

殷志遥, 和君强, 刘代欢, 等. 我国土壤锑污染特征研究进展及其富集植物的应用前景初探[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(3): 199-207.

YIN Zhi-yao, HE Jun-qiang, LIU Dai-huan, et al. Research Progress on Characteristics of Soil Antimony Pollution in China and the Preliminary Exploration About Application Prospect of Antimony Accumulator Plants[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, 35(3): 199-207.

我国土壤锑污染特征研究进展及其富集植物的应用前景初探

殷志遥, 和君强, 刘代欢*, 邓林, 常海伟, 秦华, 桂娟

(湖南永清环保研究院有限责任公司, 湖南长沙 410330)

摘要:我国是世界上锑储备量最高的国家,由于不合理的开发利用,大量的锑进入环境之中。锑作为一种致癌元素,其含量的超标严重危害着环境中生物及人类健康。但由于人们对锑污染关注程度不高,以及相关修复技术的不成熟(尤其是植物修复技术),我国所面临的锑污染形势不容乐观。本文对我国锑资源的分布、污染状况与特征以及相关锑富集植物进行综述,同时根据锑富集植物野外筛选工作的研究进展,对其进行应用评估,为今后应用植物修复降低土壤锑污染的环境风险提供一定的科学依据。

关键词:锑污染;土壤;植物修复;应用评估

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2018)03-0199-09

doi: 10.13254/j.jare.2017.0293

Research Progress on Characteristics of Soil Antimony Pollution in China and the Preliminary Exploration About Application Prospect of Antimony Accumulator Plants

YIN Zhi-yao, HE Jun-qiang, LIU Dai-huan*, DENG Lin, CHANG Hai-wei, QIN hua, GUI Juan

(Hunan Yonker Environment Protection Research Institute Co., Ltd., Changsha 410330, China)

Abstract: China is the country with the highest reserves of antimony in the world, a large amount of antimony resources are lost to the environment due to unreasonable use. As an oncogenic element, the exceeded antimony content seriously threaten to human health. However, due to people's less concern about antimony pollution as well as the immaturity of relevant governance techniques (especially phytoremediation), the situation of antimony pollution in China is not optimistic. This paper reviewed the distribution, pollution status, characteristics and accumulator plants of antimony in China, and according to the research advances on screening of antimony accumulator plants in field, evaluated their application prospect for reducing the environmental risks of antimony contamination using phytoremediation.

Keywords: antimony pollution; soil; phytoremediation; application assessment

锑(Sb)是一种具有潜在毒性和致癌性的类金属元素,其化学性质与砷相似,在医疗以及工业领域内具有重要作用^[1-2]。我国作为产锑大国,锑矿储量位居世界第一,产量约占世界总量的79.6%^[3]。近年来由于对锑矿的不合理利用,致使土壤、水以及大气中的锑浓度急剧上升,尤其在湖南、贵州、广西等锑矿相对比

较集中的地方,远远超过其背景值^[4-7]。

锑不是植物生长发育所必需的营养元素,但植物可以吸收土壤中的溶解态锑。当锑进入植物体内后会与必要的代谢物竞争。相关研究表明,在一些成熟植物叶片中,锑的浓度达到 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,会对植物产生一定的毒害作用^[8]。锑对植物的毒性效应主要是通过通过对植物造成氧化胁迫,影响植物的细胞结构、信号传导、能量代谢以及对矿质元素的吸收等,对于植物的生长发育造成严重危害^[9]。

而锑对人体的毒性作用主要是通过通过与蛋白质内的巯基(-SH)结合,抑制某些巯基酶以及琥珀酸氧化酶的活性,影响蛋白质和糖的代谢,损害肝脏、心脏、

收稿日期:2017-11-29 录用日期:2018-01-22

基金项目:湖南省科技计划项目(2016TP2018, 2016TP1024);国家重点研发计划项目(2016YFD080070)

作者简介:殷志遥(1993—),男,湖北武汉人,助理研发工程师,主要从事农业环境修复与评估等方面的研究。

E-mail:18271390486@163.com

*通信作者:刘代欢 E-mail:36882233@qq.com

神经系统以及对粘膜产生一定的刺激作用^[10]。刘碧君等^[11]分别对锡矿山矿区和贵阳市的人体头发做了检验分析,发现锡矿山矿区的人体头发中平均锑含量为 $15.9 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 远远高于贵阳市的平均锑含量 ($0.532 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

如何防治锑污染已成为当前亟需解决的问题。相比于其他修复技术,植物修复在土壤锑污染中的应用还处于起步阶段。目前的工作主要集中于对锡矿山周围的耐性植物做调研及筛选,并对锑的吸收、转运以及耐性机理做出了一系列研究,缺乏在实际工程中的应用。本文在现有研究的基础上,综述了我国土壤锑污染特征研究进展及其富集植物的应用前景,为降低土壤以及作物中锑的含量提供一定的科学依据。

1 我国锑污染分布状况

1.1 锑资源分布概况

根据中国潜力评价数据,我国已探明的锑矿(含矿点和矿化点)共 617 处,分属于全国 18 个省、自治区,且多集中在我国南方,主要分布于湖南(117 处)、西藏(83 处)、广西(51 处)、贵州(44 处)、云南(108 处)等地区(图 1)^[12]。湖南作为我国的一个产锑大省,锑资源储备量十分丰富,主要的锑矿山有冷水江锡矿山、安化渣滓溪锑矿、沅陵沃溪锑金矿、桃江板溪锑矿区等^[13]。其中冷水江锡矿山为世界上锑储备量最高的矿山,享有世界锑都之称^[14]。广西的锑矿资源分布相对比较集中,主要分布于河池市南丹县、金城江区以及百色市的隆林县和西林县,此外在南宁市、桂林市以及贺州市也有少量分布^[15]。位于南丹大厂镇的锑矿是仅次于湖南锡矿山的第二大锑矿山。随着近几年西部大开发政策的实施,西藏也陆续发现了尕尔西姜、美多和拉诺玛等大型锑矿床,成为锑矿资源的第三大省(区)^[12]。而贵州省的锑矿资源分布较广泛,在 9 个县均有分布,主要分布在晴隆县、独山县以及榕江县。另外在镇宁县、册亨县、三都县、雷山县及赫章县也有分布^[16]。其中位于晴隆县的锑矿资源保有量仅次于湖南锡矿山、广西南丹锑矿,属世界第三大锑矿山。云南的锑资源则主要分布在木利锑矿、维西格坡洛锑矿、笔架山锑矿等^[17-19]。

