>op</sup>	2212.09 ± 65.37 <sup>n</sup>	5.63 ± 0.71 <sup>jk</sup>	8.33 ± 0.24 <sup>qr</sup>	253.46 ± 5.91 <sup>o</sup>
SZ2	31.35 ± 1.35 <sup>o</sup>	12.60 ± 0.03 <sup>no</sup>	14200.12 ± 24.51 <sup>d</sup>	3.50 ± 0.98 <sup>jk</sup>	73.15 ± 1.73 <sup>e</sup>	856.38 ± 7.93 <sup>jk</sup>
SZ3	150.55 ± 12.88 <sup>jk</sup>	27.41 ± 2.12 <sup>klm</sup>	24025.15 ± 744.99 <sup>a</sup>	4.01 ± 0.00 <sup>jk</sup>	76.77 ± 1.10 <sup>d</sup>	9891.58 ± 70.01 <sup>a</sup>
SZ4	1055.81 ± 48.35 <sup>a</sup>	27.31 ± 1.17 <sup>klm</sup>	9083.51 ± 64.12 <sup>e</sup>	1.06 ± 0.22 <sup>k</sup>	79.14 ± 3.76 <sup>d</sup>	3720.23 ± 140.65 <sup>c</sup>
SZ5	135.13 ± 12.06 <sup>jk</sup>	23.34 ± 0.92 <sup>m</sup>	18696.19 ± 205.96 <sup>b</sup>	3.74 ± 0.25 <sup>jk</sup>	112.62 ± 1.26 <sup>b</sup>	2583.32 ± 3.49 <sup>d</sup>
GH1	501.01 ± 14.00 <sup>c</sup>	145.23 ± 0.29 <sup>a</sup>	16806.24 ± 48.39 <sup>c</sup>	4.24 ± 0.27 <sup>jk</sup>	146.95 ± 1.67 <sup>a</sup>	2663.19 ± 19.15 <sup>d</sup>
GH2	262.16 ± 1.90 <sup>fg</sup>	37.80 ± 0.17 <sup>h</sup>	10827.12 ± 209.57 <sup>c</sup>	7.45 ± 0.44 <sup>j</sup>	62.26 ± 1.29 <sup>f</sup>	2623.33 ± 26.77 <sup>d</sup>
GH3	82.93 ± 0.84 <sup>lmn</sup>	36.02 ± 1.11 <sup>h</sup>	5947.16 ± 87.93 <sup>h</sup>	1.87 ± 0.44 <sup>jk</sup>	61.64 ± 0.73 <sup>f</sup>	2014.74 ± 12.05 <sup>e</sup>
GH4	67.19 ± 4.37 <sup>mnop</sup>	37.87 ± 1.31 <sup>h</sup>	4357.61 ± 16.83 <sup>ij</sup>	0.80 ± 0.16 <sup>k</sup>	49.46 ± 2.90 <sup>hi</sup>	1065.16 ± 19.65 <sup>i</sup>
GH5	107.51 ± 4.01 <sup>klm</sup>	24.60 ± 0.39 <sup>lm</sup>	4533.71 ± 3.20 <sup>ij</sup>	2.69 ± 0.19 <sup>jk</sup>	52.38 ± 0.41 <sup>h</sup>	914.01 ± 1.13 <sup>j</sup>
YX1	176.25 ± 6.58 <sup>il</sup>	44.93 ± 0.51 <sup>fg</sup>	8998.52 ± 112.70 <sup>g</sup>	0.38 ± 0.02 <sup>k</sup>	91.65 ± 1.00 <sup>c</sup>	1862.47 ± 70.64 <sup>f</sup>
YX2	222.65 ± 2.27 <sup>gh</sup>	15.15 ± 0.09 <sup>n</sup>	2188.62 ± 2.18 <sup>n</sup>	0.15 ± 0.21 <sup>k</sup>	30.24 ± 1.32 <sup>lm</sup>	806.22 ± 6.28 <sup>k</sup>
YX3	58.21 ± 1.17 <sup>no</sup>	17.41 ± 0.23 <sup>n</sup>	2945.64 ± 11.05 <sup>m</sup>	2.83 ± 0.26 <sup>jk</sup>	45.16 ± 0.27 <sup>j</sup>	1116.60 ± 12.22 <sup>i</sup>
YX4	54.89 ± 1.40 <sup>no</sup>	28.57 ± 0.96 <sup>ijkl</sup>	3325.80 ± 30.22 <sup>kl</sup>	2.20 ± 0.14 <sup>jk</sup>	45.41 ± 0.39 <sup>j</sup>	1072.33 ± 34.01 <sup>i</sup>
YX5	278.85 ± 4.96 <sup>f</sup>	30.79 ± 0.25 <sup>ijk</sup>	10385.41 ± 18.56 <sup>f</sup>	0.03 ± 0.05 <sup>k</sup>	27.09 ± 0.79 <sup>n</sup>	5871.50 ± 10.90 <sup>b</sup>
DYNZ1	44.85 ± 1.57 <sup>no</sup>	29.87 ± 0.70 <sup>jk</sup>	3435.35 ± 123.29 <sup>k</sup>	1.46 ± 0.17 <sup>k</sup>	36.55 ± 1.25 <sup>k</sup>	808.24 ± 17.06 <sup>k</sup>
DYNZ2	58.39 ± 3.02 <sup>no</sup>	7.36 ± 0.92 <sup>p</sup>	779.29 ± 51.65 <sup>p</sup>	0.12 ± 0.21 <sup>k</sup>	9.67 ± 0.27 <sup>qr</sup>	297.42 ± 12.43 <sup>no</sup>
DYNZ3	115.05 ± 101.18 <sup>kl</sup>	5.86 ± 0.81 <sup>p</sup>	649.90 ± 97.11 <sup>p</sup>	0.21 ± 0.37 <sup>k</sup>	7.32 ± 0.57 <sup>r</sup>	246.88 ± 29.28 <sup>o</sup>
GZ1	217.77 ± 0.25 <sup>ghi</sup>	26.64 ± 1.05 <sup>klm</sup>	2765.87 ± 29.07 <sup>m</sup>	1.28 ± 0.19 <sup>k</sup>	38.15 ± 0.60 <sup>k</sup>	804.28 ± 6.46 <sup>k</sup>
GZ2	215.38 ± 3.30 <sup>hi</sup>	35.47 ± 0.71 <sup>hi</sup>	1940.67 ± 11.11 <sup>n</sup>	178.32 ± 5.19 <sup>a</sup>	16.01 ± 0.89 <sup>p</sup>	491.67 ± 0.60 <sup>m</sup>
GZ3	339.55 ± 2.42 <sup>e</sup>	81.57 ± 0.80 <sup>d</sup>	3029.62 ± 83.31 <sup>lm</sup>	91.95 ± 7.25 <sup>d</sup>	31.64 ± 0.39 <sup>j</sup>	1330.14 ± 9.28 <sup>h</sup>
GZ4	446.02 ± 9.23 <sup>d</sup>	63.91 ± 0.32 <sup>e</sup>	2686.47 ± 3.88 <sup>m</sup>	81.49 ± 0.88 <sup>e</sup>	27.33 ± 0.52 <sup>mn</sup>	516.06 ± 2.94 <sup>lm</sup>
GZ5	534.78 ± 2.01 <sup>c</sup>	49.50 ± 1.04 <sup>f</sup>	1530.86 ± 22.65 <sup>o</sup>	173.45 ± 1.54 <sup>a</sup>	20.32 ± 0.91 <sup>o</sup>	532.61 ± 10.50 <sup>lm</sup>
GZ6	433.27 ± 6.90 <sup>d</sup>	68.52 ± 2.95 <sup>e</sup>	2087.70 ± 71.82 <sup>n</sup>	148.02 ± 3.65 <sup>c</sup>	21.57 ± 0.94 <sup>o</sup>	384.99 ± 37.21 <sup>n</sup>
GZ7	355.06 ± 1.22 <sup>e</sup>	33.11 ± 0.10 <sup>hij</sup>	693.62 ± 0.73 <sup>p</sup>	163.71 ± 3.16 <sup>b</sup>	10.85 ± 0.21 <sup>q</sup>	601.90 ± 5.41 <sup>l</sup>
GZ8	424.42 ± 5.03 <sup>d</sup>	81.80 ± 0.79 <sup>d</sup>	5593.83 ± 67.71 <sup>h</sup>	38.35 ± 0.39 <sup>h</sup>	44.62 ± 0.95 <sup>j</sup>	1253.40 ± 21.03 <sup>h</sup>

