

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2018.02.002

## 重金属镉对4种林木种子萌发及幼苗生长的影响

罗艳<sup>1</sup>,李裕冬<sup>1</sup>,罗晓波<sup>1,2</sup>,王琼瑶<sup>1</sup>,姚民<sup>3</sup>

(1.四川省自然资源科学研究院,四川成都 610024;2.峨眉山生物资源实验站,四川峨眉山 614201;  
3.四川大学生命科学学院,四川成都 610064)

**摘要:**为筛选适宜的乡土植物在四川境内开展镉污染土壤修复,选择4种乡土木本植物(云南松 *Pinus yunnanensis*、栎木 *Alnus cremastogyne*、红椿 *Toona ciliata*、五小叶槭 *Acer pentaphyllum*)的种子,分别设置不同浓度梯度,研究重金属Cd胁迫对植物种子萌发及幼苗生长的影响。结果表明,就发芽率而言,镉对云南松的萌发没有明显影响,对栎木种子的萌发具有抑制作用,对红椿和五小叶槭的萌发具有一定的促进作用。就幼苗生长而言,镉处理对云南松的苗长和根长均具有促进作用;对栎木和五小叶槭总体表现为促进苗长,抑制根长;对红椿表现为抑制苗长,促进根长。耐受性综合评价结果显示,这4种植物镉耐受性强弱为红椿>云南松>五小叶槭>栎木。

**关键词:**镉;林木;种子萌发;生长;胁迫

中图分类号:Q14 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2018)02-0007-06

## Effects of Heavy Metal Cadmium (Cd) Stress on Seed Germination and Seedling Growth of 4 Species of Forest Trees

LUO Yan<sup>1</sup> LI Yu-dong<sup>1</sup> LUO Xiao-bo<sup>1</sup> WANG Qiong-yao<sup>1</sup> YAO Min<sup>2</sup>

(1. Sichuan Provincial Academy of Natural Resource Sciences, Chengdu 610024, Sichuan, China;  
2. Emei Mountain Resource Experimental Station, Mount Emei 614201, China;  
3. College of Life Sciences Sichuan University, Chengdu 610064, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to select suitable local plants for remediation of cadmium contaminated soil in Sichuan, seeds of 4 kinds of native woody plants (*Pinus yunnanensis*, *Alnus cremastogyne*, *Toona ciliata* and *Acer pentaphyllum*) were cultivated in cadmium (Cd) solutions with a series of concentrations to investigate the effects of heavy metals on seed germination and seedling growth. The results showed that Cd had no obvious effect on seed germination of *P. yunnanensis*, but inhibited that of *A. cremastogyne* and increased that of *T. ciliata* and *A. pentaphyllum*. Cd promoted the root and shoot growth of *P. yunnanensis* during seedling growth. For other species, Cd promoted shoot growth and inhibited root growth of *A. cremastogyne* and *A. pentaphyllum*, but inhibited the shoot growth and promoted root growth of *T. ciliata*. Tolerance evaluation results showed that the Cd tolerance of the 4 species in descending sequence were *T. ciliata*, *P. yunnanensis*, *A. pentaphyllum* and *A. cremastogyne*.

**Key words:** Cadmium, Forest trees, Seed germination, Growth, Stress

重金属污染是造成土壤污染的一个重要因素,其中以镉(Cd)污染最为突出。重金属镉不仅使土

收稿日期:2017-12-18

基金项目:四川省基本科研业务费项目“重金属镉污染土壤的植物修复研究(2016YSKY0014)”;四川省科技计划项目“攀西矿区植物与微生物协同修复土壤关键技术研究(2017SZ0087)”;四川省科技计划项目(2014NZ0109),五小叶槭种质资源抢救性收集、保存、繁育研究。