1.2 农用地锑污染现状及扩散趋势

我国丰富的锑资源在促进了工业以及医疗等领域发展的同时,也带来了一定的环境隐患。根据近年来对锡矿山周围农用地土壤的调查研究发现(表 1),土壤中的平均锑含量多集中于 $17.23\sim 1\,438.00 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,

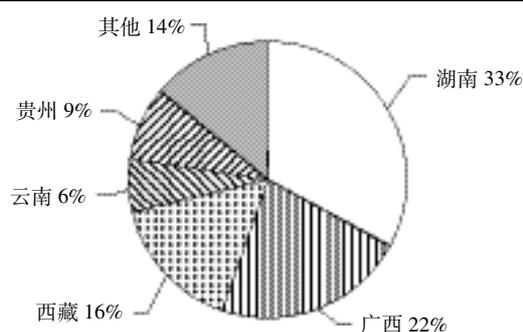


图 1 我国锑资源储量分布概况^[12]

Figure 1 Distribution of antimony resource in China^[12]

远高于湖南省 ($2.98 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 和贵州省 ($2.24 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 背景值,且在不同的地方其污染程度表现出较大的区别^[20-23]。主要是由于废矿、炉渣堆放的缘故以及受到锑尘、烟气沉降、雨水淋溶等因素的影响,造成锑等重金属迁移至土壤之中,使得附近的河流、土壤以及植物中经常能检测到较高的锑含量^[24]。此外锑可以随大气、河流等迁移至远离污染源的地区,形成跨区域远程污染。项萌等^[25]研究发现,广西河池南丹县锑矿冶炼区土壤锑的浓度为 $195\sim 2\,034 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且其含量与距离冶炼厂的距离密切相关,其中在 $0\sim 400 \text{ m}$ 内急剧衰减,衰减幅度达 90%,在 $400\sim 2\,400 \text{ m}$ 范围缓慢衰减,影响范围可以达到很远,而在 3 种不同土壤环境中(水稻田、菜地、荒地),锑含量表现为水稻田>菜地>荒地。也有研究表明,过去的 30 年内,北极圈大气中的锑含量增加了 50%,证实了跨区域锑污染的可能性^[26]。但调查研究发现,由于对锑污染及健康风险认识的不足以及环保治理意识较弱,矿区 80% 的农民只有在确实种不出农作物的时候才意识到土壤被污染了,且农用地的利用多样性较低,结构表现单一^[27]。

1.3 土壤锑形态、分布及生物有效性

锑的金属性不强,易形成锑的衍生物(锑化物、氢化物、有机锑化物等),其毒性的大小不仅与其总量有关,很大程度上还取决于其存在形态。其中单质锑的毒性高于其盐类,无机锑的毒性高于有机锑,+3 价的毒性高于+5 价(+3 价的毒性大约是+5 价的 10 倍),且同等价态锑的毒性还与其化合物的形态以及晶体结构有关^[28-32]。锑在土壤中主要以残渣态的形式存在,占总锑的比例最高可达 90%,水溶态含量最低(图 2)^[10,33-36]。

土壤中锑形态的分布特征会对其在土壤-植物体系中的富集转运能力产生一定影响。相关研究者比较了蜈蚣草、斑茅、五节芒、粽叶芦对砷和锑的转运能

表1 农用地中锑含量
Table 1 Antimony content in agricultural land

区域	采样点	范围/mg·kg ⁻¹	均值/mg·kg ⁻¹	来源
湖南锡矿山	某冶炼厂附近 1 km 的菜地	524.15~2 803.83	1 438.00	莫昌琨等 ^[20]
	距某采矿厂 1 km 的菜地	390.98~424.55	403.8.00	
	尾沙坝下游 1 km 的菜地	141.92~354.69	248.30	
	距某采矿厂 2 km 的菜地	156.87~4 236.37	826.80	
	尾沙坝下游 2 km 的菜地	196.76~547.25	392.00	
湖南锡矿山	北矿附近某农田	235.00~1 132.00	659.00	Wang 等 ^[21]
	南矿附近某农田	114.00~2 159.00	915.00	
贵州晴隆县	某废弃锑冶炼厂附近玉米地	32.07~238.76	131.22	刘灵飞等 ^[22]
贵州独山县	距某冶炼厂 10 km、开采区 20 km 的农田	8.53~179.20	40.07	莫昌琨等 ^[23]
	距某冶炼厂 0.7 km 的农田	4.17~27.19	17.23	
	距某冶炼厂 1 km 的农田	9.16~27.44	19.76	
	距某冶炼厂 2 km 的农田	14.12~47.65	31.59	
	距某冶炼厂 4 km 的农田,靠近冶炼炉	24.41~220.80	114.80	

力,发现只有五节芒和粽叶芦从根部到地上部(茎/叶)对锑具有较好的转运能力,而4类植物对砷都表现出了良好的转运能力,说明锑在植物体中的转运能力相对于砷较弱^[37-39]。文吉昌等^[40]的研究结果(表2)表明,除了个别植物对锑的富集能力大于砷外,其余植物对锑的富集能力均远小于砷^[40]。也有研究表明,植物地上部的锑含量与根部含量之间没有相关性($r=0.19$),植物吸收的锑并非单一来自土壤的释放,还有