Continued

GZ9	624.26 ± 3.54 <sup>b</sup>	43.97 ± 0.45 <sup>e</sup>	1461.70 ± 2.32 <sup>o</sup>	70.82 ± 0.66 <sup>f</sup>	16.63 ± 0.41 <sup>p</sup>	551.05 ± 2.05 <sup>lm</sup>
GZ10	111.68 ± 1.78 <sup>klm</sup>	87.49 ± 1.26 <sup>c</sup>	4262.07 ± 79.07 <sup>j</sup>	23.42 ± 6.02 <sup>i</sup>	48.73 ± 0.06 <sup>i</sup>	1488.94 ± 24.22 <sup>se</sup>
GZ11	223.98 ± 11.01 <sup>gh</sup>	135.42 ± 8.18 <sup>b</sup>	4693.62 ± 96.76 <sup>i</sup>	44.54 ± 1.77 <sup>e</sup>	57.55 ± 3.40 <sup>e</sup>	1042.44 ± 44.04 <sup>i</sup>

### 3.3. 研究区域土壤重金属污染的评价

#### 3.3.1. 单因子污染指数和内梅罗污染指数

从表4可以看出,本研究的6种不同重金属元素的单因子污染指数分别为0.45~20.10 (Cu)、10.85~229.44 (Zn)、0.60~305.66 (As)、41.67~988.10 (Cd)和3.17~119.89 (Pb)。在所有的采样点中,不同乡土树种根际土壤中的Zn、Cd和Pb含量均达到了重度污染等级。72.41%的采样点Cu和93.10%的采样点As存在不同程度的污染。其中,41.38%采样点的Cu和6.90%采样点的As属于轻污染,13.79%采样点的Cu和6.90%采样点的As属于中度污染,17.24%采样点的Cu和79.31%采样点的As属于重度污染。因为我国暂未制定Mn污染的相关标准,故其污染情况无法判断。因为内梅罗综合污染指数变化范围为31.96~725.56,远高于3.0,所以,所有采样点的乡土树种根际土壤重金属含量均属于重度污染等级。

**Table 4.** Single factor pollution index and Nemerow pollution index of heavy metals in rhizosphere soil of different native tree species

**表 4.** 不同乡土树种根际土壤重金属的单因子污染指数和内梅罗污染指数

样品编号	P <sub>i-Cu</sub>	P <sub>i-Zn</sub>	P <sub>i-As</sub>	P <sub>i-Cd</sub>	P <sub>i-Pb</sub>	P <sub>综</sub>
SZ1	0.45	11.20	0.60	120.38	3.17	87.26
SZ2	0.46	155.87	0.71	573.77	10.68	419.05
SZ3	0.87	158.58	3.53	802.17	92.06	586.59
SZ4	1.47	107.77	11.36	562.22	61.48	411.25
SZ5	0.81	123.34	5.97	811.12	42.68	590.19
GH1	1.52	86.26	5.65	569.31	32.19	414.39
GH2	0.92	77.03	4.48	665.33	27.28	483.06
GH3	1.26	91.59	7.59	619.21	41.46	450.88
GH4	2.85	69.82	3.83	401.92	38.59	293.45
GH5	0.82	47.31	3.91	331.52	19.42	241.25
YX1	1.33	101.48	8.09	688.09	40.23	500.82
YX2	0.54	26.82	1.90	167.05	9.87	121.67
YX3	1.13	57.27	7.36	504.92	24.67	366.83
YX4	1.42	56.68	7.44	432.98	27.24	315.06
YX5	9.42	229.44	4.91	200.14	119.89	180.77
DYNZ1	1.26	73.62	8.77	546.14	26.39	397.17
DYNZ2	1.49	26.07	1.38	140.91	10.97	102.87
DYNZ3	1.84	37.33	2.74	200.18	16.32	146.19
GZ1	0.76	30.66	2.61	202.30	11.85	147.29
GZ2	2.53	36.24	120.26	261.21	32.14	195.47

Continued

GZ3	1.71	23.17	165.67	142.33	13.65	126.98
GZ4	2.35	24.24	140.68	174.71	8.22	133.10
GZ5	1.88	14.53	123.31	110.02	6.98	94.45
GZ6	9.38	33.55	305.66	190.40	19.85	230.13
GZ7	2.18	10.85	21.66	41.67	11.11	31.96
GZ8	3.01	61.45	264.92	398.31	30.33	301.36
GZ9	1.50	14.79	101.67	92.36	13.00	78.52
GZ10	9.25	64.26	154.88	369.68	61.66	277.55
GZ11	20.10	136.34	181.44	988.10	57.12	725.56