作者简介:罗艳(1979-),女,湖南黔阳人,副研究员,研究方向为生态系统生态学。

壤肥力退化,农作物产量和品质下降,水环境恶化,而且可以通过食物链进入人体,直接影响和危及人类的健康<sup>[1]</sup>。金属形态的镉一旦进入土壤环境极难被微生物降解,但以  $Cd^{2+}$  及其络合物形式存在时,极易被植物吸收并积累<sup>[2]</sup>。1983年,美国科学家 Chaney 首次提出了利用能够富集重金属的植物来清除土壤重金属污染的设想<sup>[3]</sup>。利用植物,特别是利用生长迅速、生物量大、根系发达的木本植物来修复重金属的技术,其由于具有廉价、环保等优点,相关研究也成了土壤重金属修复的热点之一<sup>[4~12]</sup>。

根据《四川省土壤污染状况调查公报》(2014),镉是四川省土壤污染的主要特征污染物,以攀西地区、成都平原区和川南地区等部分区域为较重污染区,尤其是在矿藏资源丰富的地区,土壤镉含量偏高。同时,近年来工业的迅速发展、农业化肥施用以及矿山开发等人为活动,也使土壤中镉污染愈见明显。目前四川省土壤镉污染以轻微为主(占污染区域的 86.8%,本数据根据《四川省土壤污染状况调查公报》(2014)估算而得。具体计算方法为:镉轻微污染点位比例/镉点位超标率 $\times 100\%$ )。但考虑到镉污染的严重危害,开展相关的研究和治理工作已迫在眉睫。四川省地形复杂、山地较多,种植草本

植物开展镉污染土壤修复,存在着后期处理困难、二次污染风险较高的问题,若能够筛选出合适的速生木本植物开展土壤修复,将会取得更明显的生态和经济效益。目前,国内外对于重金属镉对植物的毒害以及植物耐受性的研究主要涉及水生植物、农作物、草坪草和一些豆科牧草,而对于木本植物的研究相对较少,主要集中于杨树、柳树等<sup>[5,9]</sup>。在重金属镉修复方面,四川乡土树种的应用研究也相对较少<sup>[4,13]</sup>。因此,为筛选适宜的乡土植物在四川境内开展镉污染土壤修复,选取 4 种生命力强、养护成本低、具有一定景观效果、生长迅速的木本植物,进行镉胁迫种子发芽及幼苗生长实验,比较这 4 种植物对重金属镉耐受性的强弱,为人们利用木本植物修复、治理重金属污染的土壤提供可行性理论以及可供参考选择的树种。

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

研究实验于 2017 年在成都进行,种子来自野外采集(见表 1)。

表 1 实验用 4 种林木种子概况

植物名	拉丁名	科属	来源	存放方式	存放时间	特点及分布
云南松	<i>Pinus yunnanensis</i>	松科松属	网购	放于室内阴凉干燥处	不足 1 a	西南地区的荒山绿化造林先锋树种,分布于海拔 600 m~3 100 m 地带
桉木	<i>Alnus cremastogyne</i>	桦木科桉木属	野外采集	放于室内阴凉干燥处	不足 1 a	对土壤适应性强,四川各地普遍分布,生于海拔 500 m~3 000 m 的山坡或岸边的林中
红椿	<i>Toona ciliata</i>	楝科香椿属	野外采集	放于室内阴凉干燥处	不足 1 a	国家 II 级重点保护野生植物,乡土树种,珍贵用材树种,多生于低海拔沟谷林中或山坡疏林中。
五小叶槭	<i>Acer pentaphyllum</i>	槭树科槭属	野外采集	放于室内阴凉干燥处	不足 1 a	著名观赏树种,产四川西部,生于海拔 2 300 m~2 900 m 的疏林中

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 种子预处理

五小叶槭去掉果翅,提前 4℃ 冷藏处理一周。一周后,分别用 1% 次氯酸钠对云南松、桉木、红椿和五小叶槭的种子进行消毒,消毒 20 min,超纯水清洗 3 次,然后晾干。

#### 1.2.2 萌发实验

精选饱满种子置于装有灭菌蛭石的大小规格一致的培养容器中,每个容器均匀放入 50 粒,每处理设 3 组平行,分别加入  $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$  的氯化镉溶液,该溶液用分析纯  $CdCl_2\cdot 22.5H_2O$  配制,以等量蒸馏

