

铅胁迫对几种乔木种子萌发及活力的影响研究

宋清玉<sup>1</sup>,王进鑫<sup>2,3\*</sup>,杨楠<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 林学院,陕西 杨陵 712100;2. 西北农林科技大学 资源环境学院,陕西 杨陵 712100;  
3. 农业部 西北植物营养与农业环境重点实验室,陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**通过对不同浓度铅胁迫下的侧柏、油松、栎树、刺槐 4 种乔木种子进行种子萌发培养试验,研究了土壤铅胁迫对 4 种乔木种子萌发特征的影响。结果表明,低浓度的铅胁迫对侧柏、油松、刺槐种子的萌发有一定的促进作用,但作用不显著;随着铅浓度的升高,促进作用逐渐转变为抑制作用,且铅浓度越高,抑制作用越大,均达到了显著水平。而铅胁迫始终对栎树种子的萌发有抑制作用。不同树种的种子萌发对高浓度的铅胁迫耐性有所不同,11 000 mg·kg<sup>-1</sup> 的铅胁迫已完全抑制了刺槐种子的萌发,栎树和油松种子发芽抑制率则分别在 13 000、15 000 mg·kg<sup>-1</sup> 的铅胁迫下达到 100%,而侧柏种子在 15 000 mg·kg<sup>-1</sup> 的铅胁迫下仍可发芽。综合分析 4 种树种种子萌发的各项指标,铅胁迫对各树种的活力指数影响最大。综上分析表明,侧柏、油松对铅胁迫抗性较强,而栎树、刺槐对铅胁迫较为敏感。因此油松、侧柏 2 种乔木树种适合用于铅污染土壤的修复。

**关键词:**土壤污染;铅胁迫;乔木树种;种子萌发;活力指数

**中图分类号:**S723.13      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2017)04-0007-06

Effects of Lead Stress on Seed Germination and Vigor of Several Tree Species

SONG Qing-yu<sup>1</sup>, WANG Jin-xin<sup>2,3\*</sup>, YANG Nan<sup>2</sup>

(1. College of Forestry, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agri-environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** Effects of different concentrations of Pb<sup>2+</sup> (0—15 000 mg·kg<sup>-1</sup>) on seed germination of four tree species (*Pinus tabulaeformis*, *Platycladus orientalis*, *Koeleria paniculata*, *Robinia pseudoacacia*) were investigated. The results showed that low concentration lead stress stimulated the seed germination of *P. tabulaeformis*, *P. orientalis* and *R. pseudoacacia*, but the stimulation effect was not significant. With the increase of lead concentration, the promotion effect was gradually changed into the inhibition effect, and the higher the lead concentration, the greater the inhibition effect, then reached a significant level. The seed germination of *K. paniculata* was inhibited under any lead concentration stress. The seed germination of *R. pseudoacacia* was completely inhibited under 11 000 mg·kg<sup>-1</sup> lead stress. The seed germination inhibition rate to *P. tabulaeformis* and *P. orientalis* were sequentially reached 100% under 13 000 mg·kg<sup>-1</sup> and 15 000 mg·kg<sup>-1</sup> lead stress, and the seed of *P. orientalis* could still germinate under 15 000 mg·kg<sup>-1</sup> lead stress. Comprehensive analysis of the seed germination indexes of four tree species indicated that the effect of lead stress on the seed vigor index was the largest. The foregoing analysis showed that *P. orientalis* and *P. tabulaeformis* had strong resistance to lead stress, and *K. paniculata* and *R. pseudoacacia* were more sensitive to lead stress. So *P. orientalis* and *P. tabulaeformis* were suitable for the vegetation restoration on

收稿日期:2016-10-31 修回日期:2016-12-12

基金项目:国家自然科学基金(31170579,31670713);陕西省科技统筹创新工程计划项目(2016KTCL03-18)。

作者简介:宋清玉,女,硕士研究生,研究方向:重金属污染土壤修复。E-mail:sqy280452511@163.com

\* 通信作者:王进鑫,男,教授,博导,研究方向:旱区人工林生态系统生物节水与环境生态学理论。E-mail:jwang118@126.com

lead contaminated soil.

