

## 铜、镉、铅、锌对4种豆科植物种子萌发的影响

赵玉红<sup>1</sup>, 拉巴曲吉<sup>1</sup>, 罗布<sup>1</sup>, 王向涛<sup>1</sup>, 杨路存<sup>2</sup>, 方江平<sup>1</sup>

(1.西藏大学农牧学院, 西藏林芝 860000; 2.西北农林科技大学林学院, 陕西杨凌 712100)

**摘要:**筛选和研究适合当地气候与土壤条件的重金属耐性植物,是对重金属污染土壤进行植物修复的前提。以蒸馏水为对照,采用培养皿法研究了Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和Zn<sup>2+</sup>单一重金属对4种豆科植物种子萌发和幼苗生长的影响。结果表明,随着Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和Zn<sup>2+</sup>浓度的增大,红豆草(*Onobrychis viciaefolia* Scop.)、白三叶(*Trifolium repens* L.)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)的发芽率、发芽势呈不同程度的降低趋势;但在Cu<sup>2+</sup><300 mg/L处理下,红豆草种子的发芽率并没受到明显抑制,反而有不同程度地促进;在Cd<sup>2+</sup>处理下,25 mg/L浓度对柠条种子萌发促进作用最为显著,柠条种子发芽率与对照相比达到显著性差异水平(p<0.05);Pb<sup>2+</sup>对柠条和胡枝子种子的发芽率种子的发芽表现为“低促高抑”。Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和Zn<sup>2+</sup>对4种植物根系生长均表现出强烈的抑制作用。随着Cu<sup>2+</sup>、Cd<sup>2+</sup>、Pb<sup>2+</sup>和Zn<sup>2+</sup>离子浓度的增大,红豆草、白三叶、柠条和胡枝子种子萌发后形成幼苗的根长和苗长都呈降低趋势,对4种植物均表现为随着浓度增加,抑制作用越明显。

**关键词:** 豆科植物; 种子萌发; 幼苗生长; Cu<sup>2+</sup>; Cd<sup>2+</sup>; Pb<sup>2+</sup>; Zn<sup>2+</sup>

DOI 编码: 10.16590/j.cnki.1001-4705.2017.01.022

中图分类号: S 812.8 文献标志码: A 文章编号: 1001-4705(2017)01-0022-07

## Effects of Heavy Metals Copper, Cadmium, Lead and Zinc on Seed Germination and Seedling Growth of Leguminous Species

ZHAO Yuhong<sup>1</sup>, LA Ba Quji<sup>1</sup>, LUO Bu<sup>1</sup>, WANG Xiangtao<sup>1</sup>, YANG Lucun<sup>2</sup>, FANG Jiangping<sup>1</sup>

(1. Tibet Agricultural and Animal Husbandry College, Nyingchi Tibet 860000, China;

2. Forestry College of North West Agriculture and Forestry University, Yangling Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Screening and study of heavy metal tolerant plants suitable for the local climate and soil condition is the premise of phytoremediation to heavy metal contaminated soil. In this study, the effects of Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> single heavy metals on seed germination and seedling growth of 4 legume species were studied by the method of culture dish. The results show that with the increase of Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> concentration, the germination rate, germination potential of *Onobrychis viciaefolia* Scop., *Trifolium repens* L., *Caragana Korshinskii* Kom. and *Lespedeza bicolor* Turcz. were reduced. The seed germination percentage of *Onobrychis viciaefolia* Scop. under 300 mg/L concentration was significantly higher than control. The seed germination percentage of *Caragana Korshinskii* Kom. under 25 mg/L concentration was significantly higher than control (p<0.05); All the metals showed toxicity to root growth and shoot length of four plant species. The seedling root length and shoot length of four plant species was decreased with the increase of Cu<sup>2+</sup>, Cd<sup>2+</sup>, Pb<sup>2+</sup> and Zn<sup>2+</sup> concentration significantly.

**Key words:** leguminous plant; seed germination; seedling growth; Cu<sup>2+</sup>; Cd<sup>2+</sup>; Pb<sup>2+</sup>; Zn<sup>2+</sup>

收稿日期: 2016-08-29

基金项目: 国家自然科学基金(31160312, 31560142)资助。

作者简介: 赵玉红(1979—), 男, 甘肃武威人; 博士研究生, 副教授, 主要从事高寒草地生态修复研究; E-mail: yuhong19801011@126.com。

通讯作者: 方江平, E-mail: xzfpj@21cn.com。

重金属通过矿产采冶、化工、石油和煤的燃烧、污水排放、农药和化肥施用、火山、大气沉降、岩石风化等途径不断地进入生物圈,已引起了全世界的普遍关注,成为国内外环境污染研究的热点问题之一<sup>[1-2]</sup>。重金属是环境中具有潜在危害的污染物,其在土壤中通常不能被土壤微生物分解,不易随水淋溶,并且具有明显

的生物富集作用,常在土壤环境中积累,甚至某些重金属元素在土壤中还可以转化为毒性更大的物质<sup>[3]</sup>。由于污染物及地域的复杂性,土壤一旦受到污染,其治理不仅见效慢、费用高,而且受到多种因素的制约<sup>[3-4]</sup>。