水培养作对照。然后将培养容器置于光照培养箱(光周期 12 h/12 h, 20℃/18℃(光/暗比),湿度 80%)中,每 24 h 更换相应浓度处理液 1 次,对照组更换蒸馏水。以子叶顶出土壤记为萌发,萌发过程中每 24h 统计 1 次,记录种子萌发数,直至对照种子发芽基本不再变化为止。实验持续时间为:2017 年 8 月 23 日到 2017 年 10 月 3 日。

#### 1.2.3 幼苗培育实验

将萌发的幼苗保留在原培养容器中继续在光照培养箱(光周期 12 h/12 h, 20℃/18℃(光/暗比),湿度 80%)培养,按萌发实验处理的浓度梯度,每周一次给幼苗浇灌不同的溶液。实验持续时间为 2017 年 10 月 3 日到 2017 年 11 月 29 日。

### 1.2.4 测试指标与分析方法

各指标测定参照《种子生理研究》<sup>[14]</sup>,相关计算公式如下。实验结束后将幼苗取出,分别测量幼苗的苗高和根长,数据取各平行组均值。

$$\text{发芽率} = (\text{供试种子的发芽数}/50) \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{开始萌发时间} = \text{种子从处理到开始萌发所需时间} \quad (2)$$

$$\text{发芽势} = (\text{开始萌发 20d 后萌发种子总数}/50) \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{耐性指数 (TI)} = (\text{重金属胁迫下植物发芽指标}/\text{对照组植物相应发芽指标}) \times 100\% \quad (4)$$

$$\text{发芽指数} = (Gt \text{ 为第 } t \text{ 天的发芽数}, Dt \text{ 为相应的发芽天数}) \quad (5)$$

### 1.2.5 耐性综合评价

应用隶属函数法对 4 种林木种子萌发期镉耐受性进行综合评价。先按公式(6)分别计算每份材料相对发芽率、相对发芽指数、相对根长、相对苗长在不同镉浓度下的具体隶属函数值<sup>[15]</sup>。

$$X(\mu) = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (6)$$

式中,  $X$  为参试植物某 - 指标的测定值,  $X_{\max}$  和  $X_{\min}$  分别为所有材料中该指标的最大值和最小值,然后把每一指标在不同镉浓度下的隶属值累加求平均值,最后把每份材料各项指标隶属函数值累加求平均值,根据各材料平均隶属函数值大小确定其萌发期对镉的耐受性,隶属函数值越大,耐受性越强。

### 1.2.6 数据处理及方差分析

实验数据结果采用 SPSS13.0 软件进行统计,用最小显著差法(LSD 法)进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉对种子萌发的影响

不同的镉浓度对不同种类的林木种子的发芽率具有不同影响(表 2)。对云南松而言,发芽率最高的是镉浓度  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  组,最低的是  $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  组;总体上镉浓度变化对云南松种子的发芽率未造成显著影响,各处理浓度下的发芽率均无显著差异( $p > 0.05$ )。对桉木而言,发芽率最高的是对照组,总体上镉对桉木种子的萌发具有抑制作用,随着镉浓度的增加,其发芽率有所降低( $p > 0.05$ ),在浓度  $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时其发芽率显著降低( $p < 0.05$ )。红椿和五小叶槭的发芽率并没有受到胁迫影响,反而有不同程度地促进,其中红椿在  $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时发芽率最高(29.3%),五小叶槭在  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时发芽率最高(15.3%)。总体而言,镉对云南松的萌发没有明显影响,对桉木种子的萌发具有抑制作用,对红椿和五小叶槭的萌发具有一定的促进作用。

镉对 4 种林木种子的起始萌发时间总体影响不大,除云南松外,处理组的起始萌发时间与对照组均没有显著差异;云南松仅在浓度为  $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  时,其起始萌发时间显著长于对照组( $p < 0.05$ )(见表 2)。发芽势和发芽指数方面,与对照组相比,4 种林木的发芽势均无显著差异,仅五小叶槭在  $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理组显著大于  $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处和  $75 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  处理组。