### 3.3.2. 地累积指数

不同乡土树种根际土壤重金属元素的地累积指数计算结果见表 5。由此可知, 在本研究测定的 6 种重金属元素中, Zn、Cd 和 Pb 以极强污染为主, 但 Zn 和 Pb 均有 1 个采样点为强 - 极强污染等级, Pb 有一个采样点为强污染等级; Mn 和 Cu 以中污染和中 - 强污染为主, 但 Mn 和 Cu 存在一定数量的轻污染和强污染; As 污染等级处于轻污染和极强污染之间。

Table 5. Soil heavy metal geo-accumulation index

表 5. 土壤重金属地累积指数

样品编号	Igeo-Mn	Igeo-Cu	Igeo-Zn	Igeo-As	Igeo-Cd	Igeo-Pb
SZ1	-1.59	0.53	5.33	0.27	8.61	3.75
SZ2	-0.89	0.56	9.13	0.52	10.86	5.50
SZ3	2.06	1.48	9.15	2.83	11.34	8.61
SZ4	3.22	2.24	8.60	4.51	10.83	8.03
SZ5	1.70	1.37	8.79	3.59	11.36	7.50
GH1	3.59	2.28	8.27	3.50	10.85	7.10
GH2	1.23	1.56	8.11	3.17	11.07	6.86
GH3	2.23	2.01	8.36	3.93	10.97	7.46
GH4	2.03	2.19	7.65	3.36	10.35	6.94
GH5	1.25	1.40	7.41	2.97	10.07	6.37
YX1	3.07	2.09	8.51	4.02	11.12	7.42
YX2	0.78	0.80	6.59	1.94	9.08	5.39
YX3	1.70	1.86	7.68	3.89	10.68	6.71
YX4	2.22	2.19	7.67	3.90	10.45	6.86
YX5	3.03	2.73	9.69	3.30	9.34	8.99
DYNZ1	1.72	2.01	8.05	4.14	10.79	6.81
DYNZ2	1.15	1.26	6.23	1.89	8.84	5.13
DYNZ3	2.60	1.56	6.74	2.87	9.34	5.70



Continued

GZ1	1.23	1.28	6.78	2.39	9.36	5.65
GZ2	2.24	3.02	7.02	7.92	9.73	7.09
GZ3	2.03	2.45	6.38	8.38	8.85	5.86
GZ4	1.83	2.91	6.44	8.14	9.15	5.13
GZ5	2.48	2.59	5.71	7.95	8.48	4.89
GZ6	2.52	3.91	6.59	9.68	9.27	5.98
GZ7	0.96	1.80	4.96	5.86	7.08	5.15
GZ8	3.35	3.27	7.79	9.06	10.33	7.01
GZ9	2.59	2.27	5.73	7.68	8.23	5.79
GZ10	2.20	3.89	7.53	8.70	10.23	7.62
GZ11	2.44	5.01	8.61	8.93	11.65	7.51

注：地累积指数参照广西土壤元素背景值进行计算。

### 3.4. 不同乡土树种叶片的重金属含量

不同乡土树种叶片中的重金属含量分别为：4.67~1088.63 mg/kg (Mn)、1.73~7.37 mg/kg (Cu)、20.56~226.20 mg/kg (Zn)、0.26~60.84 mg/kg (As)、0.18~15.62 mg/kg (Cd)和 1.30~123.17 mg/kg (Pb)。其中，Mn、Zn 和 Pb 的含量较高，个别采样点 As 含量较高；从多重比较分析的结果可以看出，在同一树种的不同个体中，同一重金属元素的含量可能存在一定差异，说明同一树种的不同植株对同一重金属元素的吸收能力可能不同。具体情况见表 6 和图 1。由此可以看出，不同乡土树种叶片中的同一元素含量均存在一定差异，说明不同树种对同一重金属元素的吸收能力不同。

Table 6. Heavy metal content in leaves of different native tree species (mg/kg)

表 6. 不同乡土树种的叶片重金属含量(mg/kg)

编号	Mn	Cu	Zn	As	Cd	Pb
SZ1	15.97 ± 0.40 <sup>c</sup>	3.91 ± 0.50 <sup>a</sup>	57.11 ± 0.87 <sup>c</sup>	1.49 ± 0.06 <sup>ab</sup>	0.40 ± 0.02 <sup>c</sup>	10.38 ± 0.20 <sup>b</sup>
SZ2	19.23 ± 0.38 <sup>b</sup>	2.89 ± 0.07 <sup>b</sup>	46.39 ± 5.90 <sup>c</sup>	0.56 ± 0.07 <sup>d</sup>	0.34 ± 0.02 <sup>d</sup>	6.51 ± 0.98 <sup>c</sup>
SZ3	18.74 ± 0.37 <sup>b</sup>	3.69 ± 0.06 <sup>a</sup>	111.33 ± 9.54 <sup>a</sup>	0.81 ± 0.09 <sup>c</sup>	0.76 ± 0.02 <sup>a</sup>	12.35 ± 0.29 <sup>b</sup>
SZ4	49.14 ± 1.49 <sup>a</sup>	3.67 ± 0.23 <sup>a</sup>	81.98 ± 9.10 <sup>b</sup>	1.58 ± 0.15 <sup>a</sup>	0.44 ± 0.02 <sup>b</sup>	18.63 ± 2.13 <sup>a</sup>
SZ5	12.02 ± 0.32 <sup>d</sup>	2.63 ± 0.18 <sup>b</sup>	106.15 ± 4.33 <sup>a</sup>	1.36 ± 0.12 <sup>b</sup>	0.73 ± 0.01 <sup>a</sup>	20.31 ± 0.84 <sup>a</sup>
GH1	15.88 ± 0.28 <sup>b</sup>	3.73 ± 0.07 <sup>b</sup>	178.43 ± 3.66 <sup>b</sup>	0.76 ± 0.16 <sup>bc</sup>	5.79 ± 0.06 <sup>b</sup>	13.51 ± 1.09 <sup>ab</sup>
GH2	81.49 ± 2.92 <sup>a</sup>	4.30 ± 0.22 <sup>a</sup>	226.20 ± 11.65 <sup>a</sup>	0.93 ± 0.09 <sup>b</sup>	15.62 ± 0.63 <sup>a</sup>	16.46 ± 1.13 <sup>a</sup>
GH3	11.53 ± 0.23 <sup>cd</sup>	4.06 ± 0.05 <sup>ab</sup>	140.97 ± 6.30 <sup>c</sup>	0.58 ± 0.09 <sup>c</sup>	5.42 ± 0.05 <sup>b</sup>	9.61 ± 2.57 <sup>c</sup>
GH4	13.96 ± 0.56 <sup>bc</sup>	4.35 ± 0.27 <sup>a</sup>	120.91 ± 7.61 <sup>d</sup>	1.59 ± 0.08 <sup>a</sup>	3.35 ± 0.02 <sup>c</sup>	11.18 ± 2.21 <sup>bc</sup>
GH5	9.90 ± 0.38 <sup>d</sup>	4.05 ± 0.14 <sup>ab</sup>	103.19 ± 0.58 <sup>e</sup>	0.65 ± 0.03 <sup>c</sup>	3.82 ± 0.06 <sup>c</sup>	13.94 ± 1.89 <sup>ab</sup>
YX1	11.34 ± 0.19 <sup>c</sup>	3.65 ± 1.30 <sup>a</sup>	72.79 ± 1.16 <sup>a</sup>	0.59 ± 0.12 <sup>b</sup>	4.21 ± 0.05 <sup>a</sup>	8.93 ± 1.01 <sup>b</sup>
YX2	9.07 ± 0.38 <sup>d</sup>	3.89 ± 0.29 <sup>a</sup>	78.98 ± 9.94 <sup>a</sup>	0.60 ± 0.13 <sup>b</sup>	4.02 ± 0.09 <sup>b</sup>	13.63 ± 0.50 <sup>a</sup>
YX3	4.67 ± 0.17 <sup>e</sup>	2.31 ± 0.05 <sup>b</sup>	20.56 ± 0.62 <sup>c</sup>	0.26 ± 0.01 <sup>c</sup>	0.55 ± 0.03 <sup>d</sup>	3.10 ± 0.08 <sup>d</sup>