一部分可能来自大气沉降,进一步表明了锑在植物中具有较弱的富集转运能力^[37,41-42]。

2 我国常见农作物对锑的富集特征

2.1 水稻

依据世界卫生组织(WHO)推荐的每日锑摄入量,有33%来源于大米,因此食用大米已成为矿区居民主要的锑暴露途径^[43]。相关研究^[44]对湖南省锡矿

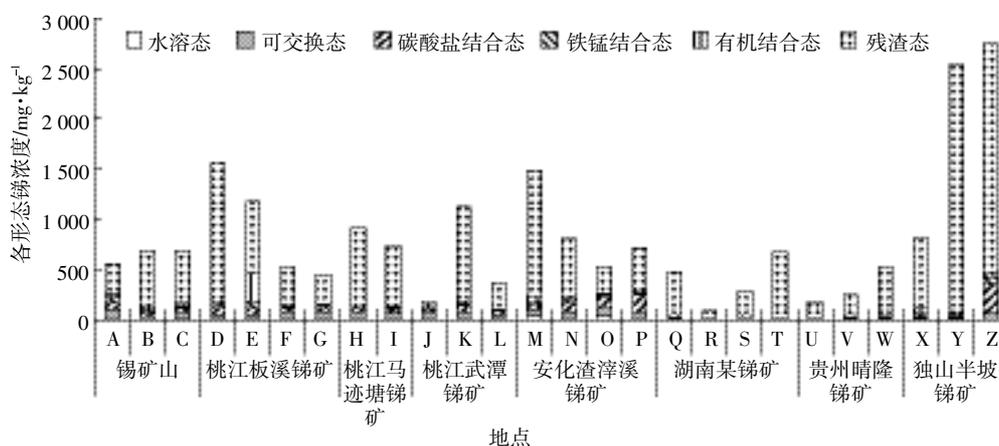


图2 土壤锑形态分布

Figure 2 Distribution of the soil antimony forms

表2 锑和砷在植物中的地上部富集系数^[40]

Table 2 Above-ground enrichment coefficient of antimony and arsenic in plants^[40]

重金属	苕蕨	野生蕨菜	斑茅	芭茅	牛尾蒿	野地瓜	紫萁	乌厥	肾蕨	贯众
锑	2.91	1.85	1.41	14.22	3.93	7.03	2.18	1.29	3.14	1.37
砷	3.71	2.17	11.05	33.84	110.05	5.32	1.74	0.82	2.22	2.2

注:富集系数=植物地上部分对锑(砷)累积量/土壤锑(砷)含量。

Note: Above-ground enrichment coefficient = Antimony(arsenic) content above the ground/Soil antimony(arsenic) content.

山锑冶炼厂周边生长的水稻(*Oryza sativa*)调查研究发现,水稻体内富集了大量锑,含量具体表现为根($225.34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>茎($18.78 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)>叶($5.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),远高于陆地维管植物中锑含量的背景值($0.2\sim 50 \mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),这与相关研究者所开展的室内模拟研究结果相似^[45-47]。在水稻的生长发育过程中,Sb(Ⅲ)和 Sb(V)均会对其产生毒害作用,其中锑会抑制水稻根部生长,影响 α -淀粉酶活性,阻碍抽穗,降低干重转化率以及幼苗生长,且 Sb(Ⅲ)的毒性比 Sb(V)高^[48]。根系作为锑在水稻体内主要的富集部位,在锑胁迫下,水稻能通过改变根系的形态特征来降低对锑的吸收富集,减小其毒性。雷蕾等^[49]研究表明,水稻(丰美占)能通过降低根面积和分叉数来降低对锑的吸收,且水稻对 Sb(Ⅲ)的转运能力强于 Sb(V)。而 Ren 等^[50]研究发现,水稻对 Sb(V)的转运系数最高达到 Sb(Ⅲ)转运系数的 3~4 倍。这一差异也说明了不同品种的水稻对各形态锑的转运可能存在一定的区别。Huang 等^[51]研究也证实在 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)处理下,Yangdao 6、Nongken 57、Jiahua 1 三个品种的水稻对锑表现出不同的富集转运能力。在不同的水稻品种之间,其根表铁膜的形成也会有一定区别,随着锑浓度的增加,根表铁膜的量也随之增加,且根表铁膜含量高的品种其富集锑的能力更强。但铁膜的形成也降低了锑的吸收速率^[52]。

2.2 小麦

小麦作为我国三大谷物之一,几乎全作食用,仅约有 1/6 作为饲料食用。在现有的研究中,主要开展了一些有关小麦对锑吸收转运机理的室内模拟研究。小麦对锑的富集主要集中在根部,不同的小麦品种对 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)的吸收转运能力也表现出一定区别。Shtangeeva 等^[53]研究表明,虽然小麦和黑麦在植物学上比较相似,但在 $75 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 水平下,Sb(Ⅲ)处理下黑麦各部位的锑含量(根、种子、叶分别为 42.50 、 21.40 、 $8.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)低于 Sb(V)处理(分别为 64.00 、 34.00 、 $33.20 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),说明对于黑麦而言,其各部位对 Sb(V)的吸收转运能力强于 Sb(Ⅲ)。而小麦与其相反,Sb(Ⅲ)处理各部位锑含量(68.8 、 13.9 、 $3.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)均高于 Sb(V)处理(32.6 、 10.1 、 $2.16 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),这可能与其体内各元素含量的不同有关。有研究报道,小麦种子在硝酸锑处理下,会降低幼苗根系以及植株体内的钙浓度,且根系中的降低幅度最大,此外根系中钠的含量、植株中铜的浓度以及叶片中钾的浓度均有一定程度降低,影响作物的产量及品质^[54]。

2.3 玉米

玉米作为全世界产量最高的农作物,在我国各地广泛种植。张军营等^[55]对某小型锑冶炼厂周围的环境污染调查分析发现,其周围玉米叶片中的锑含量是大陆植物中相应元素平均含量的 2 220 倍。Pan 等^[56]的室内盆栽模拟实验结果表明,向土壤中加入 $0\sim 1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的酒石酸锑钾时,玉米(*Zea mays*)也能吸收大量锑,当土壤中的锑含量达到 $1\ 000 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,玉米根部和地上部锑的含量分别达到 26.50 、 $68.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,转运系数达 2.58。也有研究认为玉米吸收的锑大部分集中在根部,地上部的含量较根部低,同时分布于叶的含量大于茎和粒^[57]。此外,Tschan 等^[58]比较了锑污染土壤中玉米和向日葵对 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)的吸收富集效果,与水稻和小麦不同的是,玉米对于 Sb(Ⅲ)和 Sb(V)的吸收没有显著差异,且相对于向日葵,玉米对锑的毒性更敏感。主要由于锑胁迫会破坏玉米体内抗氧化酶的活性,随着锑浓度的升高,叶片中过氧化物酶(POD)活性先升高后降低,超氧化物歧化酶(SOD)活性逐渐下降,过氧化氢酶(CAT)活性有所升高,从而使自由基生成与去除的动态平衡受到干扰破坏,影响细胞的代谢和叶绿素的合成等,进而影响玉米的正常生长^[59]。

