

# 3 种草本植物的抗旱性及重金属吸附能力研究

刘胜洪, 王桂莹, 颜燕如, 梁红, 周玲艳

(仲恺农业工程学院 生命科学学院, 广州 510220)

**摘要:**以香根草、马唐草和望江南三种植物为材料,研究干旱胁迫下 3 种草本植物的生理生化特性变化以确认其抗旱性,同时,研究 3 种草本植物的重金属吸附能力以确认其对矿区土壤重金属的修复效果。结果表明:3 种植物的 POD 酶活性、可溶性蛋白含量和叶绿素含量均随胁迫时间延长而增加,SOD 酶活性下降,而可溶性糖则表现出下降—升高—下降趋势,表明 3 种植物可通过协调 SOD 和 POD 活性降低氧化伤害,并通过调节可溶性蛋白和可溶性糖含量来维持植物的生理作用,保持叶绿素含量稳定,使植株正常生长;同时,3 种草本植物对多种重金属均有较强的富集作用,在矿区种植 3 种草本植物能有效降低土壤重金属含量。3 种植物具有良好的抗旱性及重金属富集能力,适合应用于于稀土矿区的生态修复。

**关键词:**稀土矿区;生态修复;抗旱性;重金属富集

**中图分类号:**X506

**文献标识码:**A

**文章编号:**1005-3409(2015)02-0284-06

## Research on Drought Resistance and Uptake Capacity of Heavy Metals of Three Kinds of Herbaceous Plants

LIU Shenghong, WANG Guiying, YAN Yanru, LIANG Hong, ZHOU Lingyan

(College of Life Science, Zhongkai Agriculture and Engineering University, Guangzhou 510225, China)

**Abstract:** Three kinds of herbaceous plants such as *Digitaria sanguinalis*, *Cassia occidentalis*, *Vetiveria zizanioides* were tested, and the physiological and biochemical responses under drought stress were studied so as to confirm their resistance to drought, simultaneously, the heavy metal uptake capacities of plants were studied so as to confirm their restorative effects of heavy metals in rare earth mine area. The results showed that POD activity, soluble protein and chlorophyll contents of three kinds of herbaceous plants increased, SOD activity decreased, however, soluble sugar showed a fall—rise—fall trend, indicating that three kinds of herbaceous plants can reduce oxidative damage by coordinating the SOD and POD activity, maintain their physiological role and the stability of chlorophyll content by regulating the soluble protein and soluble sugar content so that the plants can grow normally. And three kinds of herbaceous plants showed the strong ability to enrich a variety of heavy metals. Heavy metal contents in rare earth mine area can be effectively reduced when three kinds of herbaceous plants are grown. The results indicated that three kinds of herbaceous plants showed the good drought resistance and enrichment capability of heavy metals, and were suitable for ecological restoration in rare earth mine area.

**Keywords:** rare earth mine area; ecological restoration; drought resistance; heavy metal enrichment

稀土被誉为“工业维生素”,在军工、冶金和新型材料等方面运用广泛。近年,随着稀土需求量的日益增大,我国稀土矿山的开采也迅速的发展,由此引发了一系列的环境问题,其中以土壤荒漠化和重金属污

染最为严重<sup>[1-3]</sup>。长期以来,众多学者在矿区修复方面进行了大量的研究,其中植被修复是当前矿区修复的重要研究领域,其具有表现为永久性治理、原位性治理、治理成本低廉等特点<sup>[4-5]</sup>。广东省平远县开采

稀土矿已有十几年的历史,但是由于管理力度不够和没有有效的治理措施,不少矿区水土流失和重金属污染严重,因此利用植物修复矿区土壤具有重要的意义。本文在前期研究<sup>[6-7]</sup>的基础上选用马唐草(*Digitaria sanguinalis*)、望江南(*Cassia occidentalis*)和香根草(*Vetiveria zizanioides*)等 3 种优势植物,研究其在干旱条件下的生理变化、矿区修复后土壤重金属含量及 3 种草本植物各部位重金属含量,探讨三种植物的抗旱能力和对重金属富集能力,为建立人工植物修复系统,筛选修复稀土矿区的植物种类提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 矿区概况