Continued

YX4	26.51 ± 1.03 <sup>b</sup>	2.26 ± 0.14 <sup>b</sup>	32.05 ± 3.70 <sup>b</sup>	1.96 ± 0.31 <sup>a</sup>	0.84 ± 0.06 <sup>c</sup>	4.96 ± 0.30 <sup>c</sup>
YX5	33.10 ± 0.63 <sup>a</sup>	1.73 ± 0.08 <sup>b</sup>	26.56 ± 1.23 <sup>bc</sup>	0.35 ± 0.01 <sup>bc</sup>	0.55 ± 0.00 <sup>d</sup>	4.65 ± 0.43 <sup>c</sup>
DYNZ1	13.03 ± 0.08 <sup>b</sup>	4.74 ± 0.05 <sup>a</sup>	189.05 ± 2.18 <sup>a</sup>	1.15 ± 0.45 <sup>a</sup>	3.19 ± 0.02 <sup>a</sup>	12.35 ± 0.28 <sup>a</sup>
DYNZ2	5.81 ± 0.17 <sup>c</sup>	3.95 ± 0.26 <sup>b</sup>	31.05 ± 2.40 <sup>c</sup>	0.46 ± 0.46 <sup>a</sup>	0.18 ± 0.00 <sup>c</sup>	1.30 ± 0.10 <sup>c</sup>
DYNZ3	14.49 ± 0.21 <sup>a</sup>	2.22 ± 0.11 <sup>c</sup>	169.60 ± 2.28 <sup>b</sup>	0.63 ± 0.55 <sup>a</sup>	1.36 ± 0.01 <sup>b</sup>	4.90 ± 0.50 <sup>b</sup>
GZ1	21.77 ± 0.34 <sup>h</sup>	5.45 ± 0.22 <sup>c</sup>	55.54 ± 4.58 <sup>cd</sup>	2.09 ± 0.17 <sup>k</sup>	0.39 ± 0.02 <sup>ef</sup>	13.62 ± 0.69 <sup>f</sup>
GZ2	1088.63 ± 17.66 <sup>a</sup>	3.77 ± 0.13 <sup>f</sup>	38.70 ± 1.33 <sup>ef</sup>	17.54 ± 0.29 <sup>f</sup>	0.31 ± 0.01 <sup>f</sup>	28.44 ± 0.23 <sup>e</sup>
GZ3	85.43 ± 0.99 <sup>f</sup>	7.37 ± 0.33 <sup>a</sup>	108.41 ± 1.85 <sup>a</sup>	60.84 ± 1.85 <sup>a</sup>	1.09 ± 0.02 <sup>c</sup>	93.80 ± 1.17 <sup>b</sup>
GZ4	237.51 ± 4.25 <sup>cd</sup>	4.24 ± 0.11 <sup>e</sup>	64.88 ± 4.12 <sup>bc</sup>	11.05 ± 0.14 <sup>h</sup>	1.08 ± 0.05 <sup>c</sup>	9.90 ± 0.09 <sup>fg</sup>
GZ5	176.98 ± 4.84 <sup>e</sup>	4.81 ± 0.08 <sup>d</sup>	49.78 ± 1.44 <sup>de</sup>	14.33 ± 0.11 <sup>g</sup>	0.87 ± 0.04 <sup>d</sup>	12.15 ± 0.35 <sup>fg</sup>
GZ6	245.27 ± 5.22 <sup>c</sup>	4.57 ± 0.22 <sup>de</sup>	106.90 ± 10.19 <sup>a</sup>	25.49 ± 0.48 <sup>d</sup>	2.14 ± 0.07 <sup>a</sup>	13.59 ± 0.47 <sup>f</sup>
GZ7	224.77 ± 1.47 <sup>d</sup>	4.86 ± 0.12 <sup>d</sup>	32.47 ± 0.60 <sup>f</sup>	21.73 ± 0.57 <sup>e</sup>	0.32 ± 0.01 <sup>f</sup>	42.29 ± 0.32 <sup>d</sup>
GZ8	37.21 ± 0.33 <sup>g</sup>	3.61 ± 0.17 <sup>f</sup>	75.95 ± 0.30 <sup>b</sup>	29.57 ± 0.39 <sup>c</sup>	0.45 ± 0.02 <sup>e</sup>	55.88 ± 1.96 <sup>c</sup>
GZ9	517.91 ± 3.93 <sup>b</sup>	6.62 ± 0.28 <sup>b</sup>	98.56 ± 6.16 <sup>a</sup>	50.62 ± 0.59 <sup>b</sup>	1.01 ± 0.02 <sup>c</sup>	123.17 ± 1.48 <sup>a</sup>
GZ10	44.81 ± 0.40 <sup>g</sup>	5.64 ± 0.27 <sup>c</sup>	44.18 ± 3.47 <sup>e</sup>	5.41 ± 2.36 <sup>j</sup>	0.82 ± 0.01 <sup>d</sup>	6.86 ± 0.24 <sup>g</sup>
GZ11	49.33 ± 2.45 <sup>g</sup>	4.82 ± 0.16 <sup>d</sup>	63.10 ± 14.46 <sup>c</sup>	8.32 ± 0.63 <sup>i</sup>	1.41 ± 0.15 <sup>b</sup>	15.52 ± 12.57 <sup>f</sup>