表 2 不同浓度镉胁迫下对 4 种林木种子萌发的影响

树种	萌发情况	镉溶液浓度( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )					
		0	5	25	50	75	100
云南松	发芽率(%)	74.0 ± 2.0 <sup>a</sup>	71.3 ± 7.0 <sup>a</sup>	70.0 ± 6.0 <sup>a</sup>	77.3 ± 4.2 <sup>a</sup>	65.3 ± 5.8 <sup>a</sup>	74.7 ± 3.1 <sup>a</sup>
	起始萌发时间(d)	13.7 ± 0.6 <sup>b</sup>	14.0 ± 1.0 <sup>b</sup>	15.7 ± 1.2 <sup>ab</sup>	14.3 ± 0.6 <sup>ab</sup>	16.0 ± 1.7 <sup>a</sup>	14.3 ± 0.6 <sup>ab</sup>
	发芽势(%)	39.3 ± 11.0 <sup>a</sup>	40.7 ± 8.1 <sup>a</sup>	28.7 ± 2.3 <sup>a</sup>	43.3 ± 11.0 <sup>a</sup>	28.0 ± 12.5 <sup>a</sup>	40.0 ± 11.1 <sup>a</sup>
	发芽指数	17.3 ± 1.3 <sup>a</sup>	16.4 ± 1.2 <sup>ab</sup>	14.1 ± 1.3 <sup>b</sup>	17.0 ± 2.3 <sup>a</sup>	14.0 ± 1.8 <sup>b</sup>	16.3 ± 1.5 <sup>ab</sup>
桉木	发芽率	50.0 ± 11.1 <sup>a</sup>	45.3 ± 5.0 <sup>abc</sup>	35.3 ± 10.3 <sup>abc</sup>	48.0 ± 13.1 <sup>ab</sup>	34.0 ± 6.9 <sup>bc</sup>	30.7 ± 3.1 <sup>c</sup>
	起始萌发时间(d)	10.3 ± 0.6 <sup>a</sup>	10.3 ± 0.6 <sup>a</sup>	10.7 ± 0.6 <sup>a</sup>	10.3 ± 0.6 <sup>a</sup>	10.0 ± 0.0 <sup>a</sup>	10.3 ± 0.6 <sup>a</sup>
	发芽势(%)	42.7 ± 11.7 <sup>a</sup>	37.3 ± 8.3 <sup>a</sup>	26.7 ± 7.0 <sup>a</sup>	40.0 ± 13.1 <sup>a</sup>	30.7 ± 6.1 <sup>a</sup>	28.7 ± 6.4 <sup>a</sup>
	发芽指数	17.5 ± 3.5 <sup>a</sup>	16.3 ± 2.8 <sup>a</sup>	11.8 ± 3.4 <sup>a</sup>	16.8 ± 5.6 <sup>a</sup>	12.5 ± 2.2 <sup>a</sup>	11.6 ± 2.5 <sup>a</sup>
红椿	发芽率	17.3 ± 3.1 <sup>ab</sup>	20.6 ± 14.2 <sup>ab</sup>	16.0 ± 5.3 <sup>b</sup>	29.3 ± 5.0 <sup>a</sup>	14.0 ± 6.9 <sup>b</sup>	15.3 ± 3.1 <sup>b</sup>
	起始萌发时间(d)	16.3 ± 1.2 <sup>a</sup>	16.0 ± 1.7 <sup>a</sup>	17.0 ± 2.0 <sup>a</sup>	15.3 ± 1.5 <sup>a</sup>	16.0 ± 2.6 <sup>a</sup>	17.3 ± 2.9 <sup>a</sup>
	发芽势(%)	4.7 ± 2.3 <sup>a</sup>	7.3 ± 7.6 <sup>a</sup>	4.7 ± 2.3 <sup>a</sup>	7.3 ± 1.2 <sup>a</sup>	4.7 ± 2.3 <sup>a</sup>	8.7 ± 7.0 <sup>a</sup>
	发芽指数	3.3 ± 0.9 <sup>a</sup>	4.1 ± 3.5 <sup>a</sup>	3.2 ± 1.1 <sup>a</sup>	5.7 ± 1.0 <sup>a</sup>	2.8 ± 1.6 <sup>a</sup>	3.6 ± 1.6 <sup>a</sup>
五小叶槭	发芽率	8.0 ± 3.5 <sup>b</sup>	10.6 ± 1.2 <sup>ab</sup>	15.3 ± 4.2 <sup>a</sup>	8.7 ± 5.0 <sup>b</sup>	9.3 ± 4.2 <sup>ab</sup>	8.7 ± 1.2 <sup>b</sup>
	起始萌发时间(d)	17.7 ± 3.2 <sup>a</sup>	18.0 ± 2.6 <sup>a</sup>	18.3 ± 1.2 <sup>a</sup>	18.3 ± 1.2 <sup>a</sup>	19.7 ± 1.2 <sup>a</sup>	19.3 ± 0.6 <sup>a</sup>
	发芽势(%)	3.3 ± 3.1 <sup>ab</sup>	2.0 ± 2.0 <sup>b</sup>	6.7 ± 2.3 <sup>a</sup>	2.7 ± 1.2 <sup>ab</sup>	2.0 ± 2.0 <sup>b</sup>	2.7 ± 3.1 <sup>ab</sup>
	发芽指数	2.0 ± 1.0 <sup>ab</sup>	2.0 ± 0.2 <sup>ab</sup>	3.2 ± 0.8 <sup>a</sup>	1.6 ± 0.9 <sup>b</sup>	1.7 ± 0.9 <sup>b</sup>	1.7 ± 0.4 <sup>b</sup>