2.4 其他

除了我国主要的三大粮食作物,相关研究者对矿区周围的蔬菜也做了相应研究。其中 He^[45]对锡矿山调查研究发现,矿区周围生长的萝卜属植物的叶片中锑含量高达 $121.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,超过正常值 2 400 倍。Hammel 等^[60]对废弃矿区中种植的 19 种农作物研究发现,当土壤中的有效锑含量升高至 $90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,菠菜(*Spinacia oleracea*)中锑含量可高达 $399 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,且菠菜叶片中锑含量与土壤中有效锑含量呈显著正相关。廖炜^[61]研究了苋菜、四九黄菜心、菠菜、四季青菜对锑污染的耐受及富集效果,发现随着锑浓度的增加,4 种蔬菜生物量的抑制效果不断增大,污染程度越高,抑制生长的作用越强。4 种蔬菜对于锑的富集效果表现为地下部分大于地上部分,且四九黄菜心对锑的富集浓度最大。

3 锑富集植物及污染修复应用潜力

目前针对土壤锑污染修复的工程案例相对较少,主要集中于室内研究。相关研究者认为植物细胞壁、细胞膜或液泡中存在与重金属等有毒物质结合的“结合座”,如细胞壁果胶中的多聚糖醛酸和纤维素分子

的羧酸、醛基等基团,都能与重金属结合,从而降低重金属向细胞质的运输而解毒。同时,重金属进入植物后会促进植物产生一些酶类以及非酶类抗氧化剂,从而保证植物电子传递过程的顺利进行。此外,根际微生物分泌产生的生长调节剂和保护植物的抗生素、螯合剂等能一定程度上加强植物的抗性能力^[62]。而王晓丽等^[63]则认为,植物对有机镉直接吸收转运并将其转化为三价镉的能力可能是植物对镉富集的重要机制。

由于镉与砷属于同族元素,两者之间具有很多相似的化学性质。砷的超富集植物中很多都属于蕨类植物,如蜈蚣草、大叶井口边草等^[64-65]。而蜈蚣草、大叶井口边草等对镉也具有较好的富集效果。其中李玲等^[66]研究表明,生长于矿渣堆上的蜈蚣草中镉含量达到(119.3±42.9)mg·kg⁻¹,远高于参考区的含量(3.9±1.2)mg·kg⁻¹,对镉表现出较强的耐性。且蜈蚣草吸收的主要是三价镉,吸收的总镉中99%以上主要富集在根部^[67]。白玉凤尾蕨对各形态镉的富集效果与蜈蚣草相似。王晓丽等^[63]研究表明,白玉凤尾蕨对3种形态的镉表现出显著的富集效果,其中地上部和根部镉含量最高分别为816 mg·kg⁻¹和6 065 mg·kg⁻¹,各形态镉的富集效果表现为三价镉>五价镉>甲基镉。在现有的报道中,共报道的镉富集植物主要有构树、蜈蚣草、紫穗槐、白玉凤尾蕨、翅荚木、臭椿、大叶黄杨、狗牙根、芒、苧麻、紫花苜蓿、女贞等^[68]。

针对目前研究较多且富集效果相对较好的2种植物(芒草、苧麻),结合其各自的生长特点,对其进行模拟应用评估。芒类植物具有生长快、产量高、易繁殖等特点,播种后能迅速覆盖地面,对于固土保水、改善周边环境具有一定的促进作用^[69]。从表3可以看出,

芒草的根部(平均含量为264.09 mg·kg⁻¹)以及地上部(平均含量为414.21 mg·kg⁻¹)对镉均有较强的富集能力,且地上部的富集能力大于根部(平均转移系数为1.66)^[70]。按耕层土壤质量2 250 t·hm⁻²,年均10 t·hm⁻²的保守产量计算,每667 m²芒草对镉的年均地上部移除率仅为0.43%左右。但芒草是一种有效的能源物质,相关研究报道,芒草的灰分及K、Cl、S和N含量很低,导致其热值高,且芒草的年均产量可高达30 t·hm⁻²,按照热值17 MJ·kg⁻¹,每年每公顷芒草可生产热值为510 000 MJ。在欧洲,芒草已经被广泛地应用于燃烧发电,2000年利用芒草产生的电能约占欧盟15个国家当年发电量的9%,其中在爱尔兰更是高达37%^[71]。同时,芒草还是乙醇、沼气等能源物质优良的原材料,因此其回收产物具有较高的二次利用价值。

苧麻各部位对镉也具有较好的富集效果,富集部位主要集中在地上部(64.18~744.44 mg·kg⁻¹),平均转移系数为5.85^[72]。库文珍等^[70]研究结果也表明,苧麻对镉的富集系数和转运系数均大于1,满足镉富集植物的基本特征,可作为镉污染修复的先锋植物。按年均12 t·hm⁻²的产量计算,每667 m²苧麻对镉的地上部年均移除率为0.54%。苧麻纤维作为纺织品的工业原料之一,在工业领域内具有较高的经济价值。

综上所述,在目前研究较多的2种镉富集植物中,虽然对镉均有较好的富集效果,但整体移除率不高(移除率基本≤1%),远低于其他重金属的富集植物在土壤污染修复中的移除效果(移除率基本≥10%),实际应用潜力不高,尤其是周期较短的农田土壤修复中^[73]。

表3 富集植物体内镉含量分布及其移除率

Table 3 Distribution and removal rate of antimony in enriched plants

植物	土壤镉含量/ mg·kg ⁻¹	根部镉含量/ mg·kg ⁻¹	地上部镉含量/ mg·kg ⁻¹	地上部 富集系数	转移系数	地上部干物质 生物量/t·hm ⁻²	地上部 移除率/%	来源
芒草	375.3	202.51	413.25	1.10	2.04	10	0.43	库文珍等 ^[70]
	493.2	325.67	415.16	0.84	1.27			
苧麻	83.9	23.20	64.18	0.76	2.77	12	0.54	余玮等 ^[72]
	43.1	9.10	82.25	1.91	9.04			
	157.8	12.40	78.44	0.50	6.33			
	227.1	23.00	84.12	0.37	3.66			
	485.4	99.60	744.44	1.53	7.47			

注:耕层土壤质量以2 250 t·hm⁻²计算;地上部富集系数=地上部镉含量/土壤镉含量;转移系数=地上部镉含量/根部镉含量;地上部移除率=地上部镉含量×地上部干物质生物量/(土壤镉含量×2 250)×100%。

Note:Topsol soil mass calculated in accordance with 2 250 t·hm⁻²; Above-ground enrichment coefficient=Antimony content above the ground/Soil antimony content; Transfer coefficient=Antimony content above the ground/Root antimony content; Above-ground removal rate=Antimony content above the ground×Above-ground dry matter biomass/(Soil antimony content×2 250)×100%.