研究区域位于广东省和平县地处东经 114°41′—115°16′、北纬 24°05′—24°42′,海拔 234 m,属中亚热带季风气候区,年均温度 17.9~20.2℃,年均降雨量 1 536~1 845 mm,年日照 1 704 h 以上,日照足,无霜期 267~301 d。下车镇 815 矿区位于和平县东北部,从 20 世纪 80 年代开始开采稀土,于 2005 年结束采矿,由于长期的侵蚀和淋溶,出现土壤贫瘠、砂化和干旱、重金属超标等现象。

### 1.2 试验材料

试验所用材料是从矿区附近获得并在前期的应用基础上筛选出的马唐草、望江南和香根草等 3 种优势植物。

### 1.3 试验方法

1.3.1 干旱处理及生理指标测定 香根草、马唐草和望江南等 3 种植物种植于仲恺农业工程学院钟村农场大棚内,种植基质均为下车镇 815 矿区废弃矿区土,统一水肥管理,待植株整齐、生长健壮时开始抗旱处理。干旱胁迫处理试验前两天浇透水,胁迫时间分别设置为 0,3,6,9,12 d,每日早上 9:00—10:00 选取植物生长健壮叶片,于同一成熟度和位置取材,置于液氮中,迅速带回实验室进行生理指标的测定。

抗旱性相关指标测定参照李合生方法<sup>[8]</sup>,叶片 SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定;叶片 POD 活性采用愈创木酚法测定;土壤含水量采用烘干称量法测定;叶片可溶性糖含量采用蒽酮比色法测定;叶片可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定;叶绿素含量采用丙酮浸提法测定。

1.3.2 重金属含量测定 于下车镇 815 矿区中选取无植物生长区域,随机取土壤样品烘干用于矿区土壤重金属种类及含量测定,后种植三种植物于区域内,试验区土壤中按照每 100 m<sup>2</sup> 施用 200 kg 干鸡粪,以促

进三种植物的生长,于望江南种子成熟后采收三种植物不同部位及种植后土壤烘干用于重金属测定。

土壤重金属含量采用美国国家环保局推荐的 EPA 3052 方法测定<sup>[9]</sup>,植物重金属含量采用美国国家环保局推荐的 EPA 3051 方法测定<sup>[10]</sup>。

### 1.4 数据统计

抗旱性各项测定指标 3 个重复,数据均用平均值表示,并以最小显著差数法(LSD)比较( $p<0.05$ )其显著性。数据统计分析和作图采用 Sigmaplot 11.0 (Systat Software, Inc, California, USA)进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 3 种草本植物的抗旱能力分析

2.1.1 干旱胁迫下 3 种草本植物种植土壤含水量变化 如图 1 所示,干旱胁迫下种植 3 种草本植物的土壤含水量变化趋势一致,均表现为随胁迫时间延长而下降,且在干旱胁迫前期(0~6 d)土壤含水量下降较快,后期土壤含水量下降速度较慢,表明 3 种草本植物所受的干旱胁迫基本一致。

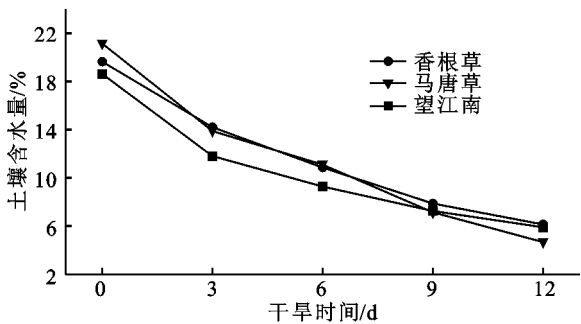


图 1 干旱胁迫下 3 种草本植物种植的土壤含水量变化

2.1.2 干旱胁迫下 3 种草本植物的 SOD 和 POD 酶活性变化 如图 2 所示,干旱胁迫下 3 种草本植物的 SOD 酶活性呈现下降趋势,其中香根草和望江南的酶活性下降趋势较为明显,马唐草 SOD 酶活性较为稳定(图 2A);而 3 种草本植物的 POD 酶活性存在差异,其中香根草 POD 酶活性显著高于其他两种植物,马唐草活性最低,且 3 种草本植物的 POD 酶活性趋势与 SOD 酶活性相反,表现为上升趋势,在胁迫后期(6~12 d)POD 酶活性上升较为明显(图 2B)。

