

# 丛毛羊胡子草对砷等5种重金属的耐性及开发利用探讨

覃勇荣, 林晓倩, 刘旭辉, 陆素芬, 邓慧莲, 解文惠

(河池学院 化学与生物工程学院, 广西 宜州 546300)

**摘要:**为了探讨丛毛羊胡子草对重金属的耐性,采集广西南丹有色金属矿区自然分布的丛毛羊胡子草及其根部土壤样品,用ICP-MS测定样品中的Cu、Zn、As、Cd、Pb含量,并对丛毛羊胡子草地上和地下部分的重金属富集系数及地上部分的重金属转运系数进行比较分析,对丛毛羊胡子草根部土壤的污染情况进行评价。结果表明,丛毛羊胡子草根土壤5种被测的重金属元素含量较高,其平均含量分别为:Cu 333.18 mg/kg、Zn 17 139.20 mg/kg、As 10 338.37 mg/kg、Cd 115.97 mg/kg、Pb 3 497.25 mg/kg,单因子污染指数和内梅罗综合污染指数均已达到重度以上污染等级,其中As、Cd、Zn的污染尤为严重,Pb和Cu的污染程度相对较轻,不同重金属元素污染程度高低排序为As>Cd>Zn>Pb>Cu;丛毛羊胡子草地上部分和地下部分5种被测重金属元素的平均含量分别为:Cu 16.69 mg/kg、Zn 465.45 mg/kg、As 98.92 mg/kg、Cd 5.03 mg/kg、Pb 129.49 mg/kg和Cu 38.05 mg/kg、Zn 894.23 mg/kg、As 461.72 mg/kg、Cd 8.27 mg/kg、Pb 221.72 mg/kg,其地上部分的重金属富集系数和转运系数较小,地下部分的重金属富集系数相对较大,吸收的重金属元素主要集中在根部,对被测重金属元素的耐受性可能属于根部囤积型和防御型;虽然丛毛羊胡子草不是超累积植物,但其对被测重金属元素具有一定的吸收和转运能力,能够耐受高浓度的砷、镉等重金属复合胁迫,生命力强,生物量大,对生境要求不高,因此,可以作为重金属重度污染土壤修复的优势植物栽植。

**关键词:**丛毛羊胡子草;土壤重金属污染;重金属复合胁迫;ICP-MS;重金属耐性

**中图分类号:**X173;X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-2481(2024)03-0068-10

## Study on Tolerance to Arsenic and Other Five Heavy Metals and Exploitation and Utilization of *Eriophorum comosum* Nees

QIN Yongrong, LIN Xiaolian, LIU Xuhui, LU Sufen, DENG Huilian, XIE Wenhui

(School of Chemistry and Bio-engineering, Hechi University, Yizhou 546300, China)

**Abstract:** In order to demonstrate the tolerance of *Eriophorum comosum* to heavy metals, the samples of *E. comosum* naturally distributed in the Nandan nonferrous metal mining area in Guangxi and its root soil were collected, and the contents of Cu, Zn, As, Cd, and Pb in the samples were measured by inductively coupled plasma mass spectrometry(ICP-MS). The heavy metal enrichment coefficient of the aboveground and underground parts of *E. comosum*, and the heavy metal transport coefficient of the aboveground parts of *E. comosum* were compared and analyzed. The pollution of *E. comosum* root soil was evaluated. The results showed that the content of five heavy metal elements measured in the root soil of *E. comosum* was relatively high, with an average content of Cu 333.18 mg/kg, Zn 17 139.20 mg/kg, As 10 338.37 mg/kg, Cd 115.97 mg/kg, and Pb 3 497.25 mg/kg, respectively. The single factor pollution index and Nemerow comprehensive pollution index had reached a level of severe pollution or above, with As, Cd, Zn being particularly severe, and Pb and Cu being relatively mild, the order of pollution levels of different heavy metal elements was As>Cd>Zn>Pb>Cu. The average contents of five heavy metal elements measured in the aboveground and underground parts of *E. comosum* were Cu 16.69 mg/kg, Zn 465.45 mg/kg, As 98.92 mg/kg, Cd 5.03 mg/kg, and Pb 129.49 mg/kg and Cu 38.05 mg/kg, Zn 894.23 mg/kg, As 461.72 mg/kg, Cd 8.27 mg/kg, and Pb 221.72 mg/kg, respectively. The heavy metal enrichment and transport coefficients in the aboveground parts were relatively small, while the heavy metal enrichment coefficients in the underground parts were relatively large. The absorbed heavy metal elements were mainly concentrated in the roots, and the tolerance to the measured heavy metal elements probably belonged to the root accumulation and defense types. Although it was not a hyperaccumulative plant, it had a certain ability to absorb and transport heavy metal elements, and could withstand high concentrations of arsenic, cadmium and other heavy metal complex stress. It had

收稿日期:2023-04-24

基金项目:广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室项目(桂科基字[2022]60号);桂西北地方资源保护与利用工程中心项目(桂教科研2012[9]号);河池学院高层次人才科研启动费项目(XJ2018GKQ015, XJ2018GKQ016)

作者简介:覃勇荣(1963-),男,广西平南人,教授,硕士,主要从事岩溶地区生物资源开发利用及生态环境保护研究工作。

通信作者:刘旭辉(1962-),女,四川广安人,教授,硕士,主要从事环境化学分析及重金属污染生态修复研究工作。

strong vitality, high biomass, and low habitat requirements. Therefore, it could be used as an excellent plant for the remediation of soil severely polluted by heavy metals.

**Key words:** *Eriophorum comosum* Nees; heavy metal pollution of soil; heavy metal complex stress; ICP-MS; heavy metal tolerance

随着我国工农业的快速发展,土壤污染造成的危害进一步加剧<sup>[1]</sup>。广西矿产资源丰富,但在矿物开采及冶炼加工的过程中,由于人们环保意识的薄弱以及急于求成,因而对环境造成了比较严重的破坏,土壤重金属污染就是其中的突出问题。土壤重金属污染因其具有长期性、累积性、隐蔽性以及危害性大、难治理等特点而引起人们的高度关注<sup>[2]</sup>,与其他类型的环境污染相比,其危害性更大,因此急需治理。在众多环境污染治理方法中,植物修复是目前修复土壤重金属污染的重要方法之一,因其对环境友好,能够在一定程度上改良土质,恢复土壤的健康状况,且不会造成二次污染,因此,这种修复方式更加环保,公众接受度比较高<sup>[3-4]</sup>。