4 总结和展望

从对锑矿山周边土壤的调查研究可以看出,土壤中的锑具有污染程度高、区域性差异大、扩散范围广等特点。土壤中锑含量的超标对于农作物的生长、品质都有较大影响,且对于人类健康也有潜在危害。根据近几年的研究结果来看,锑污染程度有逐渐变严重的趋势。究其原因主要集中在以下两个方面:(1)相对于常规重金属元素,人们对锑污染的关注度以及防范意识不够。对锑矿的不合理开采及冶炼,使得锑矿山周边土壤的锑超标量远远高于其他重金属;(2)相关修复技术尚不成熟,尤其是在植物修复这一领域。虽然目前已经陆续开展了一些有关锑矿山周边土壤及植物体内锑含量的调研,并针对锑富集植物对锑的吸收、转运以及代谢机理做出了一系列研究,但相对于其他重金属,锑在土壤中残渣态含量较高,在植物中的迁移性较弱,在实际应用过程中,其移除率整体不高,因此在目前的土壤锑污染修复(尤其是农田土壤修复)过程中并没有较好的应用潜力。

建议在今后的土壤锑污染防治中,首先应加大锑污染防治的宣传与管理,强化人们对锑污染危害的认识,减少人为污染的发生;其次,在土壤锑污染修复方面,应进一步加深富集植物对锑吸收和转运机理的研究,探讨在高浓度的锑污染环境中,如何有效提高富集植物对锑的富集转运能力。拓展富集植物对土壤锑污染防治的实际应用。同时,还应进一步加深锑富集植物的筛选工作,为植物修复在锑污染的应用提供理论依据。

参考文献:

- [1] 周建伟, 温冰, 周爱国, 等. 环境中锑污染及锑同位素示踪研究进展[J]. 自然杂志, 2017, 39(2): 120-130.
ZHOU Jian-wei, WEN Bing, ZHOU Ai-guo, et al. Review of antimony pollution and antimony isotopic tracer in the environment[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2017, 39(2): 120-130. (in Chinese)
- [2] 朱静, 郭建阳, 王立英, 等. 锑的环境地球化学研究进展概述[J]. 地球与环境, 2010, 38(1): 109-116.
ZHU Jing, GUO Jian-yang, WANG Li-ying, et al. Overview on research on environmentally geochemical characteristics of antimony[J]. *Earth and Environment*, 2010, 38(1): 109-116. (in Chinese)
- [3] 袁爱萍, 唐艳霞, 黄玉龙, 等. 氢化物-原子荧光法测定锑精矿中痕量砷、汞的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2006, 26(8): 1553-1556.
YUAN Ai-ping, TANG Yan-xia, HUANG Yu-long, et al. Determination of trace arsenic and mercury in antimony concentrates by hydride generation atomic fluorescence spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, 26(8): 1553-1556. (in Chinese)
- [4] Zhao L, Zhang F S, Wang K, et al. Chemical properties of heavy metals in typical hospital waste incinerator ashes in China[J]. *Waste Management*, 2009, 29(3): 1114-1121.
- [5] Wei C, Deng Q, Wu F, et al. Arsenic, antimony, and bismuth uptake and accumulation by plants in an old antimony mine, China[J]. *Biological Trace Element Research*, 2011, 144(1/2/3): 1150-1158.
- [6] Wang X, He M, Xi J, et al. Antimony distribution and mobility in rivers around the world's largest antimony mine of Xikuangshan, Hunan Province, China[J]. *Microchemical Journal*, 2011, 97(1): 4-11.
- [7] 蓝唯源, 宋书巧, 吴浩东, 等. 土壤三价锑污染对甜芥菜生长及品质的影响研究[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(2): 20-23.
LAN Wei-yuan, SONG Shu-qiao, WU Hao-dong, et al. Effect of soil antimony(III) pollution on the growth and quality of sweet mustard[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 32(2): 20-23. (in Chinese)
- [8] 何孟常, 万红艳. 环境中锑的分布、存在形态及毒性和生物有效性[J]. 化学进展, 2004, 16(1): 131-135.
HE Meng-chang, WAN Hong-yan. Distribution, speciation, toxicity and bioavailability of antimony in the environment[J]. *Progress in Chemistry*, 2004, 16(1): 131-135. (in Chinese)
- [9] Xue L, Ren H, Li S, et al. Comparative proteomic analysis in *Miscanthus sinensis*, exposed to antimony stress[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 201(14): 150-160.
- [10] 李航彬, 杨志辉, 袁平夫, 等. 湘中锑矿区土壤重金属锑的污染特征[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(1): 70-74.
LI Hang-bin, YANG Zhi-hui, YUAN Ping-fu, et al. Characteristics of antimony pollution in soils at mining areas in central Hunan Province[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(1): 70-74. (in Chinese)
- [11] 刘碧君, 吴丰昌, 邓秋静, 等. 锡矿山矿区和贵阳市人发中锑、砷和汞的污染特征[J]. 环境科学, 2009, 30(3): 907-912.
LIU Bi-jun, WU Feng-chang, DENG Qiu-jing, et al. Pollution characteristics of antimony, arsenic and mercury in human hair at Xikuangshan antimony mining area and Guiyang City, China[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(3): 907-912. (in Chinese)
- [12] 丁建华, 杨毅恒, 邓凡. 中国锑矿资源潜力及成矿预测[J]. 中国地质, 2013, 40(3): 846-858.
DING Jian-hua, YANG Yi-heng, DENG Fan. Resource potential and metallogenic prognosis of antimony deposits in China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(3): 846-858. (in Chinese)
- [13] 李胜苗, 肖克炎, 罗小亚, 等. 湖南省锑矿成矿远景区划分与资源潜力定量分析[J]. 地质通报, 2015, 34(7): 1386-1390.
LI Sheng-miao, XIAO Ke-yan, LUO Xiao-ya, et al. Metallogenic prospective area division and quantified research on antimony potential in Hunan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 2015, 34(7): 1386-1390. (in Chinese)
- [14] 刘铤锋, 资锋, 曹运江, 等. 湖南锡矿山环境地质问题及其防治对策研究[J]. 能源与环境, 2015(1): 58-59.
LIU Bin-feng, ZI Feng, CAO Yun-jiang, et al. Environmental geological problems and countermeasures of Xikuangshan in Hunan Province