在中国,部分区域金属矿山的采冶对土地破坏严重,使得矿区及其周边地区的生存环境适宜性降低,生物多样性下降,生态系统脆弱性增加,土壤环境污染加重<sup>[5]</sup>。采用植物修复技术(Phytoremediation)治理和利用被重金属污染的土壤一直是国际上研究的难点和热点<sup>[6-10]</sup>。因此,研究和筛选适于矿区废弃地环境特点的植物成为矿区生态环境恢复的有效途径之一<sup>[10-11]</sup>。从植物中筛选和培育出具重金属耐性的植物也是利用植物修复技术的基础。豆科植物红豆草(*Onobrychis viciaefolia* Scop.)、白三叶(*Trifolium repens* L.)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom.)、胡枝子(*Lespedeza bicolor* Turcz.)是我国主要的栽培牧草或饲用植物,在我国畜牧业中有着极其重要的作用。重金属污染给草业生产带来了极大的危害,不仅抑制种子的发芽和出苗,降低产量和品质,而且造成植物和家畜重金属的积累,并通过食物链的传递放大作用,给整个生态环境及人类健康带来极大危害。为了清楚认识重金属对牧草或饲料作物的毒害作用,有必要进行重金属对植物种子发芽及出苗影响的研究。

基于以上原因,本试验以4种豆科植物为研究对象,研究了不同浓度重金属铜、铅、锌、镉离子对4种豆科植物种子萌发和幼苗生长的影响。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试材料及来源

4种供试植物为红豆草、白三叶、柠条、胡枝子。其中,柠条采集于西藏自治区拉萨市当雄县的拉屋铜矿周边,胡枝子采集于山南扎囊县松卡铜矿周边。所有种子来自于西藏大学农牧学院草业科学实验室。供试金属离子  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ,  $\text{CdCl}_2$  均为分析纯试剂。试验于2015年10月至2016年3月进行。

### 1.2 重金属溶液配制和浓度设置

重金属离子浓度依据中华人民共和国国家土壤环境质量标准(GB 15618—2008)三级土壤环境标准量进行设定<sup>[12]</sup>。4种重金属离子均以溶液形式加入到培养皿中, $\text{Cu}^{2+}$ 浓度分别为100,200,300,400,500 mg/L; $\text{Cd}^{2+}$ 浓度分别为25,50,100,150,200 mg/L; $\text{Pb}^{2+}$ 浓度分别为100,200,300,400,500 mg/L; $\text{Zn}^{2+}$ 浓度分别为100,200,400,600,800 mg/L;设置蒸馏水处理为对照(ck)。

### 1.3 试验方法

本试验按照《牧草种子检验规程》GB/T 2930.11—2008标准进行操作<sup>[13]</sup>。弃去杂质及有虫蚀的种子,选择大小均一旦饱满的种子(由于红豆草种子易发霉,试验前去掉红豆草的果皮)。用0.1%  $\text{KMnO}_4$ 溶液浸泡15 min后用蒸馏水冲洗多次,至红色消失,再用去离子水冲洗3次,用滤纸将种子表面水分吸干。取直径为9 cm的培养皿,培养皿内以双层滤纸为发芽床,每皿均匀放入100粒。将配好的重金属溶液置于培养皿中,至滤纸饱和,每个处理重复3次。采用光照培养箱变温模式培养,模拟植物生长环境,白天(光照时段)10 h,温度30℃,光照为1000 lx;夜晚(黑暗时段)14 h,温度20℃;逐日观察记录发芽种子(以胚芽长度达到种子一半为种子发芽的判断标准),并用电子天平(0.0001 g)称量补充因蒸发散失的水分,使各处理液浓度维持不变。第12天用游标卡尺测量幼苗根长和苗长,计算耐性指数。

耐性指数(%) = 重金属胁迫下植物发芽指标/对照植物相应发芽指标  $\times 100\%$ 。

### 1.4 种子萌发指标的测定

发芽期间每隔24 h记录1次,第4天统计种子发芽势,第7天开始统计种子发芽率。

发芽率(%) = 供试种子的发芽数/供试种子总数  $\times 100\%$ ;

发芽势(%) = 4 d内供试种子的发芽数/供试种子总数  $\times 100\%$ 。

### 1.5 数据统计分析

运用Excel 2007整理数据并制作相关图表,用SPSS 18.0统计软件进行方差分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同重金属浓度对4种豆科植物种子发芽率和发芽势的影响

#### 2.1.1 不同质量浓度 $\text{Cu}^{2+}$ 处理对4种豆科植物种子发芽率及发芽势的影响

从表1可以看出,在不同浓度  $\text{Cu}^{2+}$  胁迫下,柠条和胡枝子的发芽率随着  $\text{Cu}^{2+}$  浓度的增加均表现出降低的趋势,在100 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  浓度下,柠条的发芽率低于对照,差异达到显著水平( $p < 0.05$ ),说明100 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  浓度已经对柠条的发芽产生了抑制作用,在300,400 mg/L和500 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  浓度下,柠条发芽率显著降低并且3者间的差异显著。300 mg/L  $\text{Cu}^{2+}$  浓度条件下,胡枝子的发芽明显受到抑制,发芽率显著低于对照,随着  $\text{Cu}^{2+}$  浓度的增加,胡枝子发芽率显著降低,

当  $Cu^{2+}$  浓度达到 500 mg/L 时,其发芽率为 1.3%,接近致死剂量。 $Cu^{2+}$  对柠条和胡枝子发芽势的影响情况与发芽率变化趋势相似,在低浓度(柠条  $Cu^{2+}$  浓度 <100 mg/L,胡枝子  $Cu^{2+}$  浓度 <200 mg/L)处理时与对照差异不显著,高浓度处理时与对照差异显著。