注:表中数据为平均值 ± 标准差, N = 3;每一元素相同行同一字母代表无显著差异( $p > 0.05$ ),不同字母代表差异显著( $p < 0.05$ )。下同。

## 2.2 镉对幼苗生长的影响

镉对4种林木幼苗苗长的影响如图1所示。镉处理对云南松的苗长具有促进作用,各处理组的苗长均高于对照组,但仅 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度时该差异具有显著性( $p < 0.05$ );随着镉浓度加大,苗长耐受性略降( $p > 0.05$ )。镉处理对桉木苗长同样具有促进作用,各处理组的苗长均高于对照组,且在 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度时该差异具有显著性( $p < 0.05$ );随着镉浓度加大,其苗长耐受性

呈无规律变化( $p > 0.05$ )。镉处理对红椿的苗长具有抑制作用,处理组的苗长均小于对照组,且在 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $100\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度时该差异具有显著性( $p < 0.05$ );虽然各处理组平均苗长耐受性小于100%,但均在80%以上,表现出良好的耐受性。镉处理对五小叶槭的苗长具有“低抑高促”的作用,除了 $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 组外,其它处理组的平均苗长耐受性均大于100%,但这种差异并不显著( $p > 0.05$ )。

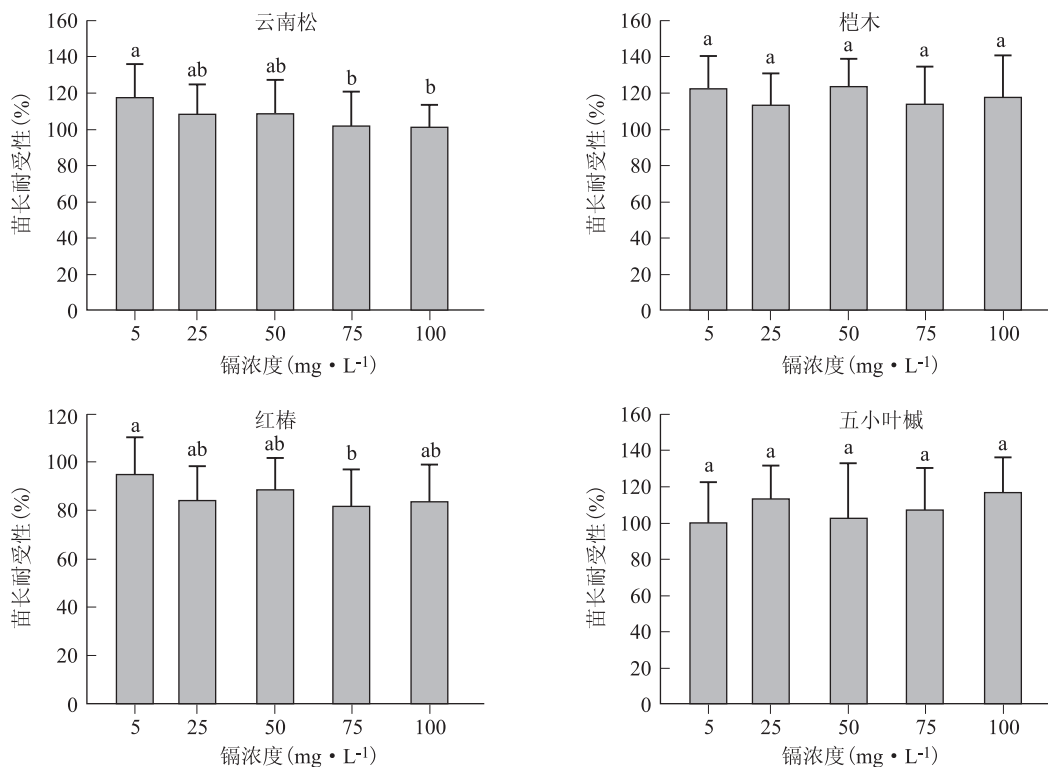


图1 镉对幼苗苗长的影响

镉对4种林木幼苗根长的影响与苗长差异较大(见图2)。云南松对重金属镉的耐受性最高,不同镉浓度处理下的根长均显著大于对照组( $p < 0.05$ ),且随着镉浓度的增高,其根长未出现显著变化( $p > 0.05$ );红椿对重金属镉也表现出良好的耐受性,不同镉浓度处理下的根长均大于对照组( $p > 0.05$ ),且随着镉浓度的增高,其根长未出现显著变化( $p > 