丛毛羊胡子草(*Eriophorum comosum* Nees)为莎草科羊胡子属多年生草本植物,其根系着生于阳坡岩石缝隙中,生物量大,耐寒、耐旱能力较强<sup>[5-7]</sup>。笔者野外调查发现,丛毛羊胡子草可以自然生长于有色金属矿区及周边重金属污染的岩石峭壁、采矿渣石堆场等严酷环境中,是广西南丹长坡尾矿坝周边自然分布的优势物种<sup>[8]</sup>。目前,国内关于丛毛羊胡子草的相关研究,主要集中在丛毛羊胡子草的抗寒抗旱特性及其生理响应机制、道路边坡护坡植被重建、岩生植物土壤微生物生态分布、土壤重金属污染植物修复等方面。何云等<sup>[9]</sup>研究了低温胁迫下丛毛羊胡子草叶片质膜透性和可溶性糖含量的变化情况,结果表明,与金发草和狗牙根相比,丛毛羊胡子草的抗寒性最强,且自然温度缓慢降低有利于其抗寒能力的诱导和提高。陈栋霖<sup>[10]</sup>通过野外调查和室内盆栽试验的方法,在人为控水模拟干旱胁迫的条件下,探讨了丛毛羊胡子草的抗旱生理机制及复水后的修复能力和机制,测定了丛毛羊胡子草的一系列抗旱生理指标和形态指标,结果发现,丛毛羊胡子草具有较强的抗旱能力,但不同地域采集的丛毛羊胡子草其抗旱能力具有明显差异。李西等<sup>[11]</sup>对丛毛羊胡子草的种子进行了鉴定并对其播种量进行研究,分析其种子产业化的价值。刘旭辉等<sup>[8]</sup>研究了丛毛羊胡子草对Pb、Cd的吸收特性,探讨利用丛毛羊胡子草修复土壤铅镉污染的可能性,结果表明,丛毛羊胡子草具有较强的铅镉耐性,对铅和

镉的吸收量较大,具有进一步开发利用的潜力。虽然丛毛羊胡子草是桂西北有色金属矿区、尾矿坝及矿业废弃地的常见植物或优势种,但关于该物种在重金属污染土壤修复中的应用研究报道甚少。

本试验以广西南丹丛毛羊胡子草作为研究对象,深入分析其对不同重金属的耐性及富集能力,旨在为土壤重金属污染的生态修复提供一定的技术支持和理论参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 调查区域概况

南丹县位于广西壮族自治区河池市,地理坐标为24°42'~25°37' N、107°01'~107°55' E,属于云贵高原东南边缘、凤凰山脉的余脉,是中低山向广西丘陵过渡地带,地势自西北向东南倾斜,海拔高度多数在500~1 000 m,属于中亚热带气候区,年均气温约为17.4℃,年均降雨量为1 472.7 mm。境内大多为半石山区,土壤类型主要有赤红壤、红壤、紫色土、石灰土等,铜、锌、砷、镉、铅的背景值分别为9.97、62.08、11.37、0.1672、17.52 mg/kg。南丹是世界罕见的富集矿区,重要矿产资源有铅、锌、铜、镉、锡、锑、钨、钼、锆、银、砷、汞等20多种,主要分布在大厂、车河和芒场镇一带。其中,锡矿和锌矿保有储量最大,分别超过40万t和30万t。丛毛羊胡子草主要分布在山坡中下部的石壁、采矿废石堆、护坡墙、尾矿坝、选矿厂及矿业废弃地周围,通常是丛状和成群分布,平均株高达75.3 cm,平均干质量达230 g/丛。

### 1.2 样品采集及处理

2020年8月14—16日,前往南丹有色金属矿区进行调研和采样,每个采样点均随机采集3丛长势良好的丛毛羊胡子草完整植株作为一个混合样品,同时使用GPS进行定位,记录每个采样点的地理坐标以及海拔高度等相关信息。根据丛毛羊胡子草在矿区不同地段的分布情况,一共采集了9个植物混合样品,每个采样点之间的距离均相隔10 m以上,采样点的分布如图1所示。其中,在长坡选矿厂尾矿坝周围采集了7个混合样品(编号1~7),在五一矿派出所警务室旁边的废弃坑道口采集了1个混合样品(编号8),在莫家坪鱼泉洞采集了1个

混合样品(编号9)。在采集植物样品的同时,用梅花形采样法,采集丛毛羊胡子草根周围0~20 cm深度的土壤样品,过2 mm土筛,用四分法取适量装入塑料自封袋中,做好相应的标记和记录,并尽快带回实验室。

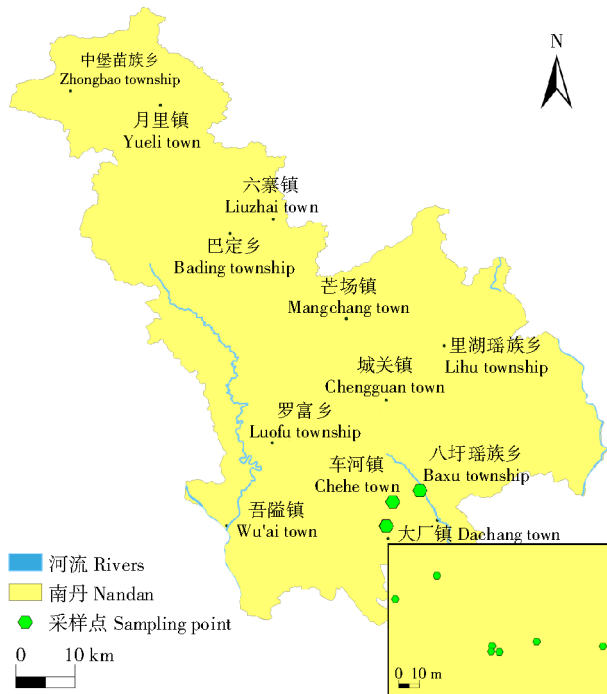


图1 丛毛羊胡子草采样点的分布  
Fig.1 Distribution of sampling points of *Eleusine indica*

将采集回来的丛毛羊胡子草根土壤样品置于室外,让其在通风、阴凉处自然风干,然后将其研磨过筛,装入塑料自封袋中,做好相关编号和标记,以备后续试验使用。

采集回来的丛毛羊胡子草用剪刀把地上部分和根部分开,用清水刷洗3遍,将其表面附着的泥土清洗干净之后,再依次用超声波清洗器和超纯水各清洗一遍,使用超声清洗器时于常温下清洗15 min即可,沥干水分后,在55℃的电热恒温鼓风干燥箱中进行烘干,然后用微型植物样品粉碎机粉碎,过0.15 mm尼龙筛,装入塑料密封袋中,做好相关编号和标记,以备消解。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤理化性质测定 土壤pH值测定采用电位计法;土壤水分含量测定采用重量法<sup>[12]</sup>;用重铬酸钾氧化—分光光度法(HJ614—2011)测定土壤中有机质含量;土壤中全氮、全磷、全钾含量测定,分别采用凯氏定氮法<sup>[13]</sup>、氢氧化钠碱熔—钼锑抗比色法<sup>[14]</sup>、氢氧化钠碱熔—火焰光度计法<sup>[14]</sup>。