2.1.3 干旱胁迫下 3 种草本植物的可溶性蛋白和可溶性糖含量变化 如图 3 所示,干旱胁迫下 3 种植物的可溶性蛋白在胁迫前期(0~6 d)含量稳定,胁迫后期(9~12 d)显著升高,其中,望江南的可溶性蛋白含量最高,香根草和马唐草含量接近(图 3A)。3 种草本植物的可溶性糖含量在干旱胁迫下表现为前期下降、中期上升和后期下降趋势,且望江南的可溶性糖含量显著高于其他两种草本植物(图 3B)。

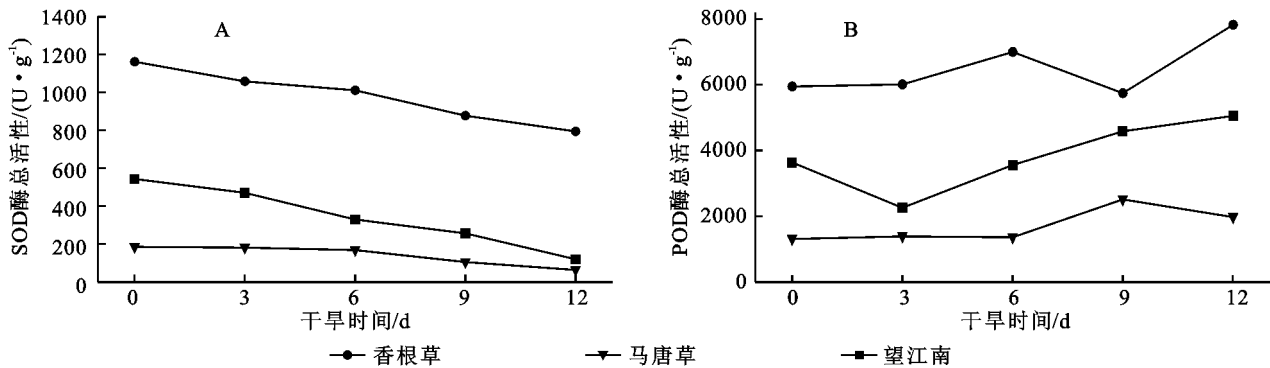


图 2 干旱胁迫下 3 种草本植物的 SOD 和 POD 酶活性变化

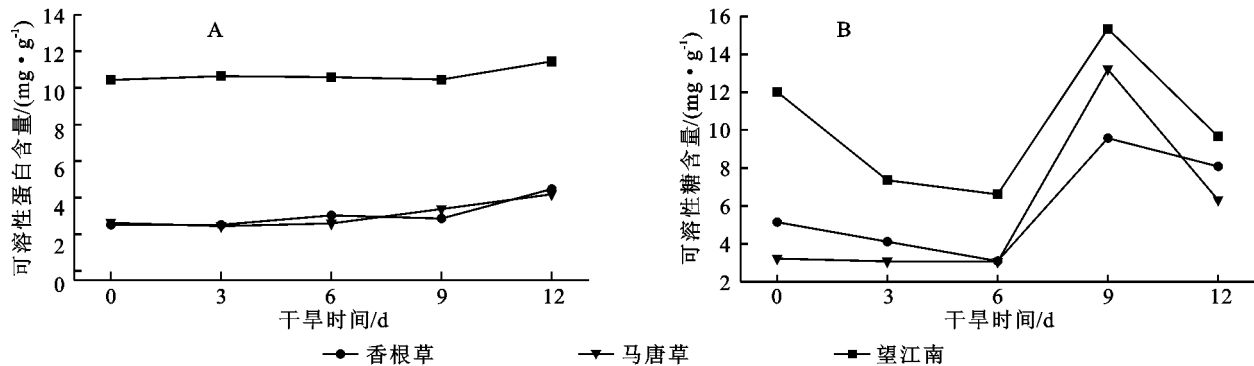


图 3 干旱胁迫下 3 种草本植物的可溶性蛋白和可溶性糖含量变化

2.1.4 干旱胁迫下 3 种草本植物的叶绿素含量变化 如图 4 所示,3 种草本植物的叶绿素含量随干旱胁迫时间延长波动较大,但整体趋势在胁迫后期

略有上升(图 4A)。而叶绿素 a/b 虽然在胁迫期间也是波动,但是其总体比例到胁迫第 12 d 基本不变(图 4B)。

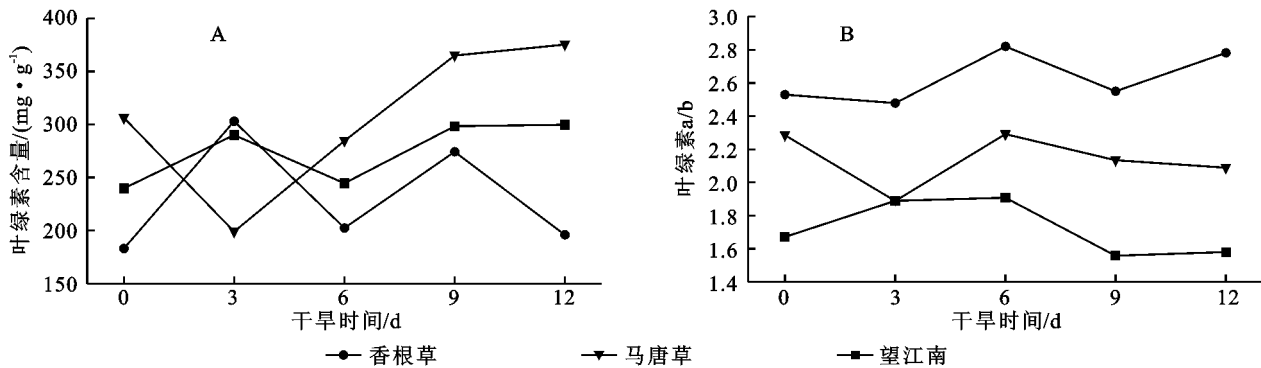


图 4 干旱胁迫下 3 种草本植物的叶绿素含量和叶绿素 a/b 变化