0.05$ );五小叶槭对重金属镉也表现出良好的耐受性排名第3,在低浓度时( $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),其根长与对照组差异不显著( $p > 0.05$ ),但在 $25\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 后其根长与对照组差异显著( $p < 0.05$ ),但其对镉具有较高的耐受性,在 $75\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其耐性指数仍有51.0%;桉木对镉的耐受性最低,在低浓度时( $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ),其根长就显著小于对照组( $p < 0.05$ ),且对 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 以上的镉浓度耐受性较差

(低于50%)。

## 2.3 耐受性综合评价

采用模糊数学隶属函数法,对4种林木种子发芽耐受性、发芽指数耐受性、苗长耐受性和根长耐受性进行隶属函数值计算,得出其种子萌发期暨幼苗期耐镉胁迫的隶属函数总平均值(见表3)。据此确定,耐镉的强弱顺序为:红椿 > 云南松 > 五小叶槭 > 桉木。

## 3 讨论与结论

种子萌发是植物生长的第一个关键阶段。不同植物种子虽然在镉胁迫下的反应有所不同,但总体上表现为低浓度镉不影响或提高种子发芽率和发芽势并促进芽生长;高浓度镉则会降低种子的发芽

表 3 4 种林木种子萌发期暨幼苗期对镉的耐性隶属函数值及综合评价

树种	隶属函数值					平均隶属函数值	排序
	发芽指数耐受性	发芽率耐受性	发芽势耐受性	苗长耐受性	根长耐受性		
云南松	0.2053	0.2272	0.2321	0.5913	0.8035	0.4119	2
桉木	0.1382	0.1295	0.1562	0.8023	0.2850	0.3022	4
红椿	0.4633	0.3248	0.5229	0.1712	0.6027	0.4170	1
五小叶槭	0.3583	0.4837	0.2536	0.5747	0.2640	0.3868	3