注：在同一列数据中，差异性分析是对同一树种不同个体的比较，不同小写字母表示差异显著(p < 0.05)。

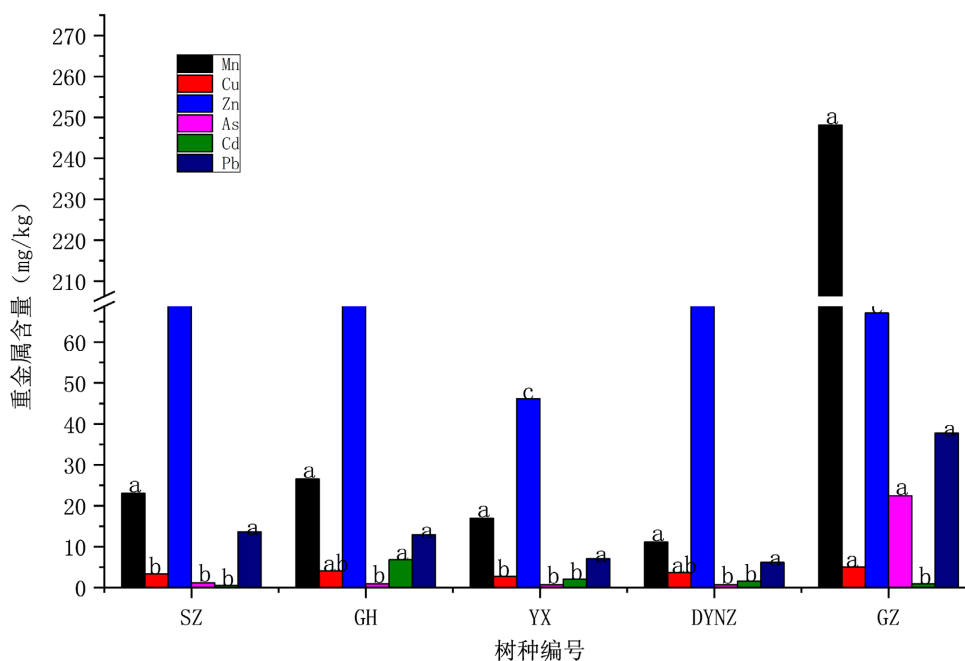


Figure 1. Comparison of average values of heavy metal elements in leaves of different native tree species

图 1. 不同乡土树种叶片的重金属元素含量平均值比较

### 3.5. 不同乡土树种叶片的重金属富集系数

除了树种编号为 GZ2 之外，本研究的 5 种乡土树种叶片的重金属富集系数均小于 0.50，分别为：

0.0051~0.8924 (Mn)、0.0048~0.0870 (Cu)、0.0005~0.0267 (Zn)、0.0009~0.0830 (As)、0.0020~0.0802 (Cd)、0.0003~0.0790 (Pb)。从平均值来看,酸枣对 Mn 的富集系数最大,其次为 Cu,分别为 0.0752、0.0500,同时,酸枣也是这 5 种乡土树种中对 Cu 富集系数最大的树种;桂花是这 5 种乡土树种中对 Cd 富集系数最大的树种,其富集系数为 0.0415,但桂花对 Zn、As 和 Pb 的富集系数都较小;阴香和大叶女贞除对 Cu 的富集系数较大外,对其他重金属元素的富集系数都较小,对 Pb 的富集系数最小;拐枣是这 5 种乡土树种中对 Mn 和 Pb 富集系数最大的树种,其富集系数分别为 0.2200 和 0.0225。具体情况见表 7。

**Table 7.** Enrichment coefficients of heavy metals in leaves of different native tree species

**表 7.** 不同乡土树种叶片对重金属的富集系数

树种编号	Mn	Cu	Zn	As	Cd	Pb
SZ1	0.1863	0.0870	0.0204	0.0830	0.0109	0.0273
SZ2	0.1377	0.0629	0.0012	0.0260	0.0020	0.0051
SZ3	0.0174	0.0424	0.0028	0.0077	0.0032	0.0011
SZ4	0.0204	0.0249	0.0030	0.0047	0.0026	0.0025
SZ5	0.0143	0.0327	0.0034	0.0076	0.0030	0.0040
平均值	0.0752	0.0500	0.0062	0.0258	0.0043	0.0080
GH1	0.0051	0.0246	0.0083	0.0045	0.0339	0.0035
GH2	0.1343	0.0467	0.0117	0.0070	0.0783	0.0050
GH3	0.0095	0.0322	0.0062	0.0026	0.0292	0.0019
GH4	0.0132	0.0306	0.0087	0.0103	0.0278	0.0032
GH5	0.0161	0.0494	0.0087	0.0055	0.0384	0.0060
平均值	0.0356	0.0367	0.0087	0.0060	0.0415	0.0039
YX1	0.0052	0.0275	0.0029	0.0024	0.0204	0.0018
YX2	0.0203	0.0718	0.0118	0.0105	0.0802	0.0115
YX3	0.0056	0.0204	0.0014	0.0012	0.0036	0.0010
YX4	0.0220	0.0159	0.0023	0.0088	0.0064	0.0015
YX5	0.0157	0.0083	0.0005	0.0024	0.0091	0.0003
平均值	0.0138	0.0288	0.0038	0.0051	0.0240	0.0032
DYNZ1	0.0153	0.0378	0.0103	0.0044	0.0195	0.0039
DYNZ2	0.0101	0.0530	0.0060	0.0084	0.0043	0.0013
DYNZ3	0.0093	0.0242	0.0227	0.0058	0.0227	0.0033
平均值	0.0116	0.0383	0.0130	0.0062	0.0155	0.0029
GZ1	0.0359	0.0718	0.0072	0.0267	0.0064	0.0096
GZ2	0.8924	0.0149	0.0043	0.0049	0.0040	0.0074
GZ3	0.0806	0.0431	0.0187	0.0122	0.0254	0.0573
GZ4	0.2580	0.0180	0.0107	0.0026	0.0206	0.0100
GZ5	0.1226	0.0256	0.0137	0.0039	0.0263	0.0145
GZ6	0.1647	0.0097	0.0159	0.0021	0.0374	0.0076