1.3.2 土壤和植物样品重金属含量测定 称取经过前期处理的土壤样品0.5 g于玻璃消解管中,用混酸进行湿法消解,消解后的样品经定容之后,用孔径为0.45 μm的微孔滤膜过滤,根据其实际浓度的检测情况进行相应的稀释处理,用电感耦合等离子体质谱仪测定其铜、锌、砷、镉、铅含量<sup>[15-16]</sup>。用上述同样的方法,测定丛毛羊胡子草地上部分及根部的重金属元素含量。

### 1.4 数据处理

在样品分析检测时,所有检测的项目均3个平行,结果取平均值。用Excel 2010、SPSS 22.0和Origin Pro 2018对试验数据进行处理分析<sup>[17]</sup>;用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD法)进行差异显著性检验。分别按照公式<sup>[18]</sup>计算丛毛羊胡子草的重金属富集系数及转运系数。

富集系数(BCF)=植物体(或器官)内的重金属含量/土壤中的重金属含量 (1)

转运系数(TF)=植物地上部分的重金属含量/植物根部的重金属含量 (2)

## 2 结果与分析

### 2.1 不同采样点土壤的基本理化特性

土壤有机质是土壤养分的储藏库,是土壤肥力评价的重要指标<sup>[19]</sup>。从表1可以看出,不同采样点丛毛羊胡子草根土壤有机质含量处于10.61~17.93 g/kg,比对我国第二次土壤普查养分分级标准(简称分级标准)(10~20 g/kg)<sup>[20]</sup>,所有采样点的土壤有机质含量均属于缺乏等级。

本研究中,丛毛羊胡子草根土壤全氮含量为0.71~1.21 g/kg,其中,1、6、8采样点属于中等丰富等级(1.0~1.5 g/kg),2、4、5、7采样点属于缺乏等级(0.75~1.00 g/kg);根部土壤全磷含量为0.76~5.97 g/kg,其中,编号1、2、4、5、6、7的土壤样品全磷含量均达到很丰富等级(>1.0 g/kg);8号土壤样品的全磷含量达到中等丰富等级(0.6~0.8 g/kg)。因3、9号采样点的丛毛羊胡子草生长在狭小的石缝中,故无法采集其根部土壤样品并检测其相关数据。可见,与有机质及全氮含量相比,丛毛羊胡子草根土壤的全磷含量比较高。而全钾含量则比较低,按照我国土壤养分的分级标准,不同采样点丛毛羊胡子草根土壤的全钾含量均属于缺乏、很缺乏或极度缺乏水平,也就是说,丛毛羊胡子草可以在缺钾或极度缺钾的环境中正常生存<sup>[21-23]</sup>。由此可知,丛毛羊胡子草可生长在干旱、养分缺乏的中

性至弱碱性的土壤环境中。

表1 不同采样点土壤的基本理化性质  
Tab.1 Basic physical and chemical properties at different sampling points

采样点编号 Sampling point number	pH	含水量/% Water content	有机质/(g/kg) Organic matter	全氮/(g/kg) Total nitrogen	全磷/(g/kg) Total phosphorus	全钾/(g/kg) Total potassium
1	7.74±0.10b	1.05±0.93bc	13.71±0.86c	1.15±0.37a	5.97±0.15a	4.64±0.03d
2	8.10±0.11a	0.33±0.06c	14.66±0.73bc	0.80±0.01ab	5.75±0.13ab	4.60±0.16d
4	7.56±0.03c	0.75±0.43bc	16.21±0.25ab	0.72±0.01b	5.16±0.23b	5.76±0.27c
5	7.57±0.04c	1.36±0.09b	15.69±0.00bc	0.71±0.01b	4.42±0.18c	7.30±0.27b
6	7.42±0.01d	1.23±0.06bc	13.71±0.62c	1.11±0.03ab	5.79±0.66a	5.62±0.18c
7	7.63±0.04bc	0.56±0.19bc	10.61±1.83d	0.83±0.06ab	5.52±0.48ab	5.85±0.12c
8	7.53±0.04c	2.99±0.06a	17.93±1.46a	1.21±0.28a	0.76±0.11d	11.19±0.02a
平均 Mean	7.65±0.22	1.18±0.88	14.65±2.32	0.93±0.22	4.77±1.84	6.42±2.29

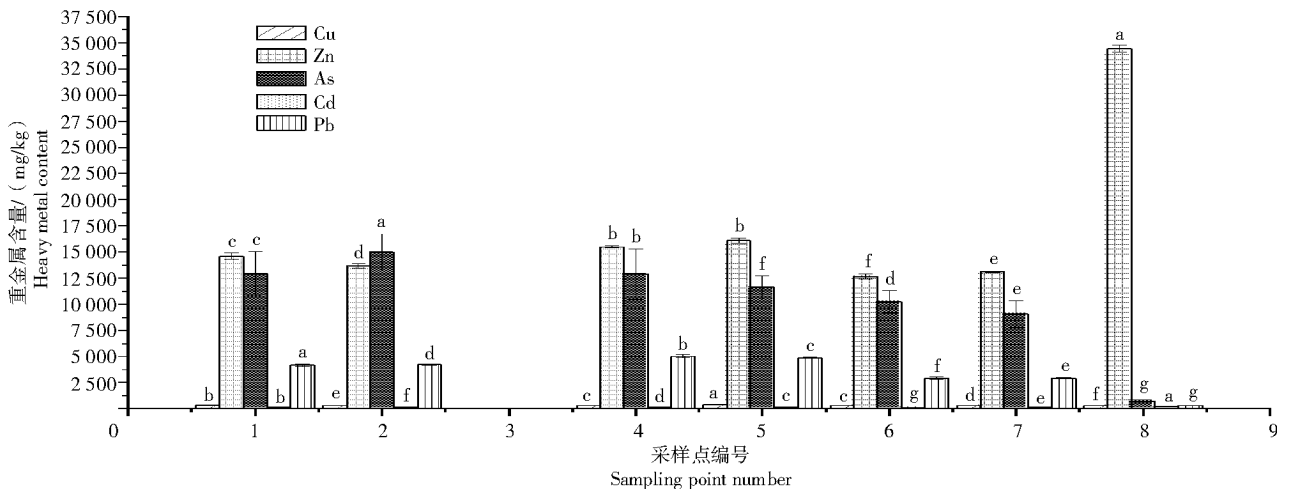
注:不同小写字母表示同一列中不同采样点间差异显著( $P<0.05$ )。

Note: Different lowercase letters in the column indicated significant differences between different sampling points( $P<0.05$ ).