**Key words:** soil pollution; lead stress; tree species; seed germination; vigor index

我国铅锌矿产资源丰富,而且西北地区的储量很大<sup>[1]</sup>。铅矿的不合理开发造成了严重的土壤铅污染<sup>[1-2]</sup>。土壤中的铅可以进入水体或直接被植物吸收,最终通过食物链进入人体,对人体造成致命性伤害。因此,国内外的学者们对铅矿区的土壤修复进行了大量的研究,认为植物修复是一种被大家认可的新型高效、绿色廉价的修复重金属污染土壤的途径<sup>[3]</sup>。

目前修复铅污染土壤的植物多采用草本植物或农作物,利用木本植物进行修复的研究相对较少,而木本植物具有个体高大、根系可以深入土壤等优点,可以更好地净化铅污染土壤<sup>[4-5]</sup>。侧柏、油松、栎树和刺槐是西北干旱、半干旱地区主要的造林树种,具有良好的抗旱性,且耐铅性强<sup>[6-9]</sup>。因此,本研究通过不同铅浓度处理对种子萌发及活力的影响,选出能够在不同铅污染土壤上正常萌芽的耐性树种,以期为西北地区铅矿废弃地的土壤修复提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

供试种子:油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、栎树(*Koelreuteria paniculata*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*) 4 种乔木种子,均购自杨凌金稻种业公司。

供试土壤:杨凌当地的塬土(采自崔西沟农田),基本理化性质为田间持水量 22.4%,有机质含量 13.70 g·kg<sup>-1</sup>,全氮含量 0.73 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷含量 35.91 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾含量 96.52 mg·kg<sup>-1</sup>,铅背景值 18.4 mg·kg<sup>-1</sup>,pH 值 8.15。

供试试剂:醋酸铅(分析纯)。

### 1.2 方法

1.2.1 试验设计 本试验在西北农林科技大学南校区的实验室内进行。于 1 月初将土壤风干过筛,除去土壤中的石砾及林草根系,向土样中加入 99% 的分析纯醋酸铅固体粉末,充分混匀,钝化 2 个月,备用。土壤外源铅含量(以纯铅计)设置为 300、1 000、2 000、3 000、4 000、5 000、6 000、7 000、8 000、9 000、10 000、11 000、12 000、13 000、14 000、15 000 mg·kg<sup>-1</sup>,同时设置不添加醋酸铅的对照组(CK)。将 130 g 土壤均匀加入到经过高温灭菌的直径 12 cm 的培养皿中,共 17 个处理,每个处理重复 3 次。挑选籽粒饱满且大小均匀的种子,经 0.1%

HgCl<sub>2</sub> 表面消毒杀菌 15 min 后,用去离子水冲洗干净,再用 45℃ 的温水进行烫种,待水温降至室温时,根据种子的具体情况浸泡 24~96 h。播种每皿 50 粒,于室内光照培养箱中培养(光照设置为 3 000 lx,12 h·d<sup>-1</sup>),充分供水,使土壤相对含水量为 100%,每天采用称质量法补充消耗的水分,试验期间不施加肥料,使基质保持自然肥力。

1.2.2 指标测定 土壤 pH 采用电位法测定,水土比为 2.5:1。有机质含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定。土壤全氮含量采用半微量开氏法测定;土壤速效磷含量采用碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法测定;速效钾含量采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提-火焰光度法测定<sup>[10]</sup>。

按照林木种子检验规程<sup>[11]</sup>的有关规定,在规定的发芽终止时间内,每天记录种子的萌发数,统计发芽率。发芽试验终止后,在每个培养皿中随机挑选 10 粒萌发种子(不足 10 粒的测定该处理中的所有萌发种子),用直尺测萌发种子的胚根长、胚芽长,并计算相关指标。

发芽率=规定发芽终止时间种子发芽数/供试种子数×100% (1)

发芽势=发芽高峰期发芽种子数/供试种子数×100% (2)

发芽高峰期发芽种子数为种子在一天内发芽数最多的发芽种子数;

平均发芽速度= $\sum D \times n / \sum n$  (3)

式中: $D$  为从种子置床起算的天数,置床当日为 0; $n$  为相应各天的发芽粒数;

发芽指数= $\sum Gt / Dt$  (4)

式中: $Gt$  为在  $t$  天的发芽数, $Dt$  为相应的发芽天数。

活力指数=发芽指数×苗长 (5)

式中:苗长=胚根长+胚芽长。

1.2.3 数据处理 运用 Excel2010 进行数据整理并作图,采用 SPSS19.0 软件进行 one-way ANOVA 单因素方差分析,以 Duncan 法进行处理间的多重比较( $\alpha=0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 对种子发芽率的影响