在  $Cu^{2+}$  <300 mg/L 处理下,红豆草种子的发芽率并没明显受到抑制,反而有不同程度地促进。方差分析表明,在 200 mg/L 和 300 mg/L 处理下红豆草种子发芽率与对照相比,均达到显著性差异水平 ( $p < 0.05$ ),并且在 300 mg/L 时,发芽率最大值达到 91.7%。白三叶在 100 mg/L 和 200 mg/L 处理下,较对照发芽率有所下降,并达到显著水平,而在 300 mg/L 处理下发芽率与对照差异不显著。发芽势变化规律与发芽率变化规律基本相似,红豆草和白三叶都在 300 mg/L 处理下发芽势最大,分别达到 84.3%和81.7%,红豆草较对照有所升高并达到显著差异,白三叶与对照差异不显著。由此可见,红豆草和白三叶种子都能耐受一定剂量的重金属浓度,适度的  $Cu^{2+}$  浓度可促进红豆草和白三叶的发芽。

2.1.2 不同质量浓度  $Cd^{2+}$  处理对 4 种豆科植物种子发芽率及发芽势的影响

在不同浓度  $Cd^{2+}$  处理下,红豆草发芽率和发芽势总体呈现下降趋势(表 2)。在 25 mg/L 和 100 mg/L 浓度下,红豆草发芽率和发芽势略高于对照,但差异未达到显著水平 ( $p > 0.05$ )。在  $Cd^{2+}$  浓度 <100 mg/L 条件下,发芽率和发芽势与对照相比差异不显著 ( $p > 0.05$ )。 $Cd^{2+}$  浓度 >150 mg/L 后发芽率和发芽势较对

照显著下降。白三叶和胡枝子的发芽率随着  $Cd^{2+}$  浓度的增加也表现出降低的趋势(表 2),当  $Cd^{2+}$  浓度达到 50 mg/L 时,白三叶和胡枝子的发芽率显著低于对照,并且发芽势与发芽率变化趋势相似。

在  $Cd^{2+}$  各浓度处理下,柠条种子的发芽率表现出“低促高抑”现象。低浓度处理下,柠条种子的发芽率并没有受到明显的胁迫,反而有不同程度的促进,其中 25 mg/L 浓度处理下的促进作用最为显著。方差分析表明,在 25 mg/L 浓度时,柠条种子发芽率与对照相比达到显著性差异水平 ( $p < 0.05$ ),发芽率达到最大值 (73.3%)。随着  $Cd^{2+}$  浓度的增加,柠条种子发芽势逐渐下降,在  $Cd^{2+}$  浓度为 200 mg/L 时发芽势最低 (53.7%)。杨慧玲等研究发现,柠条种子存在休眠现象,通过浅层沙面可以提高其种子萌发率、出苗率等指标<sup>[14]</sup>。本研究表明,低浓度  $Cd^{2+}$  可以打破柠条种子休眠,高浓度时则表现为明显的抑制作用。

2.1.3 不同质量浓度  $Pb^{2+}$  处理对 4 种豆科植物种子发芽率及发芽势的影响

在不同浓度  $Pb^{2+}$  处理下,红豆草和白三叶的发芽率和发芽势均表现出低浓度时无显著影响,高浓度时呈下降的趋势(表 3)。当  $Pb^{2+}$  浓度达 500 mg/L 时,红豆草发芽率和发芽势均显著低于对照 ( $p < 0.05$ ),400 mg/L 浓度时白三叶发芽率和发芽势均低于对照 ( $p < 0.05$ )。可见,低浓度的  $Pb^{2+}$  并没促进红豆草和白三叶的发芽,高浓度的  $Pb^{2+}$  对红豆草和白三叶的发芽有抑制作用。

$Pb^{2+}$  对柠条和胡枝子的发芽率影响相似,在合适

表 1 不同浓度  $Cu^{2+}$  处理下 4 种豆科植物种子的萌发

$Cu^{2+}$ 浓度 (mg/L)	发芽率 (%)				发芽势 (%)			
	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子
ck	80.0±0.6 a	89.0±2.1 a	65.3±2.9 a	52.6±1.9 a	73.3±4.6 a	80.7±5.6 a	54.7±2.4 a	46.0±3.8 a
100	82.7±3.8 a	85.3±2.9 b	60.7±1.5 b	52.3±1.8 a	78.7±3.0 b	78.3±2.1 b	53.7±3.6 a	48.0±2.1 a
200	88.7±1.8 b	86.0±1.7 b	63.7±2.8 ab	50.0±3.5 a	79.0±4.7 b	79.3±6.8 a	51.3±3.6 b	49.7±3.5 a
300	91.7±4.9 b	88.7±2.0 a	62.0±5.8 b	23.3±3.6 b	84.3±2.5 b	81.7±7.0 a	50.3±3.8 b	18.3±2.0 b
400	75.7±4.8 c	70.0±3.5 c	43.5±5.6 c	5.0±1.5 c	69.3±6.1 c	63.7±3.4 c	34.3±5.9 c	3.7±1.5 c
500	65.0±5.3 d	47.0±2.6 d	23.3±3.9 d	1.3±0.3 d	53.7±3.1 d	38.0±3.2 d	21.0±4.5 d	1.3±0.3 d