## Continued

GZ7	0.4463	0.0446	0.0150	0.0251	0.0253	0.0423
GZ8	0.0141	0.0120	0.0049	0.0037	0.0038	0.0154
GZ9	0.3327	0.0441	0.0267	0.0166	0.0363	0.0790
GZ10	0.0376	0.0122	0.0034	0.0009	0.0074	0.0012
GZ11	0.0351	0.0048	0.0023	0.0011	0.0048	0.0030
平均值	0.2200	0.0274	0.0112	0.0091	0.0180	0.0225

## 3.6. 相关性分析

乡土树种叶片重金属含量与根际土壤重金属含量的相关性分析结果见表 8 和表 9。由表 8 可知, 植物叶片的铜含量与其根际土壤的锌全量呈极显著负相关, 与其根际土壤砷的全量有显著正相关; 植物叶片的砷含量与其根际土壤的锌和镉全量有显著负相关, 与其根际土壤的砷全量有极显著正相关。由表 9 可知, 植物叶片的锰含量与其根际土壤中砷的有效态含量有极显著正相关; 植物叶片的铜含量与其根际土壤中铜和砷的有效态含量有显著正相关; 植物叶片的砷含量与其根际土壤中砷和锰的有效态含量有极显著或显著正相关。从相关性分析的结果可知, 在本研究采集的 5 种乡土树种叶片样品中, 检测的 6 种重金属元素 Mn、Cu、Zn、As、Cd、Pb 的含量, 除 Cd 之外, 其余各种重金属元素之间, 大都有显著或极显著正相关, 说明这些重金属元素大部分具有相同的来源, 究其原因, 可能与当地的矿物开采或矿冶生产有关, 主要是由于人为活动造成的土壤重金属污染所致。

**Table 8.** Correlation between the content of heavy metals in plant leaves and the total amount of heavy metals in soil  
**表 8.** 植物叶片重金属含量与土壤重金属全量的相关性

	Mn <sub>叶</sub>	Cu <sub>叶</sub>	Zn <sub>叶</sub>	As <sub>叶</sub>	Cd <sub>叶</sub>	Pb <sub>叶</sub>	Mn <sub>土全量</sub>	Cu <sub>土全量</sub>	Zn <sub>土全量</sub>	As <sub>土全量</sub>	Cd <sub>土全量</sub>	Pb <sub>土全量</sub>
Mn <sub>叶</sub>	1											
Cu <sub>叶</sub>	0.218	1										
Zn <sub>叶</sub>	-0.177	0.129	1									
As <sub>叶</sub>	0.432*	0.674**	-0.047	1								
Cd <sub>叶</sub>	-0.144	0.048	0.719**	-0.208	1							
Pb <sub>叶</sub>	0.383*	0.636**	0.068	0.905**	-0.109	1						
Mn <sub>土全量</sub>	0.031	-0.121	0.157	0.137	0.002	0.141	1					
Cu <sub>土全量</sub>	0.128	0.225	-0.147	0.185	-0.117	0.017	0.265	1				
Zn <sub>土全量</sub>	-0.286	-0.504**	0.032	-0.392*	0.052	-0.29	0.276	0.07	1			
As <sub>土全量</sub>	0.298	0.399*	-0.122	0.570**	-0.185	0.29	0.255	0.732**	-0.244	1		
Cd <sub>土全量</sub>	-0.305	-0.273	0.312	-0.414*	0.309	-0.29	0.185	0.287	0.626**	-0.12	1	
Pb <sub>土全量</sub>	-0.119	-0.358	-0.025	-0.260	-0.025	-0.185	0.430*	0.157	0.838**	-0.113	0.446*	1

**Table 9.** Correlation between the content of heavy metals in plant leaves and the available content of heavy metals in soil  
**表 9.** 植物叶片重金属含量与土壤重金属有效态含量的相关性

	Mn <sub>叶</sub>	Cu <sub>叶</sub>	Zn <sub>叶</sub>	As <sub>叶</sub>	Cd <sub>叶</sub>	Pb <sub>叶</sub>	Mn <sub>有效态</sub>	Cu <sub>有效态</sub>	Zn <sub>有效态</sub>	As <sub>有效态</sub>	Cd <sub>有效态</sub>	Pb <sub>有效态</sub>
Mn <sub>叶</sub>	1											
Cu <sub>叶</sub>	0.218	1										

Continued

Zn <sub>叶</sub>	-0.177	0.129	1									
As <sub>叶</sub>	0.432*	0.674**	-0.047	1								
Cd <sub>叶</sub>	-0.144	0.048	0.719**	-0.208	1							
Pb <sub>叶</sub>	0.383*	0.636**	0.068	0.905**	-0.109	1						
Mn <sub>有效态</sub>	0.236	0.269	0.033	0.402*	-0.049	0.413*	1					
Cu <sub>有效态</sub>	0.035	0.376*	0.153	0.319	0.116	0.209	0.316	1				
Zn <sub>有效态</sub>	-0.270	-0.329	0.276	-0.317	0.197	-0.173	0.003	0.107	1			
As <sub>有效态</sub>	0.707**	0.397*	-0.248	0.598**	-0.223	0.356	0.356	0.226	-0.386*	1		
Cd <sub>有效态</sub>	-0.339	-0.216	0.339	-0.336	0.317	-0.187	0.088	0.374*	0.798**	-0.433*	1	
Pb <sub>有效态</sub>	-0.206	-0.253	0.126	-0.221	0.066	-0.121	0.101	-0.006	0.785**	-0.295	0.425*	1