## 2.2 丛毛羊胡子草根部长土壤的重金属含量

不同采样点丛毛羊胡子草根部长土壤5种被测

的重金属含量及其超标倍数见图2和表2。



不同小写字母表示不同采样点间差异显著( $P<0.05$ )。图3同

Different lowercase letters indicated significant differences between different sampling points( $P<0.05$ ). The same as Fig.3

图2 不同采样点丛毛羊胡子草根部长土壤的重金属含量  
Fig.2 Heavy metal content in the root soil of *E. comosum* at different sampling points

本调研区域的南丹有色金属矿区其周边土壤环境中的重金属含量明显超出正常值,5种被测重金属元素的全量分别为Cu 290.91~400.76 mg/kg、Zn 13 077.28~34 449.93 mg/kg、As 738.71~12 900.76 mg/kg、Cd 98.61~166.55 mg/kg、Pb 323.30~5 040.10 mg/kg,平均值分别为Cu 333.18 mg/kg、Zn 17 139.20 mg/kg、As 10 338.37 mg/kg、Cd 115.97 mg/kg、Pb 3 497.25 mg/kg(图2)。

根据国家最新颁布的土壤质量标准(GB-15618—2018)<sup>[24]</sup>,丛毛羊胡子草根部长土壤5种被测的重金属元素含量均已超标,其中,Cu、Zn、As、Cd、Pb的最大超标倍数分别为4.01倍、114.83倍、

598.60倍、328.71倍、29.65倍,被测重金属元素超标倍数的高到低排序为As>Cd>Zn>Pb>Cu。通过单因子污染指数( $P_i$ )和内梅罗综合污染指数( $P_N$ )的计算结果来说明丛毛羊胡子草根部长土壤的重金属污染情况<sup>[25]</sup>。从单因子污染指数来看,除了08号采样点的Cu为中度污染( $2<P_{i-Cu}<3$ )以及Pb属于无污染( $P_{i-Pb}<1$ )之外,其余6个采样点的土壤重金属Cu、Zn、As、Cd、Pb含量均达到重度污染( $P_i>3$ ),不同被测重金属元素污染程度的高低排序为As>Cd>Zn>Pb>Cu;从内梅罗综合污染指数来看,所有采样点的土壤重金属含量均已达到重度污染( $P_N>3$ )(表2)。

表 2 不同采样点丛毛羊胡子草根部分土壤重金属的污染情况  
Tab.2 Pollution condition of heavy metals in the root soil of *E. comosum* at different sampling points

采样点编号 Sampling point number	超标倍数 Exceedance multiples					污染指数 Pollution index					
	Cu	Zn	As	Cd	Pb	$P_{i-Cu}$	$P_{i-Zn}$	$P_{i-As}$	$P_{i-Cd}$	$P_{i-Pb}$	$P_N$
1	3.53	48.61	516.03	187.83	24.53	3.53	48.61	645.04	187.83	11.91	473.42
2	3.10	45.55	598.60	173.48	24.85	3.10	45.55	748.25	173.48	12.07	547.03
4	3.39	51.61	514.49	174.84	29.65	3.39	51.61	643.12	174.84	14.40	471.75
5	4.01	53.59	464.43	193.59	28.46	4.01	53.59	580.53	193.59	13.82	427.56
6	3.24	50.56	340.86	328.71	24.50	3.24	50.56	409.03	328.71	9.80	310.64
7	3.15	43.59	362.62	181.36	17.33	3.15	43.59	453.27	181.36	8.42	335.03
8	2.91	114.83	29.55	277.58	1.90	2.91	114.83	36.94	277.58	0.92	205.62
平均 Mean	3.33	58.33	403.80	216.77	21.60	3.33	58.33	502.31	216.77	10.19	395.86

注:重金属超标倍数参照我国农用地土壤污染风险筛选值(基本项目)进行计算。

Note: The multiple of excessive heavy metals was calculated with reference to the screening value of soil pollution risk of Chinese agricultural land(basic item).

### 2.3 丛毛羊胡子草的重金属含量

丛毛羊胡子草地上部分重金属含量的检测结果如图 3-A 所示,丛毛羊胡子草对 5 种被测土壤重金属不仅具有较强的耐性,而且具有一定的吸收能力,其地上部分 Cu、Zn、As、Cd、Pb 的含量分别为 6.44~30.89、101.44~796.92、11.20~209.38、0.91~

8.12、5.34~217.06 mg/kg,平均含量分别为 16.69、465.45、98.92、5.03、129.49 mg/kg。由此可以看出,丛毛羊胡子草地上部分对 Zn、Pb、As 的吸收能力较强,对 Cu、Cd 的吸收能力相对较弱,其重金属含量的高低排序为 Zn>Pb>As>Cu>Cd。