注:不同字母为同列 5%水平差异显著。下同。

表 2 不同浓度  $Cd^{2+}$  处理下 4 种豆科植物种子的萌发

$Cd^{2+}$ 浓度 (mg/L)	发芽率 (%)				发芽势 (%)			
	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子
ck	80.0±0.6 a	89.0±2.1 a	65.3±2.9 a	52.6±1.9 a	73.3±4.6 a	80.7±5.6 a	54.7±2.4 a	46.0±3.8 a
25	81.3±2.6 a	88.3±1.1 a	73.3±2.9 b	51.3±6.4 a	75.7±3.0 a	80.0±1.2 a	67.7±5.3 b	44.0±3.6 a
50	80.7±3.3 a	84.0±3.3 b	63.7±8.4 a	49.0±4.9 b	73.0±7.7 a	78.3±3.3 b	56.3±5.7 a	41.3±5.5 b
100	81.0±5.8 a	78.3±2.1 c	62.7±3.4 a	50.2±5.8 ab	74.3±4.7 a	73.3±4.6 c	55.3±6.3 a	43.3±3.1 ab
150	75.7±3.1 b	60.0±1.4 c	56.3±3.4 c	45.0±3.3 c	68.3±3.7 b	51.3±4.0 d	49.0±9.8 c	37.7±3.6 c
200	73.0±6.9 b	39.0±2.0 e	53.7±2.8 c	43.7±5.6 c	63.7±3.1 c	29.0±1.3 e	50.0±3.2 c	36.3±6.3 c

表3 不同浓度  $Pb^{2+}$  处理下4种豆科植物种子的萌发

$Pb^{2+}$ 浓度 (mg/L)	发芽率(%)				发芽势(%)			
	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子
ck	80.0±0.6 a	89.0±2.1 a	65.3±2.9 a	52.6±1.9 a	73.3±4.6 a	80.7±5.6 a	54.7±2.4 a	46.0±3.8 a
100	81.7±3.3 a	88.7±5.1 a	64.7±8.4 a	57.3±6.9 b	73.7±4.7 a	79.7±7.7 a	53.7±8.9 a	50.0±3.4 b
200	83.7±3.9 a	88.7±4.0 a	67.7±3.8 b	59.0±7.9 b	74.0±5.3 a	79.0±5.5 a	55.7±4.7 a	51.7±2.9 b
300	81.7±9.0 a	89.3±8.2 a	69.0±6.0 bc	50.7±7.1 a	73.3±7.5 a	81.3±3.7 a	58.7±2.9 b	45.7±7.1 a
400	82.7±9.7 a	80.7±5.3 b	68.9±8.0 bc	38.0±4.5 c	74.7±5.0 a	73.0±5.9 b	56.3±5.0 a	20.7±3.7 c
500	75.0±6.5 b	80.0±4.7 b	59.7±6.8 d	6.3±8.2 d	63.7±6.6 b	69.7±5.7 c	49.0±8.7 c	4.7±5.3 d

表4 不同浓度  $Zn^{2+}$  处理下4种豆科植物种子的萌发

$Zn^{2+}$ 浓度 (mg/L)	发芽率(%)				发芽势(%)			
	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子	红豆草	白三叶	柠条	胡枝子
ck	80.0±0.6 a	89.0±2.1 a	65.3±2.9 a	52.6±1.9 a	73.3±4.6 a	80.7±5.6 a	54.7±2.4 a	46.0±3.8 a
100	80.7±7.0 a	90.3±2.3 a	66.7±5.7 a	53.3±8.6 a	73.7±4.2 a	81.3±3.5 a	55.0±3.3 a	47.0±1.3 a
200	81.3±4.5 a	92.0±5.1 a	68.7±7.2 b	53.0±2.3 a	73.7±4.6 a	82.3.0±2.0 a	57.7±5.8 b	47.7±2.6 a
300	81.7±5.6 a	89.7±4.9 a	69.0±3.3 bc	52.7±3.3 a	74.3±5.6 a	81.3±9.3 a	58.7±3.6 b	47.7±1.7 a
400	83.3±3.1 a	85.7±5.9 b	74.7±5.1 c	50.0±4.2 b	75.7±3.9 a	78.0±3.0 b	60.3±3.9 c	46.7±3.0 a
500	79.0±7.8 a	74.0±5.8 c	70.7±2.3 b	49.0±1.1 b	70.0±3.3 b	69.7±8.0 c	59.3±6.0 bc	46.0±2.2 a

浓度下起促进作用。不同浓度的  $Pb^{2+}$  对柠条的发芽表现为低浓度无显著影响,合适浓度促进发芽,高浓度抑制发芽。对胡枝子种子的发芽表现为“低促高抑”。在  $Pb^{2+}$  浓度为 300 mg/L 时,柠条发芽率最高,达到 69.0%;  $Pb^{2+}$  浓度为 200 mg/L 时,胡枝子发芽率最高,达到 59.0%。