注：皮尔逊(Pearson)相关性：\*相关性在 0.05 层上显著(双尾)，\*\*相关性在 0.01 层上显著(双尾)。

## 4. 讨论

### 4.1. 研究区域土壤重金属污染的状况

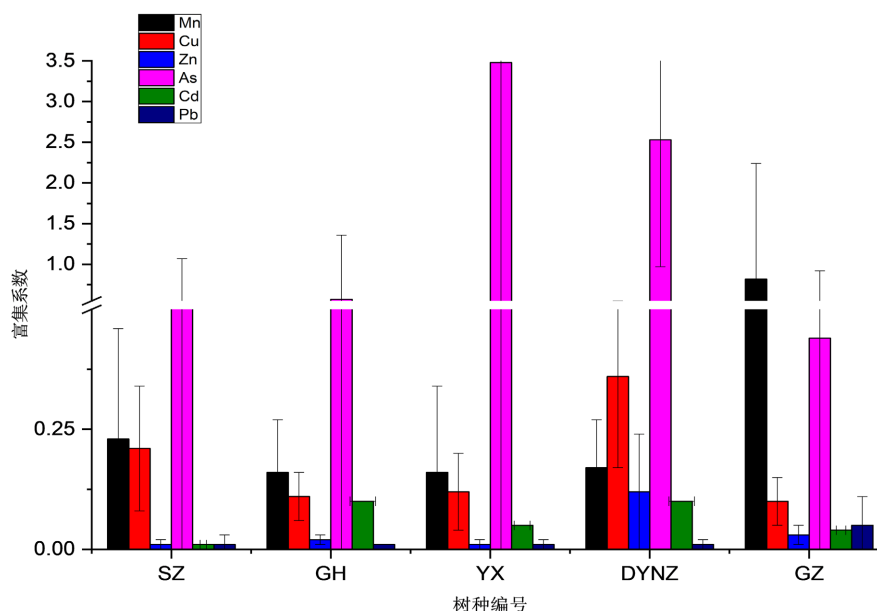
单因子污染指数法可以反映某一重金属因子的污染程度，内梅罗综合污染指数法则可以反映几种重金属因子的综合污染程度[39]。地累积指数法是一种被广泛用于评价土壤中重金属累积程度的方法。该方法充分考虑了自然地质活动和人为活动对重金属污染的影响，因此该方法不仅可以反映重金属分布的自然变化特征，而且可以反映人为活动对环境的影响，是区分土壤中重金属异常累积行为的重要参数[40]。通过对土壤重金属含量的测定和数据分析，结果表明，本研究区域土壤重金属污染严重，Mn、Cu、Zn、As、Cd 及 Pb 元素的含量远高于广西土壤和全国土壤背景值，其中，Zn、Cd 和 Pb 是主要的污染因子，该结果与崔晓艳等人的相关研究结果相似[41] [42]。相关的研究发现，Zn、Cd 和 Pb 在土壤中的异常累积与人为活动有很大关系，尤其是与矿物开采和矿区的生产活动有关。

### 4.2. 不同乡土树种对重金属的富集能力

生物富集系数(Biological Concentration Factor, BCF)可以在一定程度上反映植物对土壤中重金属吸收能力的强弱[30]，富集系数越高，表明植物吸收重金属的能力越强。一些研究者认为，木本植物的富集系数大于 0.4 则修复能力强，在 0.1~0.4 之间则有一定的修复能力，小于 0.1 则修复能力较差[43]。从 5 种乡土树种叶片的重金属富集系数来看，其数值大多小于 0.1，说明其叶片对重金属的富集能力较弱。需要指出的是，文中 BCF 计算所采用的数据为土壤重金属的全量，在土壤重金属含量偏高的情况下，计算所得的结果必然偏小，而植物根部能够从土壤溶液中吸收和转运的重金属元素为其有效态，如果用土壤重金属元素的有效态含量来计算 BCF，所得数值肯定比原先的大(具体情况见图 2)。由于没有采集相应树种根部和树干部分的样品，无法计算其根部及枝干的重金属转运系数，故无法判断所研究的树种是富集型、根部囤积型或规避型植物中的何种类型[32]。在重金属重度污染区域生长良好的树种，其对重金属胁迫均具有较强的耐受性，但不同树种对重金属的富集和转移能力存在一定差异[44]，本研究所得结果与之相似。在本研究的 5 种不同乡土树种中，酸枣对 Cu 的富集能力最强，桂花对 Cd 的富集能力最强，拐枣对 Mn 和 Pb 的富集能力最强，该结果与邱媛相关研究所得的结果相似[21]，但与部分学者的研究结果不一致，可能与研究区域土壤重金属含量过高有关，具体原因有待进一步分析。相同树种的不同个体(植株)对重金属的吸收能力也存在一定的差异，可能与不同个体的具体生境、生长状态及树龄有关，具体原因有待进一步研究。

### 4.3. 利用乡土树种进行土壤重金属污染治理的可行性

在本研究的 5 种乡土树种中, 拐枣叶片的 Mn 含量高达 1088.63 mg/kg, Pb 含量高达 123.17 mg/kg, 桂花叶片的 Zn 含量高达 226.20 mg/kg。虽然乡土树种叶片对重金属的富集系数较小, 但其叶片中重金属的含量不算低, 且木本植物的生物量都比较大, 株高最小可达 2~3 m 以上, 因此其吸收的重金属总量并不少[45]。酸枣、桂花、阴香、大叶女贞和拐枣均具有良好的重金属耐受机制, 且对重金属具有一定的吸收能力, 由于不同乡土树种对重金属的富集能力不同, 如能综合利用不同树种在土壤重金属污染治理和植物修复方面的优势, 可为重金属污染地区土壤环境修复提供更多的选择[46], 既解决污染问题, 又美化环境。从土壤理化分析的结果来看, 本研究的乡土树种对生境的要求不高, 均能在营养极度缺乏环境中正常生长, 因此, 其在土壤重金属污染治理中的应用前景广阔。



**Figure 2.** Comparison of enrichment coefficients of soil heavy metal available states in leaves of different native tree species  
**图 2.** 不同乡土树种叶片对土壤重金属有效态的富集系数比较

## 5. 结论

通过对实验结果的分析讨论, 得到如下结论:

- 1) 研究区域土壤中的 Mn、Cu、Zn、As、Cd 及 Pb 等重金属含量远高于广西土壤和全国土壤背景, 属于重度污染, 污染原因与矿物开采和人为活动有关。
- 2) 乡土树种酸枣、桂花、阴香、大叶女贞和拐枣对重金属具有较强的耐性, 可在重金属复合污染环境正常生长, 且对重金属具有一定的吸收能力, 虽然叶片的重金属富集系数较小, 但重金属的累积量较大, 作为土壤重金属污染植物修复的优良树种, 其应用前景广阔。
- 3) 乡土树种生物量大, 适应性强, 对生境要求不高, 如能对其进行合理配置, 并借助其他有效方法和技术措施, 对土壤重金属污染进行治理是可行的。

## 基金项目

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), 广西大学生创新创业计划训练项目(S202210605061)。