## 2.2 3 种草本植物对重金属的富集能力分析

2.2.1 稀土矿区草本植物修复前后的重金属含量变化 为分析 3 中草本植物对稀土矿区的重金属修复能力,本研究测定了试验矿区修复前和修复后 11 种重金属含量。结果表明,镉、汞和锑等 3 种重金属在修复前后均未检测到,该矿区重金属污染主要为钴、铬、铜、锰、镍、铅、锡和锌这 8 类;同时,通过种植香根草、马唐草和望江南 3 种草本植物可以降低土壤重金属含量,其中,3 种草本植物对钴、锰、镍、铅等重金属的富集能力较强,土壤中的含量下降率约达到 90%,其次是锌,下降率达到 70.58%(表 1)。

2.2.2 重金属富集能力及其分布分析 为比较 3 种草本植物的重金属富集能力以及有利于重金属的回收利用,本研究测定了 3 种草本植物不同部位重金属含量,结果表明,在香根草、马唐草和望江南 3 种草本植物的各个部位均未检出铬和锡两种重金属,说明这 3 种植物不能富集铬和锡,或者是富集能力较弱,富集的含量不足以检测到;同时,3 种草本植物对各种重金属的富集主要集中在根,但是不同植物对不同重金属的富集存在一定差异,香根草富集的铜主要在穗,而马唐草和望江南的铜则主要在根;3 种植物富集锰的量最大,可能与土壤中重金属锰含量最多有