#### 2.1.4 不同质量浓度 $Zn^{2+}$ 处理对4种豆科植物种子发芽率及发芽势的影响

由表4可知,不同浓度  $Zn^{2+}$  处理对红豆草的发芽率没有明显影响,红豆草分别在 400 mg/L 和 500 mg/L 时发芽率达到最大值(83.3%)和最小值(79.0%),但与对照间差异不显著( $p>0.05$ );在 500 mg/L 处理下,红豆草发芽势较对照显著下降,说明高浓度的  $Zn^{2+}$  影响红豆草的发芽速度。不同浓度  $Zn^{2+}$  处理下,白三叶发芽率和发芽势表现出下降的趋势,并在 400 mg/L 浓度时达到显著水平,说明高浓度( $>400$  mg/L)的  $Zn^{2+}$  对白三叶的发芽起抑制作用。 $Zn^{2+}$  处理对柠条发芽率没有明显的抑制作用,表现出随着  $Zn^{2+}$  浓度的加大发芽率逐渐增大。在 400 mg/L 时发芽率达最大值(74.7%),500 mg/L 时发芽率有所下降,但还是大于对照( $p<0.05$ ),发芽率变化与发芽势变化趋势基本相似,说明  $Zn^{2+}$  浓度小于 500 mg/L 可促进柠条种子的发芽。 $Zn^{2+}$  处理对胡枝子发芽率的影响呈现出低浓度无影响高浓度( $Zn^{2+}$  浓度 $>400$  mg/L)降低的趋势,但  $Zn^{2+}$  处理并没显著影响胡枝子的发芽势。

## 2.2 不同重金属浓度对4种豆科植物苗长与根长的影响

### 2.2.1 重金属铜、镉、铅、锌不同处理对4种豆科植物苗长的影响

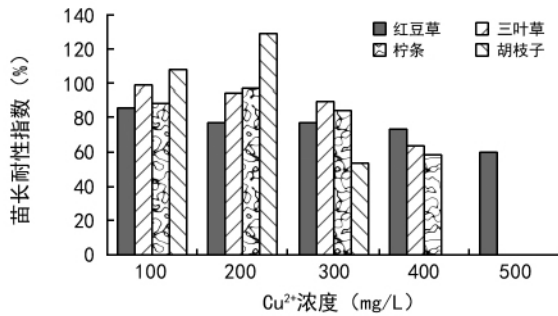
由图1a可知,在低浓度( $Cu^{2+}<200$  mg/L)  $Cu^{2+}$  处理对胡枝子表现为促进作用,当浓度大于 300 mg/L 时表现为明显的抑制作用,其他3种植物则表现为抑制作用。当浓度大于 400 mg/L 时,胡枝子出现“死苗”现象,可见,胡枝子幼苗对  $Cu^{2+}$  较为敏感,低浓度时起促进作用,高浓度的  $Cu^{2+}$  则起到明显的抑制作用。在不同浓度  $Cd^{2+}$  处理下,幼苗苗长耐性指数(TI)均小于 100,4种豆科植物种子萌发后幼苗的长度均呈降低趋势(图1b),且呈现浓度越大抑制作用越强。在  $Cd^{2+}$  浓度为 100 mg/L 时,白三叶幼苗出现不生长现象。 $Pb^{2+}$  对4种植物幼苗的伸长起抑制作用(图1c),但不同浓度的  $Pb^{2+}$  对各植物的抑制效应不同, $Pb^{2+}$  对红豆草、柠条、胡枝子表现为浓度越大,对幼苗伸长的抑制性越强(幼苗苗长耐性指数越小),而对白三叶表现为随着  $Pb^{2+}$  浓度增大对苗长的抑制呈先高后低的趋势。不同浓度  $Zn^{2+}$  处理对白三叶表现为“低促高抑”,对其他3种植物则表现为随着浓度增加,抑制作用越明显(图1d)。

### 2.2.2 重金属铜、镉、铅、锌不同处理对4种豆科植物根长的影响

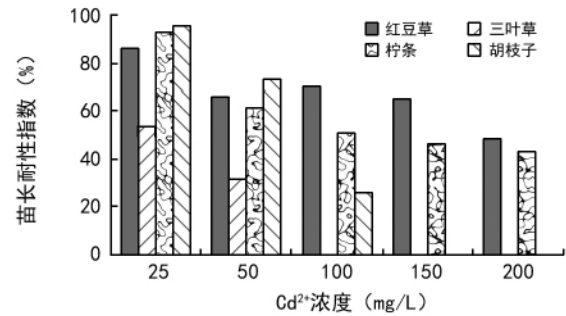
由图2可知, $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$  和  $Zn^{2+}$  处理对幼苗根长的影响显著,随着重金属浓度的增加根长大多

呈现变短趋势。Cu<sup>2+</sup> 浓度为 100 mg/L 和 200 mg/L 时,胡枝子的根长高于对照。在 Cu<sup>2+</sup> 处理下红豆草、白三叶和柠条根长均低于对照,在 400 mg/L 时胡枝子出现“无根”现象,500 mg/L 时白三叶、红豆草出现“无根”现象。可见,低浓度(Cu<sup>2+</sup> < 200 mg/L)Cu<sup>2+</sup>

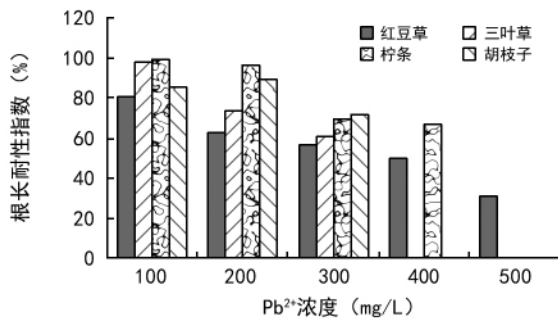
可促进胡枝子根长的伸长,高浓度(Cu<sup>2+</sup> > 200 mg/L)时抑制胡枝子根长的伸长;Cu<sup>2+</sup> 抑制红豆草、白三叶和柠条根长的伸长。Cd<sup>2+</sup> 的毒性较大,Cd<sup>2+</sup> 处理对 4 种豆科植物根伸长的影响基本一致,均以抑制作用为主。从根长耐性指数来看,4 种植物幼苗根长耐性指