## 参考文献

- [1] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 环境教育, 2014(6): 8-10.
- [2] 张富贵, 彭敏, 王惠艳, 等. 基于乡镇尺度的西南重金属高背景区土壤重金属生态风险评价[J]. 环境科学, 2020, 41(9): 4197-4209.
- [3] 王泓博, 苟文贤, 吴玉清, 等. 重金属污染土壤修复研究进展: 原理与技术[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2277-2288.
- [4] 史广宇, 余志强, 施维林. 植物修复土壤重金属污染中外源物质的影响机制和应用研究进展[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 655-666.
- [5] 吴仁杰, 陈银萍, 曹雯婕, 等. 营养元素与螯合剂强化植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2021(5): 328-337.
- [6] 李吉锋. 超累积植物修复矿区土壤重金属污染研究进展[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(5): 138-143.
- [7] 何玉君, 孙梦荷, 沈亚婷, 等. 超富集植物与重金属相互作用机制及应用研究进展[J]. 岩矿测试, 2020, 39(5): 639-657.
- [8] 聂亚平, 王晓维, 万进荣, 等. 几种重金属(Pb、Zn、Cd、Cu)的超富集植物种类及增强植物修复措施研究进展[J]. 生态科学, 2016, 35(2): 174-182.
- [9] 赵磊, 罗于洋. 我国草本植物中重金属富集、超富集植物筛选研究进展[J]. 内蒙古草业, 2009, 21(1): 43-47.
- [10] 韦朝阳, 陈同斌. 重金属超富集植物及植物修复技术研究进展[J]. 生态学报, 2001, 21(7): 1196-1203.
- [11] 石杨, 李家豪, 于月, 等. 重金属污染土壤的植物修复技术与其他技术联用的进展与前景[J]. 环境污染与防治, 2022, 44(2): 244-250.
- [12] 武强, 孙录科. 矿区土壤重金属污染的植物修复研究进展[J]. 有色金属, 2008, 60(1): 125-129.
- [13] 洗丽铨, 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.
- [14] 贾伟涛, 吕素莲, 林康祺, 等. 高生物量经济植物修复重金属污染土壤研究进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3): 416-425.
- [15] 曾鹏, 郭朝晖, 韩自玉, 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.
- [16] 赵云峰, 张涛, 田志君, 等. 矿区周边重金属污染土壤植物修复技术研究进展[J]. 城市地质, 2020, 15(1): 22-33.
- [17] 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.
- [18] 黄春霞, 黄立幸. 广西锰矿区重金属污染现状及治理对策研究综述[J]. 能源环境保护, 2021, 35(1): 1-5.
- [19] 魏帅, Wolde Tefera Beri, 王润泽, 等. 镉铜复合污染土壤中南方红豆杉的重金属提取效果及根际细菌群落特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1919-1928.
- [20] 何蔚, 陈永华, 梁希, 等. 改良锰矿渣中木本植物筛选及锰的亚细胞分布和化学形态[J]. 环境工程, 2018, 36(9): 154-160.
- [21] 邱媛, 何际泽, 杨汉彬, 等. 矿区常见乔木叶片重金属特征及其修复应用[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 151-156.
- [22] 覃勇荣, 汤丰瑜, 严海杰, 等. 重金属胁迫对任豆种子萌发及幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 种子, 2017, 36(10): 31-36.
- [23] 邓冬梅, 覃勇荣, 李卉, 等. 南丹长坡尾矿坝五种植物富集重金属的生态调查[J]. 河池学院学报, 2008, 28(5): 87-91.
- [24] 刘旭辉, 许元红, 王仁富, 等. 丛毛羊胡子草修复尾矿坝铅镉污染的初步研究[J]. 河南农业科学, 2010(5): 58-62.
- [25] 刘旭辉, 曾艳兰, 覃勇荣, 等. 长坡尾矿坝植物修复过程中土壤脲酶活性变化[J]. 河南农业科学, 2009(5): 65-69.
- [26] 曹晶潇, 陆素芬, 陆泽生, 等. 桂西北矿区3种草本植物对铅镉胁迫的生理响应和综合评价[J]. 热带亚热带植物学报, 2021, 29(3): 251-258.
- [27] 覃勇荣, 韦若阳, 陆素芬, 等. 利用破坏草修复矿业废弃地砷污染土壤的研究[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(6): 1207-1223.
- [28] 解文惠, 刘旭辉, 陈霖虹, 等. 不同重金属胁迫对乡土树种根际土壤微生物多样性的影响[J]. 农业科学, 2021, 11(4): 400-411.

- [29] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 23-24, 76-79, 81-83.
- [30] 中华人民共和国环境保护部. 土壤有机碳的测定, 重铬酸钾氧化-分光光度法: HJ 615-2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [31] 刘燕. 《土壤质量 全氮的测定 凯氏法》的方法改进[J]. 化工管理, 2020(14): 45-46.
- [32] 孟茹, 杜金花, 刘云华, 等. ICP-MS 测定土壤重金属元素消解方式的探索[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(7): 2122-2128.
- [33] 陈蓉, 李阳, 白静, 等. 湿法消解电感耦合等离子体质谱法测定冬虫夏草产区土壤铅、砷、铬、镉、铜含量[J]. 成都中医药大学学报, 2018, 41(4): 3-5+11.
- [34] 徐伊莎, 夏新, 李欣, 等. 消解体系对土壤重金属测定的影响[J]. 环境工程, 2019, 37(5): 66-69+154.
- [35] 易磊, 张增强, 沈锋, 等. 浸提条件和浸提剂类型对土壤重金属浸提效率的影响[J]. 西北农业学报, 2012, 21(1): 156-160.
- [36] 季海冰, 潘荷芳, 李震宇, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定土壤中重金属有效态浓度[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(12): 60-62+66.
- [37] 李晶, 杨超元, 殷守强, 等. 草原型露天煤矿区土壤重金属污染评价及空间分布特征[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3676-3684.
- [38] 张建兵, 蔡芸霜, 冯春梅, 等. 广西滨海农田土壤养分特征及其与我国主要沿海区域土壤养分的比较[J]. 安徽农业科学, 2019, 47(9): 55-59.
- [39] 滑小赞, 程滨, 赵瑞芬, 等. 太原市农田土壤重金属污染评价与空间分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 101-109.
- [40] 于飒, 王伟, 于扬, 等. 川西九龙地区锂铍矿区土壤重金属分布特征及生态风险评价[J]. 岩矿测试, 2021, 40(3): 408-424.
- [41] 崔晓艳, 郭维君, 陈学军. 泗顶铅锌矿废弃地优势植物的重金属富集特征[J]. 金属矿山, 2010(4): 180-182.
- [42] 尹仁湛, 罗亚平, 李金城, 等. 泗顶铅锌矿周边土壤重金属污染潜在生态风险评价及优势植物对重金属累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2158-2165.
- [43] 陆金, 赵兴青, 黄健, 等. 铜陵狮子山矿区尾矿库及周边 17 种乡土植物重金属含量及富集特征[J]. 环境化学, 2019, 38(1): 78-86.
- [44] 王广林, 张金池, 庄家尧, 等. 31 种园林植物对重金属的富集研究[J]. 皖西学院学报, 2011, 27(5): 83-87.
- [45] 雷梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报, 2005(5): 1146-1151.
- [46] 李俊凯, 张丹, 周培, 等. 南京市铅锌矿采矿场土壤重金属污染评价及优势植物重金属富集特征[J]. 环境科学, 2018, 39(8): 3845-3853.