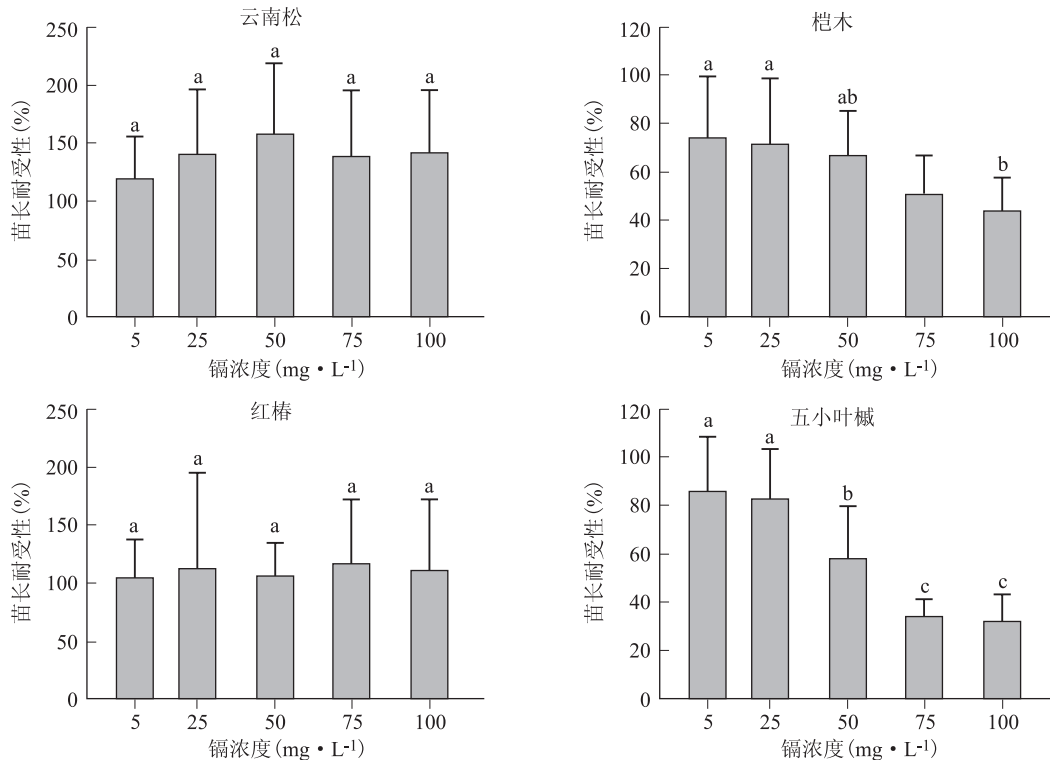


图 2 镉对幼苗根长的影响

率<sup>[15-21]</sup>。不同镉浓度处理对 4 种乡土林木种子的萌发均有不同程度的影响。考虑到差异的显著性,则桉木对镉的耐受性最差,镉胁迫造成其发芽率显著降低( $p < 0.05$ );五小叶槭和红椿的发芽率总体表现为“低促高抑”的现象;云南松不同浓度处理下其发芽率差异不显著。造成低促高抑现象的原因,可能是低浓度镉可提高胚的生理活性,促进萌发;而高浓度镉会对胚、芽等部位产生伤害,并且高浓度镉胁迫能够抑制淀粉酶、蛋白酶的活性,进而抑制种子内贮藏淀粉和蛋白质的分解,从而影响种子萌发所需要的物质和能力,使种子萌发受到抑制<sup>[22]</sup>。据此推测,本研究设置的浓度梯度对于云南松种子还未造成明显伤害,云南松种子萌发可能可以耐受更高浓度的镉胁迫,这需要进一步的实验予以证实。

与种子时期以及成熟期相比,幼苗期往往是植物最脆弱的时期,在幼苗期表现出较高的耐受性的

植物,其成体在镉胁迫环境下也能生长良好。此外,植物根系对重金属的吸收和积累能力很强,并承担着物质代谢、生理功能的重要作用。因此评价植物对重金属耐受性的强弱,根系耐性指数是最重要的指标之一,可通过比较植物幼苗根在重金属胁迫下的生长情况,来判断各植物幼苗对重金属的耐受性<sup>[17]</sup>。根据这一理论推断,本研究所用的 4 种植物,其幼苗的镉耐受性从强到弱依次为:云南松、红椿、五小叶槭和桉木。