- [J]. *Energy and Environment*, 2015(1):58-59. (in Chinese)
- [15] 何海洲, 杨志强, 郑力. 广西锑矿资源特征及利用现状[J]. 南方国土资源, 2013(10):30-32.
HE Hai-zhou, YANG Zhi-qiang, ZHENG Li. Antimony ore resources in Guangxi and their utilization status[J]. *South Land Resources*, 2013(10):30-32. (in Chinese)
- [16] 姚玲, 黄毅, 杨仕江. 贵州省锑矿资源分布特征及开发利用建议[J]. 中国化工贸易, 2012(5):216-217.
YAO Ling, HUANG Yi, YANG Shi-jiang. Distribution characteristics and realization of antimony mine resources in Guizhou Province[J]. *China Chemical Industry Trade*, 2012(5):216-217. (in Chinese)
- [17] 陈希泉, 罗先熔, 汤磊, 等. 利用多元信息寻找隐伏锑矿——以云南木利锑矿为例[J]. 地质与勘探, 2009, 45(5):595-599.
CHEN Xi-quan, LUO Xian-rong, TANG Lei, et al. Prospecting for blind stibium deposit by multi-information; A case of multistibium deposit in Yunnan[J]. *Geology and Exploration*, 2009, 45(5):595-599. (in Chinese)
- [18] 陈增民, 王立岩. 云南维西某锑矿选矿工艺试验研究[J]. 黄金, 2015(1):56-59.
CHEN Zeng-min, WANG Li-yan. Experimental research on ore-dressing process of one antimony ore in Weixi, Yunnan[J]. *Gold*, 2015(1):56-59. (in Chinese)
- [19] 肖昌浩, 李龚健, 刘欢, 等. 云南巍山笔架山锑矿床辉锑矿稀土微量元素特征及其矿床成因意义[J]. 地质力学学报, 2016, 22(2):310-324.
XIAO Chang-hao, LI Gong-jian, LIU Huan, et al. Characteristics of rare earth and trace elements of stibnite from the Bijiashan antimony deposit, southwest Yunnan: Implications for ore genesis[J]. *Journal of Geomechanics*, 2016, 22(2):310-324. (in Chinese)
- [20] 莫昌琨, 吴丰昌, 符志友, 等. 湖南锡矿山锑矿区农用土壤锑、砷及汞的污染状况初探[J]. 矿物学报, 2013, 33(3):344-350.
MO Chang-li, WU Feng-chang, FU Zhi-you, et al. Antimony, arsenic and mercury pollution in agricultural soil of antimony mine area in Xikuangshan, Hunan[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2013, 33(3):344-350. (in Chinese)
- [21] Wang X Q, He M C, Xie J, et al. Heavy metal pollution of the world largest antimony mine-affected agricultural soils in Hunan Province (China)[J]. *Journal of Soils & Sediments*, 2010, 10(5):827-837.
- [22] 刘灵飞, 龙健, 万洪富, 等. 贵州喀斯特山区锑冶炼厂对农业土壤污染特征的影响及风险评价[J]. 土壤, 2013, 45(6):1036-1047.
LIU Ling-fei, LONG Jian, WAN Hong-fu, et al. Distribution characteristics and risk assessment of heavy metals in agricultural soils in an abandoned antimony smelter in Guizhou Karst areas[J]. *Soils*, 2013, 45(6):1036-1047. (in Chinese)
- [23] 莫昌琨, 李家有, 肖超. 独山锑矿区农用土壤锑污染状况研究[C]. 深圳: 中国环境科学学会学术年会, 2015.
MO Chang-li, LI Jia-you, XIAO Chao. Study on antimony pollution of agricultural soils in Dushan antimony mine[C]. Shenzhen: Chinese Society of Environmental Sciences Academic Annual Meeting, 2015. (in Chinese)
- [24] Reimann C, Matschullat J, Birke M, et al. Antimony in the environment: Lessons from geochemical mapping[J]. *Applied Geochemistry*, 2010, 25(2):175-198.
- [25] 项萌, 张国平, 李玲, 等. 广西铅锑矿冶炼区表层土壤重金属污染的分布规律[J]. 矿物学报, 2011, 31(2):250-255.
XIANG Meng, ZHANG Guo-ping, LI Ling, et al. The characteristics of heavy metals in soil around the Hechi antimony-lead smelter, Guangxi, China[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2011, 31(2):250-255. (in Chinese)
- [26] Krachler M, Zheng J, Koerner R, et al. Increasing atmospheric antimony contamination in the northern hemisphere; Snow and ice evidence from Devon Island, Arctic Canada[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2005, 7(12):1169-1176.
- [27] 钟顺清, 潘彤辉, 王鹏, 等. 基于农产品质量安全矿区农业土壤合理利用的环境补偿探讨——以冷水江锡矿山为例[J]. 安徽农业科学, 2015(9):271-273.
ZHONG Shun-qing, PAN Tong-hui, WANG Peng, et al. Discussion of environmental compensation for rational utilization of agro-soil based on the quality safety of agricultural products in mine area: A case of Lengshuijiang tin mine[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2015(9):271-273. (in Chinese)
- [28] Qi P, Pichler T. Sequential and simultaneous adsorption of Sb(III) and Sb(V) on ferrihydrite; Implications for oxidation and competition[J]. *Chemosphere*, 2016, 145:55.
- [29] Wilson S C, Lockwood P V, Ashley P M, et al. The chemistry and behaviour of antimony in the soil environment with comparisons to arsenic: A critical review[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(5):1169-1181.
- [30] Kentner M, Leinemann M, Schaller K H, et al. External and internal antimony exposure in starter battery production[J]. *International Archives of Occupational & Environmental Health*, 1995, 67(2):119-123.
- [31] Filella M, Belzile N, Chen Y W. Antimony in the environment: A review focused on natural waters: I. Occurrence[J]. *Earth Science Reviews*, 2002, 57(1/2):125-176.
- [32] Gebel T. Arsenic and antimony: Comparative approach on mechanistic toxicology[J]. *Chemico-Biological Interactions*, 1997, 107(3):131-144.
- [33] 童方平, 徐艳平, 龙应忠, 等. 冷水江锑矿区重金属污染林地土壤环境质量评价[J]. 中国农学通报, 2008, 24(12):179-183.
TONG Fang-ping, XU Yan-ping, LONG Ying-zhong, et al. Appraisal for environmental quality of forestry soil polluted by heavy metals in antimony mine of Lengshuijiang City[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(12):179-183. (in Chinese)
- [34] 何孟常, 云影. 锑矿区土壤中锑的形态及生物有效性[J]. 环境化学, 2003, 22(2):126-130.
HE Meng-chang, YUN Ying. The speciation and bioavailability of antimony in the soils near antimony mine area[J]. *Environmental Chemistry*, 2003, 22(2):126-130. (in Chinese)
- [35] 陈秋平, 胥思勤, 安艳玲, 等. 锑矿土壤中 As 和 Sb 的分布、形态及生物可利用性[J]. 环境化学, 2014(8):1301-1306.
CHEN Qiu-ping, XU Si-qin, AN Yan-ling, et al. Distribution, speciation and bio-availability of arsenic(As) and antimony(Sb) in soils of