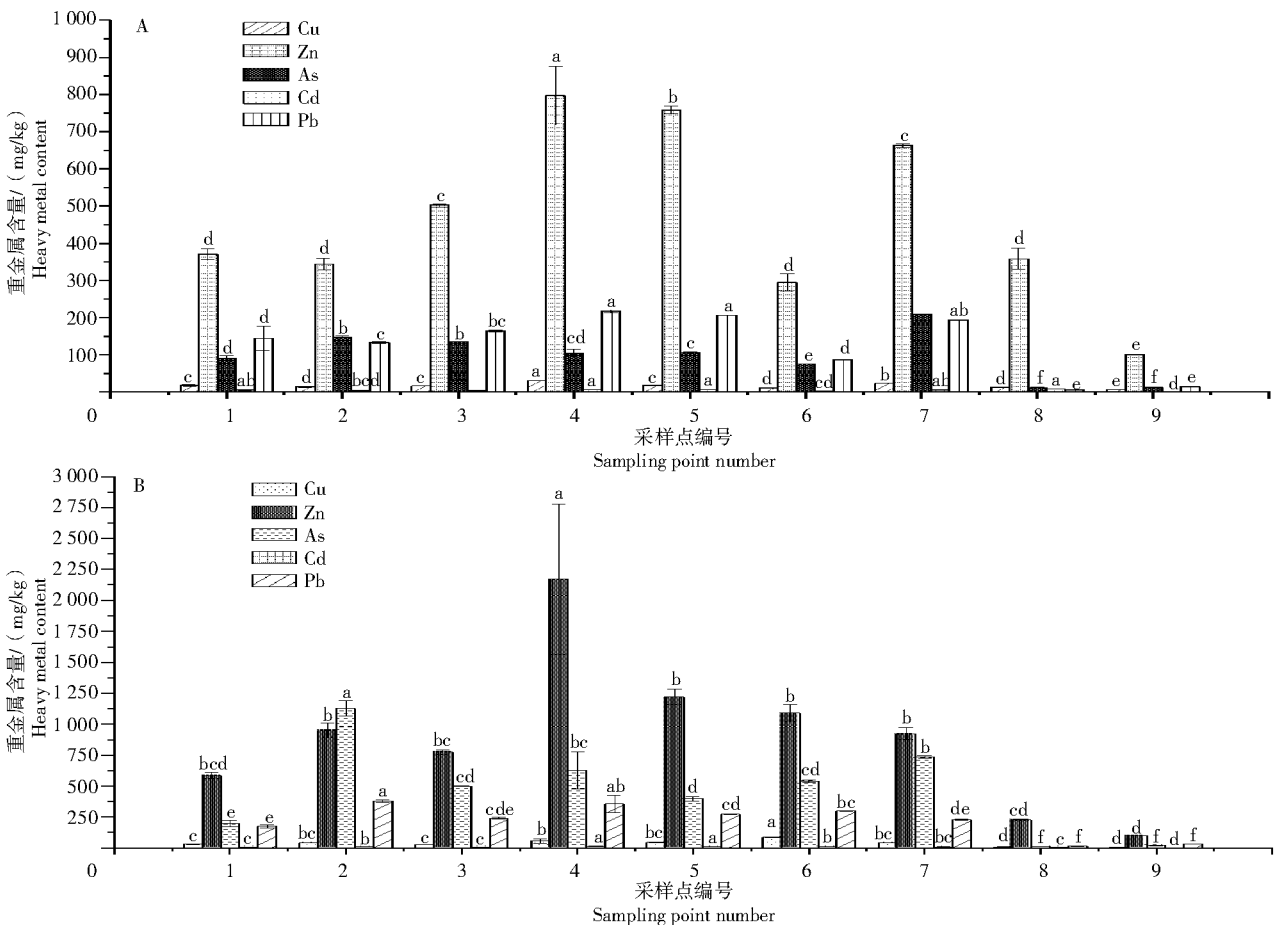


图 3 不同采样点丛毛羊胡子草地上部分 (A) 和根部 (B) 的重金属含量  
Fig.3 Heavy metal content in aboveground (A) and root (B) parts of *E. comosum* at different sampling points

在不同采样点丛毛羊胡子草根部分重金属含量的检测中,被测元素Cu、Zn、As、Cd、Pb的含量分别为6.91~86.60、99.49~2171.21、10.61~1124.54、1.75~13.18、13.66~378.65 mg/kg,平均含量分别为38.05、894.23、461.72、8.27、221.72 mg/kg,不同重金属含量的高低排序为Zn>As>Pb>Cu>Cd。与地上部分相比,丛毛羊胡子草根部的重金属含量更高,被测重金属元素含量的高低排序也略有不同。由图3-B可知,丛毛羊胡子草根部分对Zn、As、Pb的吸收能力较强,对Cu、Cd的吸收能力相对较弱。

## 2.4 丛毛羊胡子草的重金属富集系数及转运系数

### 2.4.1 丛毛羊胡子草的重金属富集系数

不同采样点丛毛羊胡子草地上、地下部分的重金属富集系数计算结果如表3所示,丛毛羊胡子草的地上部分和地下部分对不同重金属元素均有一定的富集能力,但富集系数较小,富集能力较弱;相对而言,丛毛羊胡子草根部的重金属富集能力强于其地上部分;丛毛羊胡子草对不同重金属元素的富集能力存在差异,无论是地上部分还是地下部分,其对Cu、Zn、Cd、Pb的富集能力相对较强,对As的富集能力相对较弱。

表3 不同采样点的丛毛羊胡子草地上和地下部分的重金属富集系数  
Tab.3 Heavy metal enrichment coefficients of aboveground and underground parts of *E. comosum* at different sampling points

采样点编号 Sampling point number	Cu	Zn	As	Cd	Pb
1	0.050/0.087	0.025/0.040	0.007/0.015	0.051/0.056	0.035/0.042
2	0.043/0.127	0.025/0.070	0.010/0.075	0.033/0.092	0.032/0.090
4	0.091/0.163	0.051/0.140	0.008/0.049	0.067/0.126	0.043/0.071
5	0.046/0.115	0.047/0.076	0.009/0.034	0.062/0.106	0.043/0.056
6	0.033/0.268	0.023/0.086	0.007/0.053	0.031/0.097	0.030/0.102
7	0.075/0.132	0.051/0.071	0.023/0.082	0.053/0.072	0.066/0.077
8	0.042/0.027	0.010/0.007	0.015/0.014	0.049/0.040	0.017/0.042
平均 Mean	0.054/0.131	0.033/0.070	0.011/0.046	0.049/0.084	0.038/0.069

注:在各被测元素中,“/”前后的数据分别为相应植株丛毛羊胡子草地上部分和地下部分的重金属富集系数。  
Note: In each element measured, the data before and after “/” were the heavy metal enrichment coefficients in the above and underground parts of *E. comosum* of the corresponding plant, respectively.

### 2.4.2 丛毛羊胡子草的重金属转运系数

转运系数越大,说明植物由根部向地上部运输元素或化合物的能力越强<sup>[26]</sup>。不同采样点丛毛羊胡子草的重金属转运系数如表4所示,丛毛羊胡子草对不同重金属元素的转运能力存在差异。总体来说,其对

锌、镉、铜、铅的转运能力相对较强,对砷的转运能力较弱,该结果与丛毛羊胡子草的富集系数一致;从不同采样点丛毛羊胡子草各被测重金属元素转运系数的平均值来看,其高低序为Zn>Cd>Cu>Pb>As。

表4 不同采样点丛毛羊胡子草的重金属的转运系数  
Tab.4 Transport coefficients of heavy metals of *E. comosum* at different sampling points

采样点编号 Sampling point number	Cu	Zn	As	Cd	Pb	采样点编号 Sampling point number	Cu	Zn	As	Cd	Pb
1	0.57	0.63	0.46	0.90	0.82	6	0.13	0.27	0.14	0.32	0.29
2	0.34	0.36	0.13	0.36	0.35	7	0.56	0.71	0.28	0.73	0.85
3	0.61	0.65	0.27	0.56	0.68	8	1.52	1.58	1.06	1.22	0.39
4	0.56	0.37	0.16	0.53	0.61	9	0.93	1.02	0.68	0.52	0.44
5	0.40	0.62	0.27	0.59	0.75	平均 Mean	0.62	0.69	0.38	0.64	0.58