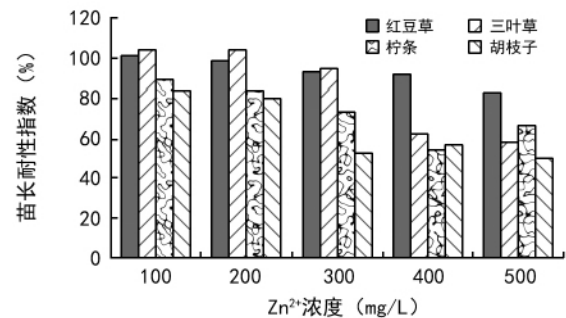
a. 不同浓度Cu<sup>2+</sup>对4种豆科植物苗长的影响



b. 不同浓度Cd<sup>2+</sup>对4种豆科植物苗长的影响

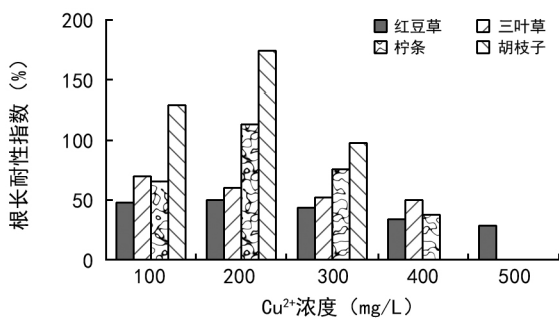


c. 不同浓度Pb<sup>2+</sup>对4种豆科植物根长的影响

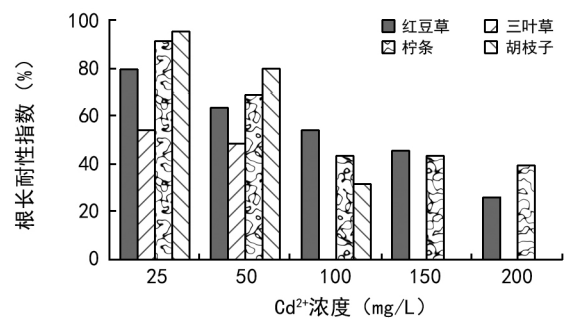


d. 不同浓度Zn<sup>2+</sup>对4种豆科植物苗长的影响

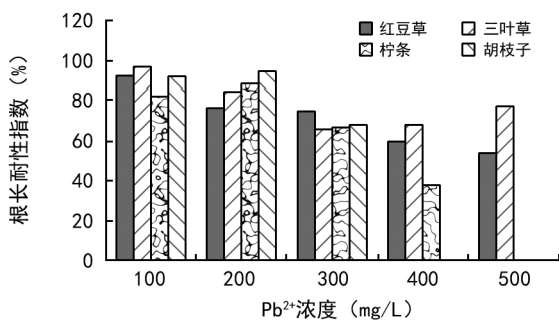
图 1 不同重金属对幼苗苗长的影响



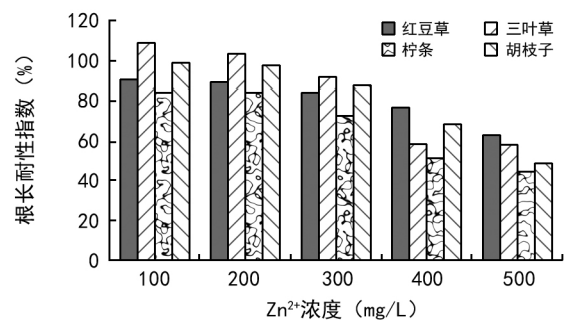
a. 不同浓度Cu<sup>2+</sup>对4种豆科植物根长的影响



b. 不同浓度Cd<sup>2+</sup>对4种豆科植物根长的影响



c. 不同浓度Pb<sup>2+</sup>对4种豆科植物苗长的影响



d. 不同浓度Zn<sup>2+</sup>对4种豆科植物苗长的影响

图 2 不同重金属对幼苗根长的影响

数均小于100,说明根生长受到抑制。 $Pb^{2+}$ 对4种植物根长的影响与 $Cd^{2+}$ 相似,以抑制作用为主。白三叶和胡枝子在 $Pb^{2+}$ 浓度大于400 mg/L时出现“无根苗”,柠条在500 mg/L出现“无根”现象。在 $Zn^{2+}$ 处理下,红豆草、柠条和胡枝子根生长均受到阻碍,但4种植物均没出现明显的“无根”现象。说明红豆草、白三叶、柠条和胡枝子对 $Zn^{2+}$ 具有一定的耐性。白三叶甚至在 $Zn^{2+}$ 浓度为100 mg/L和200 mg/L时根长耐性指数高于100。

### 3 讨论

筛选具有去污能力和高产能力的植物是植物修复土壤重金属污染的关键<sup>[15]</sup>,而植物种子萌发及幼苗生长是植物能否进行有性繁殖的先决条件<sup>[16]</sup>,也是植物能否进行矿区植被恢复和污染土壤修复的前提。