关,其中,以望江南的锰富集能力最强,其叶的锰含量达到 4 997.8  $\mu\text{g/g}$ ,其他部位如根、茎、豆荚和种子也有较高富集量,其次是马唐草,其对锰的富集主要在叶和穗,分别为 1 076.5  $\mu\text{g/g}$  和 942.7  $\mu\text{g/g}$ ,香根草的根、茎、叶、穗也均富集较多的锰,但以茎富集能力最强,为 703.8  $\mu\text{g/g}$ ;3 种草本植物中只有马唐草和望江南的根部能检测到重金属镍;3 种草本植物对重金属铅的富集量主要集中根部,其他部位也有一定分布,其中,望江南的富集能力强于其他两种植物,望江南根的铅含量达到 797.3  $\mu\text{g/g}$ ,是香根草根和马唐草的 4~6 倍;3 种草本植物不同部分对重金属锌的富集能力不同,其中,香根草主要在根和穗,而马唐草主要在茎和穗,望江南则主要在根和叶。总体来说,望江南对多种重金属的富集量均强于其他两种植物(图 5)。

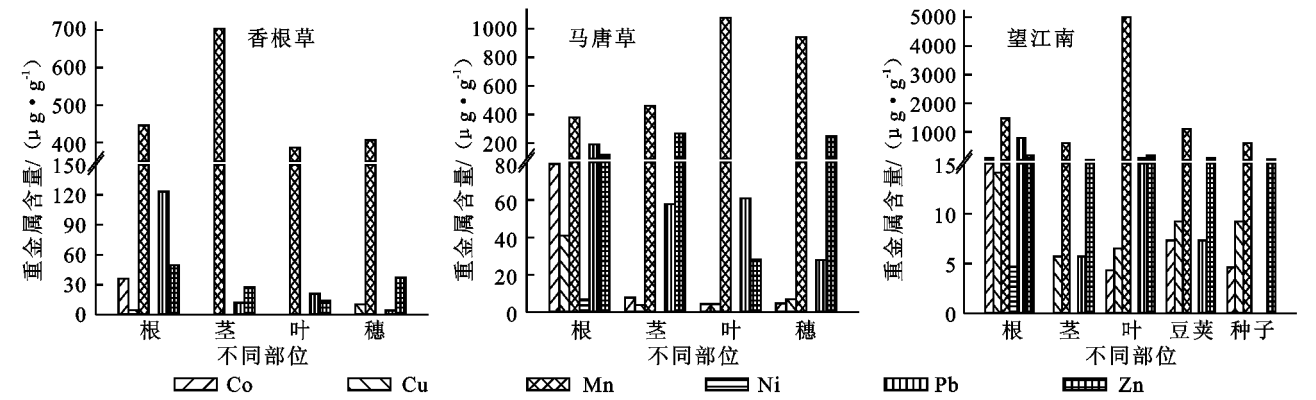


图 5 3 种草本植物不同部位的重金属含量

### 3 讨论与结论

1) 种草本植物具有较强的干旱抗性能力,可应用于稀土矿区植物修复。随着对稀土矿资源的需求量增大,矿区开发带来的土壤荒漠化和重金属超标等问题日益严重,水分是限制植物正常生长最主要非生物因素之一,因此,筛选能大量富集多种重金属的耐旱型植物是植物修复的基础。本研究发现香根草、马唐草和望江南三种植物均具有抗旱性,能在矿区正常生长,且在干旱胁迫下通过 SOD 和 POD 的协同作用降低植物的氧化伤害,并通过提高可溶性蛋白含量和调节可溶性糖含量来维持植物的生理作用,使得叶绿素含量稳定,植株正常生长。

在逆境胁迫下,植物体内活性氧的动态平衡被破坏,活性氧富集,从而导致生物大分子及膜系统的氧化反应,并打破原有的细胞内氧化还原状态平衡,引发植物氧化胁迫伤害<sup>[11]</sup>。植物在逆境胁迫下可动员体内抗氧化防御系统保护细胞免遭氧化伤害,SOD