## 2.5 相关性分析

### 2.5.1 丛毛羊胡子草根部分土壤重金属含量间的相关性分析

丛毛羊胡子草根部分土壤被测重金属元素含量的相关性分析结果如图4所示,根部土壤中的Zn与As和Pb呈显著负相关( $P<0.05$ )、与Cd呈

极显著正相关( $P<0.01$ );As与Cd呈极显著负相关、与Pb呈极显著正相关( $P<0.01$ );Cd与Pb呈显著负相关( $P<0.05$ );其余元素之间虽有一定的相关性,但未达显著水平。由此可以推测,丛毛羊胡子草根部分土壤中的Zn与Cd、As与Pb可能具有相

同的来源,主要是由矿物开采及生产加工所致。



皮尔逊相关.\*\*相关性在 0.01 层上显著(双尾),\*相关性在 0.05 层上显著(双尾)。图中颜色深浅和圆圈大小表示相关程度,蓝色表示正相关,红色表示负相关,星数目的多少表示显著程度

Pearson correlation: \*\* Correlation was significant at layer 0.01(double tails), \* correlation was significant at layer 0.05(double tails). The color depth and circle size in the figure indicated the degree of correlation, blue indicated positive correlation, red indicated negative correlation, and the number of stars indicated significance degree

图 4 丛毛羊胡子草根土壤重金属含量的相关性热图  
Fig.4 Correlation heat map of heavy metal content in the root soil of *E. comosum*

2.5.2 丛毛羊胡子草根土壤与植物体内重金属含量的相关性 丛毛羊胡子草地下、地上部分重金属含量与其根部土壤重金属含量的相关性分析结果如表 5 所示,丛毛羊胡子草根部的 Cu 含量与其根部土壤中的 Cd 含量呈显著负相关( $P < 0.05$ );根部的 Pb 含量与其根部土壤中的 Zn 及 Cd 含量分别呈显著或极显著负相关( $P < 0.05$  或  $P < 0.01$ ),与根

部土壤中的 As 及 Pb 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );丛毛羊胡子草根其余被测元素与其根部土壤重金属元素之间呈正相关或负相关,但未达显著水平。丛毛羊胡子草地上部分(茎叶)的 Pb 含量与其根部土壤中的 Pb 含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),其余被测元素与其根部土壤重金属元素之间呈正相关或负相关,但未达显著水平。

表 5 丛毛羊胡子草茎叶及根部重金属含量与根部土壤重金属含量的相关性  
Tab. 5 Correlation between heavy metal content in stems, leaves, and roots and its root soil of *E. comosum*

组织 Tissue	重金属 Heavy metal	土壤 Soil				
		Cu	Zn	As	Cd	Pb
根部 Root	Cu	0.230	-0.699	0.479	-0.777*	0.426
	Zn	0.361	-0.514	0.560	-0.611	0.717
	As	-0.133	-0.655	0.656	-0.692	0.479
	Cd	0.512	-0.358	0.468	-0.448	0.669
	Pb	0.287	-0.811*	0.863*	-0.879**	0.803*
茎叶 Stems & Leaf	Cu	0.276	-0.294	0.309	-0.304	0.529
	Zn	0.534	-0.206	0.197	-0.190	0.508
	As	0.088	-0.711	0.541	-0.639	0.463
	Cd	0.199	0.649	-0.525	0.683	-0.203
	Pb	0.634	-0.713	0.708	-0.676	0.861*

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

Note: Pearson correlation: \*\* Correlation was significant at layer 0.01(double tails), \* correlation was significant at layer 0.05(double tails).

### 3 结论与讨论

#### 3.1 丛毛羊胡子草的生境要求及适应能力

相关研究结果表明,丛毛羊胡子草是一种抗旱和抗寒能力极强的岩生植物,非常适合作为道路边坡绿化的优良物种<sup>[9-11]</sup>。笔者野外调查发现,丛毛羊胡子草是南丹有色金属矿区周边陡坡岩壁、尾矿坝、采矿坑道口、废石堆、选矿渣石场、护坡石墙常见的优势草本植物种群,其生存环境恶劣,土壤稀缺,养分匮乏,且时常面临各种不良外界因子的胁迫<sup>[8]</sup>,但丛毛羊胡子草依然能够生长良好,没有表现出明显的受害症状,同时具有较大的生物量和较强的繁殖能力。由此可见,丛毛羊胡子草具有极强的环境适应能力和生存能力,符合环境治理对修复物种选用的基本要求。

#### 3.2 丛毛羊胡子草对重金属的耐性及修复潜力

南丹矿物资源丰富<sup>[27]</sup>,其主要矿产为铅、锌、锡等多金属矿,因此矿区周边土壤的铅锌含量比较高。砷是一种类金属元素,在南丹有色金属矿区中,砷的储量比较大,占全国总保有储量的17.1%<sup>[28]</sup>。过去,由于技术落后及环保意识淡薄,矿物资源开发与环境保护的矛盾比较突出,致使重金属污染问题加剧,并造成了严重的不良后果<sup>[29-31]</sup>。

与其他被测重金属元素相比,丛毛羊胡子草根部的锌和砷含量相对较高,可能与采样点所在地的土壤重金属背景及矿业生产活动有关<sup>[32]</sup>。丛毛羊胡子草对不同被测重金属元素的吸收、转运和富集能力存在较大差异,可能与其自身的生物学特性及土壤重金属背景有关,也可能与不同重金属元素的有效态含量有关,具体问题有待进一步研究。与单一重金属胁迫不同的是,在复合胁迫的情况下,不同重金属元素之间可能存在一定的拮抗作用<sup>[33]</sup>,从而对丛毛羊胡子草的重金属富集系数和转运系数产生一定的影响。虽然丛毛羊胡子草对被测重金属元素的富集系数和转运系数比较小,达不到超累积植物的标准,但不能否认丛毛羊胡子草对被测重金属元素的复合胁迫具有较强的耐性。根据野外采集样品的检测数据分析,丛毛羊胡子草对重金属的耐受机制可能有2种不同的方式,即根部囤积型和拒斥型,该发现与刘旭辉等<sup>[8]</sup>的相关研究结果相似。