发芽率是检测种子质量的重要指标。从图 1 可以看出,在 300~1 000 mg·kg<sup>-1</sup> 的低浓度铅胁迫下,除刺槐在 300 mg·kg<sup>-1</sup> 铅浓度处理下发芽率略<对照,其他处理下,刺槐、侧柏、油松的发芽率>对

照,但均与对照差异不显著;而栎树的发芽率始终受铅胁迫的抑制。随着铅浓度的升高,各树种的发芽率较对照均有所下降,且不同树种发芽率的变化程度不同。侧柏、油松发芽率的下降程度较为平缓,栎树、刺槐发芽率的下降程度较快。铅浓度为 3 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,对栎树种子发芽率的抑制作用达到显著水平 ( $P < 0.05$ ),与对照相比,发芽率降低了 20.33%。此时刺槐、侧柏、油松的发芽率仅比对照降低了 6.35%、1.52%、1.58%。刺槐、油松、侧柏

的发芽率依次在铅浓度为 4 000、6 000、7 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时达到显著下降水平 ( $P < 0.05$ )。随着铅浓度继续升高,刺槐种子在 11 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  下不再发芽。栎树、油松种子则分别在 13 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  和 15 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  下停止发芽,侧柏发芽率的下降程度也更为显著,但在 15 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的高浓度下仍有发芽能力。说明刺槐、栎树的发芽率对高浓度的铅胁迫反应较为敏感,侧柏和油松的发芽率对铅胁迫抗性较强。

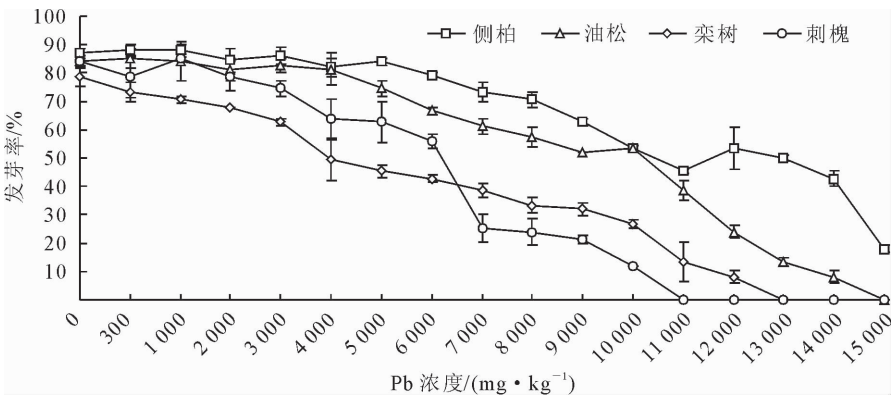


图 1 不同 Pb 浓度对 4 种乔木种子发芽率的影响

Fig. 1 Effects of different Pb concentrations on seed germination percentage of the seeds of four tree species

2.2 对种子发芽势的影响

发芽势是衡量种子发芽整齐度的重要指标。从图 2 可知,在 300~4 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的铅浓度处理范围内,油松的发芽势整体呈上升趋势,除在 300  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的铅浓度处理下,发芽势略<对照,其他处理下其发芽势较对照均有所提高,但与对照无显著差异;而侧柏、栎树、刺槐的发芽势随铅浓度的升高呈现下降趋势,且刺槐、栎树的发芽势分别在 2 000、4 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  下已出现显著降低现象 ( $P < 0.05$ ),而直到铅浓度升高到 9 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,侧柏和油松的发芽势才显著降低 ( $P < 0.05$ ),此时,刺槐、栎树、侧柏、油松的发芽势较对照分别下降了 94.23%、79.58%、39.58%、40.43%。随着铅浓度的继续升高,刺槐和栎树在 11 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  下发芽率为 0,油松和侧柏直到 15 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  下才停止发芽。说明铅胁迫对刺槐和栎树发芽势的影响较大,对油松和侧柏发芽势的影响较小。

2.3 对种子平均发芽速度的影响

平均发芽速度是指供试种子发芽所需的平均时间,是衡量种子发芽快慢的重要指标。由图 3 可见,在 300~2 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的低浓度处理区间内,侧柏和油松的平均发芽速度均略快于对照。说明低浓度的铅胁迫对侧柏和油松的发芽速度有促进作用,但方差分析表明,这种促进作用并不显著。而随着铅浓度的升高,铅胁迫对侧柏和油松的发芽速度则