- antimony mine[J]. *Environmental Chemistry*, 2014(8): 1301–1306. (in Chinese)
- [36] Ning Z, Xiao T, Xiao E. Antimony in the soil–plant system in an Sb mining/smelting area of Southwest China[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(11): 1081.
- [37] 李玲, 张国平, 刘虹, 等. 广西大厂矿区土壤–植物系统中 Sb、As 的迁移转化特征[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2305–2313. LI Ling, ZHANG Guo–ping, LIU Hong, et al. Distribution and mobility of Sb and As in top soils and plants in the Dachang multi–metalliferous mine area, Guangxi, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11): 2305–2313. (in Chinese)
- [38] Domínguez M T, Marañón T, Murillo J M, et al. Trace element accumulation in woody plants of the Guadiamar Valley, SW Spain: A large–scale phytomanagement case study[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(1): 50–59.
- [39] Zhang G P, Liu C Q, Hong L, et al. Mobilisation and transport of arsenic and antimony in the adjacent environment of Yata gold mine, Guizhou Province, China[J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2009, 11(9): 1570.
- [40] 文吉昌, 胥思勤, 陈洁微, 等. 锑矿区土壤与植物中 Sb 和 As 的迁移过程研究[J]. *环境科学与技术*, 2013(7): 18–22. WEN Ji–chang, XU Si–qin, CHEN Jie–wei, et al. Study of Sb and As pollution characteristics in soils and wild plants of antimony mine[J]. *Environment Science and Technology*, 2013(7): 18–22. (in Chinese)
- [41] Hinton T G, Kopp P, Ibrahim S, et al. A comparison of techniques used to estimate the amount of resuspended soil on plant surfaces[J]. *Health Physics*, 1995, 68(4): 523–531.
- [42] Robinson B H, Bischofberger S, Stoll A, et al. Plant uptake of trace elements on a Swiss military shooting range: Uptake pathways and land management implications[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153(3): 668–676.
- [43] Wu F C, Fu Z Y, Liu B J, et al. Health risk associated with dietary co–exposure to high levels of antimony and arsenic in the world’s largest antimony mine area[J]. *Science of the Total Environment*, 2011, 409(18): 3344.
- [44] He M C, Yang J R. Effects of different forms of antimony on rice during the period of germination and growth and antimony concentration in rice tissue[J]. *Science of the Total Environment*, 1999, s243/244(99): 149–155.
- [45] He M C. Distribution and phytoavailability of antimony at an antimony mining and smelting area, Hunan, China[J]. *Environmental Geochemistry & Health*, 2007, 29(3): 209–219.
- [46] 冯人伟, 韦朝阳, 涂书新. 植物对锑的吸收和代谢及其毒性的研究进展[J]. *植物学报*, 2012, 47(3): 302–308. FENG Ren–wei, WEI Chao–yang, TU Shu–xin. Research advances in uptake, metabolism and toxicity of antimony in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2012, 47(3): 302–308. (in Chinese)
- [47] Cai F, Ren J, Tao S, et al. Uptake, translocation and transformation of antimony in rice (*Oryza sativa*, L.) seedlings[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 209: 169–176.
- [48] An Y J, Kim M. Effect of antimony on the microbial growth and the activities of soil enzymes[J]. *Chemosphere*, 2009, 74(5): 654–659.
- [49] 雷蕾, 吴倩桦, 吕海琴, 等. 不同形态锑对水稻生长及根系形态特征的影响研究[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(3): 437–442. LEI Lei, WU Qian–hua, LÜ Hai–qin, et al. Effects of different forms of antimony on the growth and root morphology of rice plant[J]. *Journal of Agro–Environment Science*, 2017, 36(3): 437–442. (in Chinese)
- [50] Ren J H, Ma L Q, Sun H J, et al. Antimony uptake, translocation and speciation in rice plants exposed to antimonite and antimonate[J]. *Science of the Total Environment*, 2014, 475: 83–89.
- [51] Huang Y, Chen Z, Liu W. Influence of iron plaque and cultivars on antimony uptake by and translocation in rice (*Oryza sativa*, L.) seedlings exposed to Sb(III) or Sb(V)[J]. *Plant & Soil*, 2012, 352(1/2): 41–49.
- [52] 任静华, 蔡菲, 罗军, 等. 不同水稻品种根部铁膜的形成及对锑吸收的影响[C]. 贵阳: 全国环境化学大会, 2013. REN Jing–hua, CAI Fei, LUO Jun, et al. Formation of iron membrane and effect of on antimony absorption of different rice varieties[C]. Guiyang: National Environmental Chemistry Conference, 2013. (in Chinese)
- [53] Shtangeeva I, Steinnes E, Lierhagen S. Uptake of different forms of antimony by wheat and rye seedlings[J]. *Environmental Science & Pollution Research International*, 2012, 19(2): 502–509.
- [54] Loganathan P, Vigneswaran S, Kandasamy J, et al. Cadmium sorption and desorption in soils: A Review[J]. *Critical Reviews in Environmental Science & Technology*, 2012, 42(5): 489–533.
- [55] 张军营, 钟秦, 任德贻. 黔西南一小型锑冶炼厂环境污染调查分析[J]. *环境与健康杂志*, 2001, 18(2): 95–99. ZHANG Jun–ying, ZHONG Qin, REN De–yi. Investigation and analysis on environmental pollution due to a small antimony smeltery in southwest Guizhou Province[J]. *Journal of Environment and Health*, 2001, 18(2): 95–99. (in Chinese)
- [56] Pan X, Zhang D, Chen X, et al. Antimony accumulation, growth performance, antioxidant defense system and photosynthesis of *Zea mays*, in response to antimony pollution in soil[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, 215(1/2/3/4): 517–523.
- [57] 文吉昌, 胥思勤, 张乐乐, 等. 锑和砷在土壤和玉米根、茎、叶、粒中的分布研究[J]. *环境科学与技术*, 2016(5): 28–33. WEN Ji–chang, XU Si–qin, ZHANG Le–le, et al. Distribution of Sb and As in soil and roots, stems, leaves and grains of corns[J]. *Environment Science and Technology*, 2016(5): 28–33. (in Chinese)
- [58] Tschan M, Robinson B, Johnson C A, et al. Antimony uptake and toxicity in sunflower and maize growing in Sb(III), and Sb(V), contaminated soil[J]. *Plant & Soil*, 2010, 334(1/2): 235–245.
- [59] Zhang D, Pan X, Mu G, et al. Toxic effects of antimony on photosystem II of *Synechocystis* sp. as probed by in vivo chlorophyll fluorescence[J]. *Journal of Applied Phycology*, 2010, 22(4): 479–488.
- [60] Hammel W, Debus R, Steubing L. Mobility of antimony in soil and its availability to plants[J]. *Chemosphere*, 2000, 41(11): 1791–1798.
- [61] 廖炜. 几种蔬菜对锑污染的耐受、富集及修复研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2008. LIAO Wei. Study on the resistance, accumulation and phytoremediation of several vegetables to pollution of antimony[D]. Changsha: Hunan