表 1 稀土矿区修复前后重金属含量变化

重金属种类	修复前/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	修复后/ ( $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )	下降率/%
镉(Cd)	—	—	—
钴(Co)	54.3	5.1	90.61
铬(Cr)	11.6	6.0	48.28
铜(Cu)	27.2	12.8	52.94
汞(Hg)	—	—	—
锰(Mn)	1455.7	80.9	94.44
镍(Ni)	74.5	7.7	89.66
铅(Pb)	532.6	51.1	90.41
锑(Sb)	—	—	—
锡(Sn)	36.5	24.7	32.33
锌(Zn)	182.5	53.7	70.58

注:“—”表示未检测到。

作为植物抗氧化防御系统的第一道防线,其主要是催化超氧阴离子  $\text{O}_2^-$  歧化反应形成  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}_2$ <sup>[11]</sup>。有研究发现枇杷叶片 SOD 酶活性随叶片相对含水量的降低而显著下降,也有研究表明植物体内 SOD 酶活性随干旱胁迫强度的加强和处理时间的延长表现出先升高后下降的趋势<sup>[12-14]</sup>。本试验研究发现,在干旱胁迫下土壤含水量持续下降,而 3 种草本植物的 SOD 酶活性均表现为下降趋势,其中马唐草的 SOD 酶活性在胁迫期间较为稳定,但活性低于另外两种植物(图 2 A)。说明在干旱胁迫下,植物通过 SOD 酶催化分解超氧阴离子,但随着胁迫时间延长,植物 SOD 酶活性有所下降。SOD 酶催化超氧阴离子形成过量的  $\text{H}_2\text{O}_2$ ,植物可以通过 POD 来降解  $\text{H}_2\text{O}_2$  形成  $\text{O}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$ <sup>[15]</sup>。多种植物干旱胁迫下 POD 的活性随时间的延长而上升,通过分解过氧化氢减轻植物的氧化伤害<sup>[16-17]</sup>。本试验的结果与前人研究结果一致,在干旱胁迫下,3 种草本植物的 POD 酶活性随胁迫时间上升,在胁迫后期上升较快(图 2B)。说明干旱胁迫

迫下3种草本植物均可以通过启动 POD 酶,增强其活性,快速分解由于干旱胁迫及 SOD 酶催化形成的过多的  $H_2O_2$  来缓解植物的氧化伤害。

植物在干旱胁迫下,可以通过积累可溶性的有机物和无机离子,提高植物的渗透调节能力,可溶性蛋白和可溶性糖均属于可溶性有机物,在植物渗透调节中起到重要的作用。干旱胁迫下,植物可以通过把体内的不溶性蛋白转变为可溶性蛋白质来增加渗透势,并且使蛋白具有高度的亲水性,能够把足够的水分吸附到细胞内<sup>[18-19]</sup>,有研究表明干旱胁迫可诱导植物合成对干旱更加稳定、活性更高的同工酶来提高植物抗性<sup>[20]</sup>。本研究发现,干旱胁迫下,3种草本植物的可溶性蛋白含量随着胁迫时间延长而增加(图3A),说明3种草本植物都能通过提高体内可溶性蛋白的含量维持植物的渗透势,也可能是通过合成新的同工酶使植物能在干旱环境下正常生长。在整个胁迫期间,望江南的可溶性蛋白含量远高于其他两种植物,这可能与豆科植物本身蛋白质含量高特点有关。可溶性糖的积累可以提高植物的渗透势和抗性,相关研究表明,在干旱胁迫下,植物的可溶性糖呈现在胁迫初期含量上升后下降的趋势<sup>[13,21]</sup>,也有研究表明,香椿叶片可溶性糖含量在整个胁迫过程中呈现低—高一低的变化趋势<sup>[22]</sup>。本试验结果与香椿叶片在更好些可溶性糖含量变化趋势一样,在胁迫前期含量下降,再升高,后下降(图3B),说明3种草本植物可通过动态的调节可溶性糖含量来维持植物体内的渗透平衡,抵抗干旱胁迫。