与其他耐重金属植物相比,丛毛羊胡子草是广西南丹常见的乡土植物,生命力强,对生境没有特别要求,即使在岩石峭壁上也能够正常生长,平时

根本不需要进行人工管护,虽然其对部分重金属元素的吸收能力不是特别强,但资源廉价易得,且不存在生态风险,所以其在环境治理中应用前景广阔。

综合考虑丛毛羊胡子草地上地下部分的重金属含量、重金属富集系数和转运系数、重金属的生物毒性等因素,同时,由于丛毛羊胡子草生物量大,且为多年生植物,对As、Cd、Zn、Pb、Cu复合胁迫具有极强的耐性,因此,非常适合作为以上被测重金属元素重度污染土壤的修复植物。因为丛毛羊胡子草地上地下部分的砷和铅含量与其根部土壤的砷和铅含量分别呈正相关或显著正相关,所以,丛毛羊胡子草应该属于砷和铅的耐受型植物。丛毛羊胡子草地上地下部分的锌含量与其根部土壤的锌含量呈负相关,其地下部分的镉含量与根部土壤的镉含量呈负相关,因此,丛毛羊胡子草可能属于锌和镉的防御型植物。由此可见,丛毛羊胡子草对不同重金属的复合胁迫,可能有多种不同的适应途径和耐受方式,因而能够最大程度减轻重金属的毒害。

#### 3.3 丛毛羊胡子草的开发价值及安全利用

因为丛毛羊胡子草具有耐寒、抗旱、生物量大、纤维含量高等特点,因此,可在矿区周边规模种植,将其作为纤维资源或造纸原材料进行开发利用,只要产品质量符合国家造纸行业或纺织行业的相关要求,则可以变废为宝。又因丛毛羊胡子草具有一定的观赏价值,且特别适合于道路边坡的绿化,既可以发挥其水土保持的功能,又可以美化环境,改善道路的生态景观。尤其是在有色金属矿区等重金属污染比较严重的地区,丛毛羊胡子草可以充分发挥其超强的重金属耐性,利用其发达的根系和地上部分组织器官,对土壤和大气中的重金属进行吸收和固定,防止污染物的转移和扩散,从而达到环境治理的目的。此外,丛毛羊胡子草还可以用于草编或其他工艺品的制作,因其没有进入食物链,所以,对生态系统来说还是比较安全的。

本研究通过对广西南丹有色金属矿区采集的丛毛羊胡子草及其根部土壤样品铅、锌、铜、镉、砷含量的检测及相关数据的比较分析,结果表明,丛毛羊胡子草根土壤5种被测的重金属元素含量较高,其平均含量分别为Cu 333.18 mg/kg、Zn 17 139.20 mg/kg、As 10 338.37 mg/kg、Cd 115.97 mg/kg、Pb 3 497.25 mg/kg,单因子污染指数和内梅罗综合污染指数均已达到重度以上污染

等级,其中 As、Cd、Zn 的污染尤为严重,Pb 和 Cu 的污染程度相对较轻,不同重金属元素污染程度高低排序为 As>Cd>Zn>Pb>Cu。丛毛羊胡子草地上部分和地下部分 5 种被测重金属元素的平均含量分别为:Cu 16.69 mg/kg、Zn 465.45 mg/kg、As 98.92 mg/kg、Cd 5.03 mg/kg、Pb 129.49 mg/kg 和 Cu 38.05 mg/kg、Zn 894.23 mg/kg、As 461.72 mg/kg、Cd 8.27 mg/kg、Pb 221.72 mg/kg。丛毛羊胡子草地上部分的重金属富集系数和转运系数较小,地下部分的重金属富集系数相对较大,吸收的重金属元素主要集中在根部,其对被测重金属元素的耐受性可能属于根部囤积型和防御型。说明,虽然丛毛羊胡子草不是超累积植物,但其对被测重金属元素具有一定的吸收和转运能力,能够耐受高浓度的砷、镉等重金属复合胁迫,生命力强,生物量大,对生境要求不高,因此,可以作为重金属重度污染土壤修复的优良植物使用。

#### 参考文献:

- [1] 王妍. 我国有色金属工业土壤重金属污染防治的现状与对策[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(3):1-9.  
WANG Y. Status and countermeasures on soil heavy metals pollution control in nonferrous metals industry in China[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2021(3):1-9.
- [2] 张德彬, 刘国东, 钟瑞. 孝新合气田区地下水铁锰污染分析及环境健康风险评估[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(1):70-77.  
ZHANG D B, LIU G D, ZHONG R. Analysis of iron and manganese pollution and environmental health risk assessment of groundwater in Xiaoxinhe gas field[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(1):70-77.
- [3] 李旭, 晁赢, 阎祥慧, 等. 植物修复技术治理农田土壤重金属污染的研究进展[J]. 河南农业科学, 2022, 51(12):10-18.  
LI X, CHAO Y, YAN X H, et al. Research progress of phytoremediation of heavy metal polluted farmland soil[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2022, 51(12):10-18.
- [4] 方忆刚. 矿山地区重金属污染土壤植物修复技术研究[J]. 环境科学与管理, 2022, 47(3):114-118.  
FANG Y G. Research on phytoremediation technology of heavy metal contaminated soil in mining area[J]. Environmental Science and Management, 2022, 47(3):114-118.
- [5] 王慧芳, 罗承德. 2 种野生岩生植物下土壤微生物生态分布研究[J]. 林业科学, 2006, 42(8):139-143.  
WANG H F, LUO C D. Study on ecological distribution of soil microbes under two kinds of petrophile plants[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2006, 42(8):139-143.
- [6] 谢贤健, 兰代萍, 白景文. 三种野生岩生草本植物的抗旱性综合评价[J]. 草业学报, 2009, 18(4):75-80.  
XIE X J, LAN D P, BAI J W. A comprehensive assessment of drought-resistance of three wild rocky-slope grasses[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2009, 18(4):75-80.
- [7] 何云, 李贤伟, 龚伟. 3 种岩石边坡护坡植物叶片质膜透性和可溶性糖含量对低温胁迫的响应[J]. 四川农业大学学报, 2012, 30(1):42-45.  
HE Y, LI X W, GONG W. Response of membrane permeability and soluble carbohydrate of three native *Petrophile* plants to low temperature stress[J]. Journal of Sichuan Agricultural University, 2012, 30(1):42-45.
- [8] 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, 39(5):58-62.  
LIU X H, XU Y H, WANG R F, et al. Phytoremediation with *Eriophorum comosum* for lead and cadmium contaminated soil in changpo mine tailing dam[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences, 2010, 39(5):58-62.
- [9] 何云, 李贤伟, 李西, 等. 2 种野生岩生植物叶片可溶性蛋白含量对低温胁迫的响应[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(18):7552-7553.  
HE Y, LI X W, LI X, et al. Response of two kinds of wild rock plant leaf soluble protein content to low temperature stress[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2008, 36(18):7552-7553.
- [10] 陈栋霖. 岩生植物丛毛羊胡子草抗旱性研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2008.  
CHEN L L. Studies on drought resistance of rocky-grasses *erriophorum comosum* nees[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2008.
- [11] 李西, 罗承德. 两种岩生植物种子鉴定及播种量研究[J]. 草业与畜牧, 2006(8):5-7, 20.  
LI X, LUO C D. Study on seed certification and seeding quantity about two *Petrophile* plants[J]. Prataculture & Animal Husbandry, 2006(8):5-7, 20.
- [12] 鲁汝坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2000:289-290.  
LU R K. Soil and agro-chemistry analysis[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000:289-290.
- [13] 卢锦斌, 张利敏, 徐秀容. 改良凯氏定氮法的研究进展[J]. 家畜生态学报, 2020, 41(12):84-87.  
LU J B, ZHANG L M, XU X R. Advances of improved Kjeldahl method[J]. Journal of Domestic Animal Ecology, 2020, 41(12):84-87.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000:76-78.  
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000:76-78.
- [15] 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.  
LI X, WEI J, OU Y, et al. Measurement of contents of five heavy metals in three plants living in different non ferrous metal mining areas[J]. Fujian Analysis & Testing, 2015, 24(5):18-22.
- [16] 张爱琴, 郭斌, 柳利龙, 等. 基于 ICP-MS 的甘肃不同产地小米矿物元素含量特征及判别分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7):301-310.  
ZHANG A Q, GUO B, LIU L L, et al. Characteristics of mineral elements contents and discriminant analysis of foxtail millet from different producing areas in Gansu province based on ICP-MS[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023,