本试验结果表明,在萌发期红豆草、白三叶、柠条和胡枝子均表现出一定的耐重金属能力,重金属离子种类、浓度和草种影响4种豆科植物种子的萌发。低浓度的重金属不会显著降低红豆草等4种植物的发芽率和发芽势,与其他植物<sup>[17-22]</sup>的试验结果一致。本研究结果显示:在 $Cu^{2+}$  < 300 mg/L处理下,红豆草种子的发芽率并没明显受到抑制,反而有不同程度的促进;在 $Cd^{2+}$ 浓度为25 mg/L时,柠条种子发芽率与对照相比达到显著性差异水平( $p < 0.05$ )。原因可能与种子萌发所需要的淀粉酶和蛋白酶的活性有关<sup>[18]</sup>。

在苗期重金属 $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 和 $Zn^{2+}$ 4种离子对4种豆科植物生长的影响主要表现根的伸长上,重金属浓度的增加会使根生理代谢发生明显改变,甚至停滞生长。这与多数研究者的研究结果一致<sup>[4,21-24]</sup>。重金属对根长的影响明显大于对苗长的影响,重金属通过抑制根的生长,进而影响整株植物的生长。当 $Cu^{2+}$ 浓度大于200 mg/L时,对4种植物根长的伸长表现为明显的抑制作用。祝沛平等研究认为,过量的 $Cu^{2+}$ 将抑制脱羧酶的活性,最终造成根部大量 $NH_4^+$ 的积累,植物根部损伤严重,主根伸长受到抑制,根尖出现硬化,生长点细胞分裂受到抑制,根毛数量减少甚至枯死<sup>[25]</sup>。本试验发现, $Cu^{2+}$ 对红豆草、白三叶和柠条的抑制作用较为明显,可能与上述机制有关。 $Cd$ 是危害植物生长发育的有害元素。本试验发现, $Cd^{2+}$ 对4种植物根伸长影响较大且均以抑制作用为主,可能是因为 $Cd^{2+}$ 可以促进根系产生逆境乙烯,而逆境乙烯可以严重伤害细胞,因此 $Cd^{2+}$ 对根的抑制作用更明显<sup>[26]</sup>。 $Pb$ 并不是植物生长发育的必需元素,其效应也是引起活性氧代谢酶系统的破坏作用<sup>[27]</sup>。本研究

中, $Pb^{2+}$ 对4种植物根根长和苗长以抑制作用为主。 $Zn$ 元素是植物生长发育的必需元素,过量的 $Zn$ 离子会伤害植物根系,使植物根系生长受到阻碍,过量的 $Zn$ 元素还使地上部分出现褐色斑点并坏死<sup>[28-30]</sup>。在不同浓度 $Zn^{2+}$ 处理下,红豆草、柠条和胡枝子根生长均受到阻碍,但4种植物均没出现明显的“无根”现象。可见,红豆草、白三叶、柠条和胡枝子对 $Zn^{2+}$ 具有一定的耐性。

### 4 结论

随着 $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 和 $Zn^{2+}$ 浓度的增大,红豆草、白三叶、柠条和胡枝子种子的发芽率、发芽势呈不同程度的降低趋势;但在 $Cu^{2+}$  < 300 mg/L处理下,红豆草种子的发芽率并没明显受到抑制,反而有不同程度的促进;25 mg/L浓度 $Cd^{2+}$ 处理对柠条种子的促进作用最为显著,柠条种子发芽率与对照相比达到显著性差异水平( $p < 0.05$ ); $Pb^{2+}$ 对柠条和胡枝子种子发芽率的发芽表现为“低促高抑”。

随着 $Cu^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 、 $Pb^{2+}$ 和 $Zn^{2+}$ 离子浓度的增大,红豆草、白三叶、柠条和胡枝子种子萌发后形成幼苗的根长和苗长都呈降低趋势,对4种植物均表现为随着浓度增加,抑制作用越明显。

### 参考文献:

- [1] Huang P M., Gobran G. R. Biogeochemistry of Trace Elements in the Rhizosphere[M]. Amsterdam: Elsevier, 2005.
- [2] 黄益宗,郝晓伟,雷鸣,等.重金属污染土壤修复技术及其修复实践[J].农业环境科学学报,2013,32(3):409-417.
- [3] 李永涛,吴启堂.土壤重金属污染治理措施综述[J].热带亚热带土壤科学,1997,6(2):134-139.
- [4] 陈伟,张苗苗,宋阳阳,等.重金属胁迫对4种草坪草种子萌发的影响[J].草地学报,2013,21(3),556-563.
- [5] 张浩平,曹湊贵,李苹,等.藏中矿区重金属污染对土壤微生物学特性的影响[J].农业环境科学,2010,29(4):698-704.
- [6] 孙铁珩,李培军,周启星,等.土壤污染形成机理与修复技术[M].北京:科学出版社,2005.
- [7] 杨胜香,田启建,梁士楚,等.湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征[J].环境科学,2012,33(6):2 038-2 045.
- [8] Memon AR, Schröder P. Implications of metal accumulation mechanisms to phytoremediation[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2009, 16(2): 162-175.
- [9] 邢丹,刘鸿雁,于萍萍,等.黔西北铅锌矿区植物群落分布及其对重金属的迁移特征[J].生态学报,2012,32(3):796-804.
- [10] Shu W S, Ye Z H, Zhang Z H, et al. Restoration of lead and zinc mine tailings in South China[J]. Acta Ecologica Sinica,