叶绿素下降是植物衰老的一个指标。有研究表明,在干旱胁迫下,香根草<sup>[23]</sup>、鸭茅幼苗<sup>[24]</sup>、栎树<sup>[25]</sup>等植物叶片的叶绿素随胁迫时间延长而下降,也有研究表明小麦<sup>[26]</sup>的叶绿素在干旱胁迫下随时间延长升高,这可能与植物的抗旱性有关。本试验中发现3种草本植物叶绿素在干旱胁迫下波动较大,但整体趋势略有上升,而叶绿素 a/b 虽然在胁迫期间也是波动,但是其总体比例到胁迫第12 d 基本不变,说明3种草本植物在干旱胁迫下其叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量会随着植物抗旱物质积累有所上升,提高光合作用能力。

2) 种草本植物具有较强的重金属富集能力,可应用于稀土矿区重金属污染治理。植物修复是近十几年来矿区重金属污染治理的一个热门研究领域,其具有表现为永久性治理、原位性治理、治理成本低廉等特点。目前已研究发现多种植物能够富集重金属并且运用于实际的矿区修复中<sup>[27-29]</sup>。本研究发现下

车镇 815 矿区主要存在钴、铬、铜、锰、镍、铅、锡和锌这8类重金属污染。通过测定种植香根草、马唐草和望江南3种草本植物前后土壤的重金属含量发现,种植3种植物后矿区土壤中重金属的含量显著降低,其中钴、锰、镍、铅的降低效果最好,下降率达到90%左右。另外在试验中发现在3种植物中未检测到铬和镉这两种重金属,但在种植这3种植物后矿区土壤中铬和镉含量有所下降,其原因可能是这两种重金属含量较低,其容易受到外界环境影响(如雨水淋溶),也可能是3种植物对这两种重金属的吸收量较低未能检出,但也能降低环境中这两种重金属的含量。试验所用3种植物中望江南对各种重金属的吸收能力最强,其次是马唐草,香根草最差。且不同重金属在不同植物的不同部位分布也不尽相同,其中,根中各种重金属富集较多,这可能与根是直接接触重金属,是重金属的吸收器官有关。许多研究表明植物不同器官对重金属的富集能力不一样,禾本科植物只要表现为地下部大于地上部<sup>[30-31]</sup>,而一些重金属超富集植物其地上部的重金属含量远远大于地下部<sup>[31]</sup>。

综合结果表明,香根草、马唐草和望江南3种草本植物均具有较强的抗旱性,能在矿区正常生长,且3种植物对多种重金属均有较好的富集作用,通过种植3种草本植物能有效降低矿区土壤重金属含量,说明3种草本植物可用于稀土矿区的土壤修复。但植物修复还受矿区环境、土壤肥力和微环境等影响,因此,我们还将进一步研究3种草本植物在矿区植物修复中的复合效果。

#### 参考文献:

- [1] 陈志澄,洪华华. 稀土矿山水系中 Pb, Cd, Cu, Zn 的化学形态及其迁移研究[J]. 中国环境科学, 1994, 14(3): 220-225.
- [2] Gosselin D C, Smith M R, Lepel E A, et al. Rare earth elements in chloride-rich groundwater, Palo Duro Basin, Texas, USA [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1992, 56(4): 1495-1505.
- [3] 刘毅. 稀土开采工艺改进后的水土流失现状和水土保持对策[J]. 水利发展研究, 2002, 2(2): 30-32.
- [4] McGrath S P. Phytoextraction for soil remediation, In: *Plants that Hyperaccumulate Heavy Metals* [M]. Ed. By Brooks, R. R. CAB International, Wallingford, UK, 1998.
- [5] Baker A J M, McGrath S P, Sidoli C M D, et al. The possibility of in situ heavy metal decontamination of polluted soils using crops of metal-accumulating plants[J].