- 44(7):301-310.
- [17] 杨瑞卿. 不同配方土对上海市4种行道树叶片净光合速率和蒸腾速率的影响及矢量关系分析[J]. 植物资源与环境学报, 2018, 27(1):52-59.  
YANG R Q. Effects of different formula soils on leaf net photosynthetic rate and transpiration rate of four species of street trees in Shanghai City and vector relationship analysis[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2018, 27(1):52-59.
- [18] 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.  
LI J F. Research progress of heavy metal pollution hyperaccumulator in mining area at home[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2020, 40(5):138-143.
- [19] 解文艳, 周怀平, 杨振兴, 等. 山西省农田土壤肥力现状及近10年变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2022(10):1-10.  
XIE W Y, ZHOU H P, YANG Z X, et al. Current situation and change characteristics in recent 10 years of farmland soil fertility in Shanxi Province based on location monitoring[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022(10):1-10.
- [20] 郭巨秋, 刘建玲, 谢娇, 等. 河北省主要苹果产区土壤养分状况与演变[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3):157-163.  
GUO J Q, LIU J L, XIE J, et al. Soil nutrient status and evolution of main apple producing areas in Hebei province[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020(3):157-163.
- [21] MAIRE V, WRIGHT I J, PRENTICE I C, et al. Global effects of soil and climate on leaf photosynthetic traits and rates[J]. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24(6):706-717.
- [22] 陆志峰, 鲁剑巍, 潘勇辉, 等. 钾素调控植物光合作用的生理机制[J]. 植物生理学报, 2016, 52(12):1773-1784.  
LU Z F, LU J W, PAN Y H, et al. Physiological mechanisms in potassium regulation of plant photosynthesis[J]. Plant Physiology Journal, 2016, 52(12):1773-1784.
- [23] 孔佑涵, 苑平, 吴娟娟. 柑橘的钾营养研究进展[J]. 湖南师范大学自然科学学报, 2017, 40(3):37-41.  
KONG Y H, YUAN P, WU J J. Advances on the potassium nutrition in *Citrus*[J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University, 2017, 40(3):37-41.
- [24] 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:GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.  
Ministry of Ecology and Environment, State Administration for Market Regulation. Soil environmental quality risk control standard for soil contamination of agricultural land:GB 15618-2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [25] 顾金峰, 朱四喜, 刘冬, 等. 贵州锁黄仓沼泽土壤重金属含量分布特征及污染评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(13):5429-5436.  
GU J F, ZHU S X, LIU D, et al. Pollution assessment and distribution characteristics of heavy metal contents in swamp soils in Suohuangcang in Guizhou[J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(13):5429-5436.
- [26] PANDEY S K, BHATTACHARYA T, CHAKRABORTY S. Metal phytoremediation potential of naturally growing plants on fly ash dumpsite of Patratu thermal power station, Jharkhand, India[J]. International Journal of Phytoremediation, 2016, 18(1):87-93.
- [27] 陆秋燕. 宋至清代广西金属矿产开发研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2023.  
LU Q Y. Research on the history of mining development of Guangxi from the Song to Qing dynasty[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2023.
- [28] 肖细元, 陈同斌, 廖晓勇, 等. 中国主要含砷矿产资源的区域分布与砷污染问题[J]. 地理研究, 2008, 27(1):201-212.  
XIAO X Y, CHEN T B, LIAO X Y, et al. Regional distribution of arsenic contained minerals and arsenic pollution in China [J]. Geographical Research, 2008, 27(1):201-212.
- [29] 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.  
HUANG K X, QIN L M, WU S Z, et al. Situation and remedial measures for heavy metals pollution in Hechi city of Guangxi[J]. Journal of Guangxi Academy of Sciences, 2012, 28(4):320-324, 329.
- [30] 黄宇妃, 宋波, 袁立竹, 等. 南丹金竹坳尾矿库及周边重金属污染调查与耐性植物筛选[J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34(3):560-567.  
HUANG Y F, SONG B, YUAN L Z, et al. Heavy metals pollution investigation on Jinzhuaotailing tailing waste land and heavy metal tolerant plants selection in Nandan[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2014, 34(3):560-567.
- [31] 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.  
LIU X H, QIN Y R, HUANG Z Q, et al. Sustainable utilization of mineral resources and conservation strategies of ecological environment in Hechi region[J]. Journal of Hechi University, 2013, 33(2):1-6.
- [32] 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估[J]. 地球环境学报, 2022, 13(5):618-630.  
YANG L X, LI Y, LIU J Y, et al. Current status and risk assessment of heavy metal pollution in China's smelters and surrounding soils[J]. Journal of Earth Environment, 2022, 13(5):618-630.
- [33] 万子栋, 高天鹏, 周玉霞, 等. 重金属复合胁迫下碱蓬萌发生长及富集特征[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3):493-507.  
WAN Z D, GAO T P, ZHOU Y X, et al. Seed germination, bud growth and heavy-metal accumulation of *Suaeda salsa*[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2020, 36(3):493-507.