- nan Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [62] 杨桂英. 蕨类植物修复重金属污染的应用研究进展[J]. 江苏农业科学, 2016, 45(5):10-14.
YANG Gui-ying. Application and research progress of pteridophytes in the remediation of heavy metal pollution[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2016, 45(5):10-14. (in Chinese)
- [63] 王晓丽, 韦朝阳, 冯人伟, 等. 白玉凤尾蕨与印度芥菜对不同形态镉的富集与转化特征[J]. 环境科学学报, 2014, 34(3):720-727.
WANG Xiao-li, WEI Chao-yang, FENG Ren-wei, et al. The accumulation and transformation of antimony characteristics in *Pteris cretica* and *Brassica Juncea*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(3):720-727. (in Chinese)
- [64] 薛晓磊, 郭华明, 钟振楠. 砷浓度、形态及碳酸氢盐对蜈蚣草吸收砷的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(3):419-425.
XUE Xiao-lei, GUO Hua-ming, ZHONG Zhen-nan. Effects of arsenic concentration, species and bicarbonate on arsenic uptake by hyper accumulator *Pteris vittata*[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(3):419-425. (in Chinese)
- [65] 赵书晗, 王海娟, 王宏斌. 砷胁迫下吡啶乙酸对不同砷富集能力植物光合作用的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(6):1093-1101.
ZHAO Shu-han, WANG Hai-juan, WANG Hong-bin. Effect of indoleacetic acid on photosynthesis of arsenic-stressed plants with different arsenic-accumulating ability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6):1093-1101. (in Chinese)
- [66] 李玲, 张国平, 刘虹, 等. 广西大厂矿区土壤-植物系统中Sb、As的迁移转化特征[J]. 环境科学学报, 2010, 30(11):2305-2313.
LI Ling, ZHANG Guo-ping, LIU Hong, et al. Distribution and mobility of Sb and As in top soils and plants in the Dachang multi-metalliferous mine area, Guangxi, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(11):2305-2313. (in Chinese)
- [67] Tisarum R, Lessl J T, Dong X, et al. Antimony uptake, efflux and speciation in arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata*[J]. *Environmental Pollution*, 2014, 186:110-114.
- [68] 周林, 梁亚楠, 武艳芳, 等. 重金属富集植物研究进展及其园林应用分析[J]. 长江大学学报(自科版), 2017, 14(2):52-58.
ZHOU Lin, LIANG Ya-nan, WU Yan-fang, et al. Research progress and landscape application analysis of accumulators[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*, 2017, 14(2):52-58. (in Chinese)
- [69] 刁英, 余作平, 胡中立. 芒属植物研究进展[J]. 现代农业科技, 2011(2):265-268.
DIAO Ying, YU Zuo-ping, HU Zhong-li. Research advances on miscanthus[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2011(2):265-268. (in Chinese)
- [70] 库文珍, 赵运林, 雷存喜, 等. 镉矿区土壤重金属污染及优势植物对重金属的富集特征[J]. 环境工程学报, 2012, 6(10):3774-3780.
KU Wen-zhen, ZHAO Yun-lin, LEI Cun-xi, et al. Heavy metal pollution in soils and characteristics of heavy metal accumulation of dominant plants in antimony mining area[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(10):3774-3780. (in Chinese)
- [71] Clifton-Brown J C, Stampfl P F, Jones M B. Miscanthus biomass production for energy in Europe and its potential contribution to decreasing fossil fuel carbon emissions[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(4):509-518.
- [72] 余玮, 揭雨成, 邢虎成, 等. 湖南冷水江镉矿区苧麻对重金属的吸收和富集特性[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(1):91-96.
SHE Wei, JIE Yu-cheng, XING Hu-cheng, et al. Uptake and accumulation of heavy metal by ramie(*Boehmeria nivea*) growing on antimony mining area in Lengshuijiang City of Hunan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(1):91-96. (in Chinese)
- [73] 孙楠, 闫广新, 王立发, 等. 北京采矿废弃地植物修复重金属去除率研究[J]. 城市地质, 2016, 11(4):7-14.
SUN Nan, YAN Guang-xin, WANG Li-fa, et al. Research of heavy metal removal rate by phytoremediation of deserted mine in Beijing[J]. *Urban Geology*, 2016, 11(4):7-14. (in Chinese)