- 2003, 23(8): 1 629-1 639.
- [11] 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): 1 196-1 203.
- [12] 高菲菲. Cu、Zn、Cd、Pb 对三种豆科植物生长的影响及其吸附性能的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008: 13-14.
- [13] 国家质量监督检验检疫局. 牧草种子检验规程 GB/T 2930. 11-2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [14] 杨慧玲, 梁振雷, 朱选伟, 等. 沙埋和种子大小对柠条锦鸡儿种子萌发、出苗和幼苗生长的影响[J]. 生态学报, 2012, 32(24): 7 757-7 763.
- [15] 刘大林, 邱伟伟, 马晶晶, 等. 不同苜蓿品种种子萌发时期的耐盐性比较[J]. 草业科学, 2009, 26(9): 163-169.
- [16] 罗珊, 康玉凡, 夏祖灵. 种子萌发及幼苗生长的调节效应研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(2): 28-32.
- [17] 姚伦富, 文科元, 黄锦涛. 重金属镉、铅及其复合污染对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 现代农业科技, 2014, (24): 21-22.
- [18] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 重金属对土壤中小麦种子发芽与根伸长抑制的生态毒性[J]. 应用生态学报, 2002, 13(4): 459-462.
- [19] 韦新东, 黄一格, 王颖. 镉、铅胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2016(2): 71-74.
- [20] 镉对紫花苜蓿种子萌发等生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 152-154.
- [21] 张芬琴, 金自学. 两种豆科作物的种子萌发对  $Cd^{2+}$  处理的不同响应[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(6): 660-663.
- [22] Peralta JR, Gardea-Torresdey JL, Tiemann KJ, et al. Uptake and effect of five heavy metals on seed germination and plant growth in Alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. Bull Environ Contam Toxicol, 2001, 66: 727-734.
- [23] 陈新红, 叶玉秀, 庞闰瑾. 镉、铅及其互作对黄瓜种子发芽及幼根生长的影响[J]. 北方园艺, 2009(5): 13-16.
- [24] 鱼小军, 张健文, 潘涛涛, 等. 铜、镉、铅对 7 种豆科牧草种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草地学报, 2015, 23(4): 793-803.
- [25] 祝沛平, 李凤玉, 梁海曼. 铜对植物器官分化的影响[J]. 植物生理学通讯, 1999, 35(4): 332-336.
- [26] 季玉鸣, 李振国, 吴敦肃, 等. 镉引起小麦苗逆境乙烯的产生及其和镉吸收、分布的关系[J]. 植物生理学报, 1989(2): 159-159.
- [27] JOSEM ARGUELLO, ELIFEREN, MANUEL GONZALEZ-GUERRERO. The structure and function of heavy metal transport P1B-AT [J]. Pases BioMetals, 2007, 966: 233-248.
- [28] BARON-AYALA M, SANDMANN G. Activities of Cu-containing proteins in Cu depleted pea leaves [J]. Physiol Plant, 1998, 72: 801-806.
- [29] 李德明, 郑昕, 张秀娟. 重金属对植物生长发育的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(1): 74-75.
- [30] 陶玲, 任珺, 祝广华, 等. 重金属对植物种子萌发的影响研究进展[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(S): 52-57.

(上接第 21 页)

- [4] 贵州主要地方优良草种选育及种子产业化研究项目组. 贵州主要地方优良草种的选育及种子产业化[J]. 贵州农业科学, 2006, 34(4): 64-66.
- [5] Rohollahi I, Khoshkholghsima N A, Yamada T, et al. Evaluation of seedling emergence and relative DNA content under dry soil conditions of wild *Festuca arundinacea*, populations collected in Iran [J]. Grassland Science, 2015, 61(1): 6-14.
- [6] 刘青松, 陈立波, 李志勇, 等. 不同苜蓿农艺性状研究及 ISSR 分子标记分析[J]. 华北农学报, 2014, 29(3): 109-114.
- [7] 吴则东, 江伟, 马龙彪. 分子标记技术在农作物品种鉴定上的研究进展及未来展望[J]. 中国农学通报, 2015, 31(33): 172-176.
- [8] Mei Z, Zhang C, Khan M A, et al. Efficiency of improved RAPD and ISSR markers in assessing genetic diversity and relationships in *Angelica sinensis*, (Oliv.) Diels varieties of China [J]. Electronic Journal of Biotechnology, 2015, 18(2): 96-102.
- [9] 孟丽娟, 赵桂琴. 红三叶 ISSR-PCR 反应体系的建立与优化 [J]. 草原与草坪, 2015, 35(2): 21-26.
- [10] 胡凤荣, 胡月苗, 王斐, 等. 利用 ISSR 分子标记分析 29 个风信子品种的遗传多样性[J]. 分子植物育种, 2015, 13(2): 379-385.
- [11] 杨春燕, 钟理, 李辰琼, 等. 高羊茅遗传育种研究进展[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(6): 13-16.
- [12] Funk C R, Wiley W K, King D E, et al. Registration of Mustang tall fescue [J]. Crop Sci, 1984, 24: 1 211.
- [13] 马啸, 张新全, 周永红, 等. 高羊茅分子标记应用进展[J]. 草业学报, 2006, 15(2): 1-8.
- [14] 侯渝嘉, 何桥, 梁国鲁, 等. 茶树杂交后代的 ISSR 分析[J]. 西南农业大学学报(自然科学版), 2006, 28(2): 267-270.
- [15] 吴学尉, 崔光芬, 吴丽芳, 等. 百合杂交后代 ISSR 鉴定[J]. 园艺学报, 2009, 36(5): 749-754.
- [16] 苗美美, 赵明明, 刘绪明, 等. 百合 (*Lilium* spp.) 杂交后代 ISSR 分析亲缘关系[J]. 分子植物育种, 2016, 14(2): 437-441.