- Resources, Conservation and Recycling, 1994, 11(1): 41-49.
- [6] 刘胜洪,周玲艳,杨妙贤,等.十种耐逆植物在和平县稀土矿区生态修复中的应用[J].天津农业科学,2013,19(7):92-96.
- [7] 李兆龙,梁红,刘文,等.稀土矿区生态修复过程中的土壤改良及细菌群落变化[J].仲恺农业工程学院学报,2013(1):9-13.
- [8] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [9] Environmental Protection Agency(EPA). Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices. 2007, <http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3052.pdf>
- [10] Environmental Protection Agency(EPA). Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. 2007, <http://www.epa.gov/epawaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3051.pdf>
- [11] Scandalios J G. Oxygen Stress and Superoxide Dismutases[J]. Plant Physiol, 1993, 101(1): 7-12.
- [12] 齐伟,张吉旺,王空军,等.干旱胁迫对不同耐旱性玉米杂交种产量和根系生理特性的影响[J].应用生态学报,2010,21(1):48-52.
- [13] 陈文佳,张楠,杭璐璐,等.干旱胁迫与复水过程中遮光对细叶小羽藓的生理生化影响[J].应用生态学报,2013,24(1):57-62.
- [14] 孙强,王丽艳,荆瑞勇,等.不同倍性菘蓝对干旱胁迫的耐受能力及保护性酶的响应机制[J].水土保持研究,2013,20(6):48-53.
- [15] Cakmak I, Marschner H. Magnesium deficiency and high light intensity enhance activities of superoxide dismutase, ascorbate peroxidase, and glutathione reductase in bean leaves[J]. Plant physiology, 1992, 98(4):1222-1227.
- [16] 崔大练,马玉心,石戈,等.紫穗槐幼苗叶片对不同干旱梯度胁迫的生理生态响应[J].水土保持研究,2010,17(2):178-181.
- [17] 刘锦春,钟章成,何跃军.干旱胁迫及复水对喀斯特地区柏木幼苗活性氧清除系统的影响[J].应用生态学报,2011,22(11):2836-2840.
- [18] 李善菊,任小林.植物水分胁迫下功能蛋白的研究进展[J].水土保持研究,2005,12(3):64-69.
- [19] Skriver K, Mundy J. Gene expression in response to abscisic acid and osmotic stress[J]. The Plant Cell, 1990, 2(6):503.
- [20] 张明生,谢波,谈锋,等.甘薯可溶性蛋白,叶绿素及ATP含量变化与品种抗旱性关系的研究[J].中国农业科学,2003,36(1):13-16.
- [21] 尹丽,刘永安,谢财永,等.干旱胁迫与施氮对麻疯树幼苗渗透调节物质积累的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):632-638.
- [22] 张强,杨玉珍,彭方仁.干旱胁迫下不同种源香椿可溶性蛋白的动态变化[J].安徽农业科学,2009,37(1):65-66.
- [23] 刘艳,黄乔乔,马博英,等.高温干旱胁迫下香根草光合特性等生理指标的变化[J].林业科学研究,2006,19(5):638-642.
- [24] 季杨,张新全,彭燕,等.干旱胁迫对鸭茅幼苗根系生长及光合特性的影响[J].应用生态学报,2013,24(10):2763-2769.
- [25] 杨东,万福绪,李盟.水盐胁迫对上海4个防护林树种生长和生理特性的影响[J].水土保持研究,2014,21(1):254-260.
- [26] 马富举,李丹丹,蔡剑,等.干旱胁迫对小麦幼苗根系生长和叶片光合作用的影响[J].应用生态学报,2012,23(3):724-730.
- [27] 周国华,黄怀曾.重金属污染土壤植物修复及进展[J].环境污染治理技术与设备,2002,3(6):33-39.
- [28] 王海峰,赵保卫,徐瑾,等.重金属污染土壤修复技术及其研究进展[J].环境科学与管理,2009,34(11):15-20.
- [29] de Abreu C A, Coscione A R, Pires A M, et al. Phytoremediation of a soil contaminated by heavy metals and boron using castor oil plants and organic matter amendments[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2012, 123:3-7.
- [30] 王友保,张莉,沈章军,等.铜尾矿库区土壤与植物中重金属形态分析[J].应用生态学报,2006,16(12):2418-2422.
- [31] 罗慧,范稚莲,莫良玉,等.广西矿区植物重金属富集特征[J].南方农业学报,2011,42(7):765-767.