综上所述,从种子萌发而言,4 种林木种子对重金属镉的耐受性为云南松 > 红椿 ≈ 五小叶槭 > 桉木;从幼苗期而言,其耐受性为云南松 > 红椿 > 桉木 > 五小叶槭;从综合评价来看,其耐受性为红椿 > 云南松 > 桉木 > 五小叶槭。根据《土壤环境质量标准 (GB 15618 - 1995)》,土壤环境质量 3 级标准的镉浓度为  $\leq 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而目前四川省土壤镉污染总

体以轻度污染为主。4种林木种子及其幼苗均表现出较高的低浓度镉耐受性(耐受性大于70%)。因此,在四川省镉轻度污染的造林地区,只要气候条件适宜,云南松、红椿、桉木和五小叶槭均可作为备选树种;而对于镉污染严重区域,则可选择云南松和红椿。

#### 参考文献:

- [1] 李彦奇,关东明,陈陆霞,等. 镉污染植物修复技术[J]. 生物过程, 2014, 04(04): 61~66.
- [2] 向涛. 草本花卉对镉污染土壤修复研究[D]; 重庆大学, 2014.
- [3] CHANEY R L. Plant up take of inorganic waste constituents [M]//PARR J F. Land Treatment of Hazardous Wastes. Park Ridge, New Jersey; NoyesData Corporation. 1983: 50~76.
- [4] 陈良华,徐睿,杨万勤,等. 镉污染条件下香樟和油樟对镉的吸收能力和耐性差异[J]. 生态环境学报. 2015, (2): 316~322.
- [5] 黄会一,蒋德明,张春兴,等. 木本植物对土壤中镉的吸收、积累和耐性[J]. 中国环境科学, 1989, 9(5): 323~30.
- [6] 李橙. 利用绿化苗木修复Cd污染土壤研究[D]; 河北农业大学, 2011.
- [7] 李海茹. 日本榉木对土壤重金属的抗性研究[D]; 天津理工大学, 2013.
- [8] 刘维涛,张银龙,陈喆敏,等. 矿区绿化树木对镉和锌的吸收与分布[J]. 应用生态学报. 2008, 19(4): 752~756.
- [9] 罗玉松. 三种柳树对重金属镉胁迫的生长和生理响应[D]; 内蒙古农业大学, 2016.
- [10] 周疆丽. 旱柳对重金属的耐性研究[D]; 安徽农业大学, 2011.
- [11] NAKAGAWA K, TSUNEMATSU T. Cultivation Experiment on Phytoremediation of Heavy Metal Contaminated Soil by Brassica (Remediation of Contaminated Land) [J]. Soil Mechanics & Foundation Engineering, 2002, 50(4~6).
- [12] 刘俊祥,孙振元,韩蕾,等. 草坪草对重金属胁迫响应的研究现状[J]. 中国农学通报, 2009, 25(13): 142~145.
- [13] 徐睿. Cd污染对四川珍贵乡土树种的影响及螯合剂效应研究[D]. 雅安; 四川农业大学, 2015.
- [14] 郑光华. 种子生理研究[M]. 科学出版社, 2004.
- [15] 鱼小军,张建文,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.
- [16] 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.
- [17] 马敏,龚惠红,邓泓. 重金属对8种园林植物种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(22): 206~211.
- [18] 赵玉红,拉巴曲吉,罗布,等. 铜、镉、铅、锌对4种豆科植物种子萌发的影响[J]. 种子, 2017, 36(1): 22~28.
- [19] 张杏辉,陈懿. 镉胁迫对白菜种子萌发的影响[J]. 南方园艺, 2009, 20(6): 7~9.
- [20] 崔永行,范仲学,杜瑞雪,等. 镉胁迫对甜高粱种子萌发的影响[J]. 华北农学报, 2008, 23(6): 140~143.
- [21] 陈世军,张明生,韦美玉. Cd<sup>2+</sup>对辣椒种子萌发的影响[J]. 种子, 2009, 28(6): 23~25.
- [22] 葛成军,陈秋波,俞花美,等. Cd胁迫对2种热带牧草种子发芽与根伸长的抑制效应[J]. 热带作物学报, 2008, 29(5): 567~571.