呈现抑制作用,且在 12 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的浓度处理下达到显著抑制水平 ( $P < 0.05$ ),发芽时间分别是对照的 1.22 倍和 1.41 倍。但对刺槐和栎树而言,无论低浓度还是高浓度的铅胁迫对刺槐和栎树的平均发芽速度均有抑制作用,且刺槐在 2 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的铅胁迫下平均发芽速度已显著<对照 ( $P < 0.05$ ),铅浓度升高到 9 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,栎树的平均发芽速度也达到显著降低水平 ( $P < 0.05$ ),平均发芽时间是对照的 1.29 倍。说明铅胁迫对侧柏、油松、栎树的平均发芽速度影响较小,对刺槐的平均发芽速度影响较大。

2.4 对种子发芽指数的影响

发芽指数可以衡量植物的发芽能力及活力。由图 4 看出,在 300~1 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的处理区间内,与对照相比,侧柏的发芽指数有所提高,刺槐、油松和栎树有所下降,但是发芽指数无论提高或下降均与对照差异不显著。在 2 000~9 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的处理范围内,各树种的发芽指数较对照均有显著下降 ( $P < 0.05$ )。刺槐、栎树、油松、侧柏的发芽指数分别在 2 000、3 000、5 000、9 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的铅胁迫下达到显著抑制水平 ( $P < 0.05$ )。在此浓度范围内,刺槐的发芽指数较对照降低了 19.63%~90.75%,平均降幅为 58.46%。栎树的发芽指数较对照降低了 14.44%~59.09%,平均降幅为 42.81%,油松的发芽指数较对照降低了 3.74%~

51.87%，平均降幅为 22.04%，侧柏的发芽指数较对照仅降低了 0~19.31%。随着铅浓度的继续升高，铅胁迫对各树种发芽指数的抑制作用显著增强。与发芽率变化规律相似，11 000、13 000、15 000 mg · kg<sup>-1</sup> 的铅胁迫对刺槐、栎树、油松的发芽指数完全抑制。而铅浓度高达 15 000 mg · kg<sup>-1</sup> 时，侧柏仍具有发芽能力，但发芽指数较对照已降低了 89.54%。说明低浓度的铅胁迫促进侧柏、油松和刺槐的发芽指数，高浓度的铅胁迫抑制所有种子的发

芽指数。从各种种子发芽指数的变化情况可知，侧柏和油松的发芽指数受铅胁迫影响较小，其次是栎树，刺槐的发芽指数受铅胁迫影响最大。

2.5 对种子活力指数的影响

活力指数是种子发芽速率和生长量的综合反映，是反映种子活力的更好指标。由图 5 可见，在 300~1 000 mg · kg<sup>-1</sup> 的铅浓度处理区间内，铅胁迫对刺槐、侧柏、油松种子的活力指数有一定的促进作用，但与对照差异不显著。而低浓度铅胁迫已经对

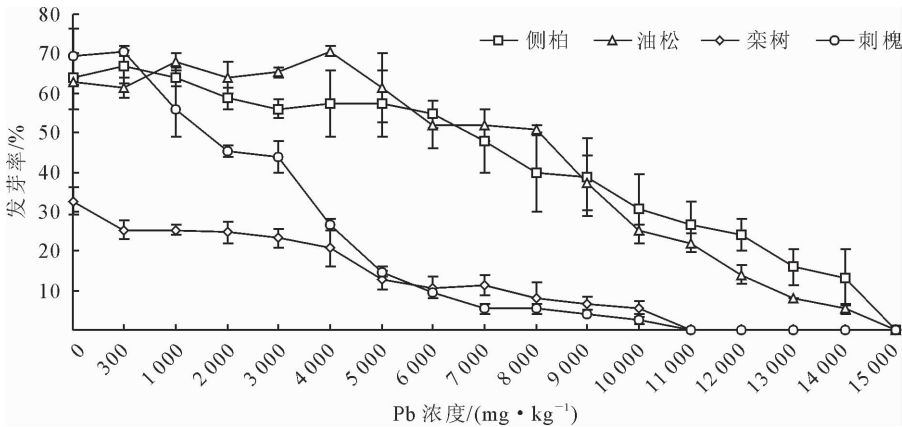


图 2 不同 Pb 浓度对 4 种乔木种子发芽势的影响

Fig. 2 Effects of different Pb concentrations on seed germination energy of the seeds of four tree species

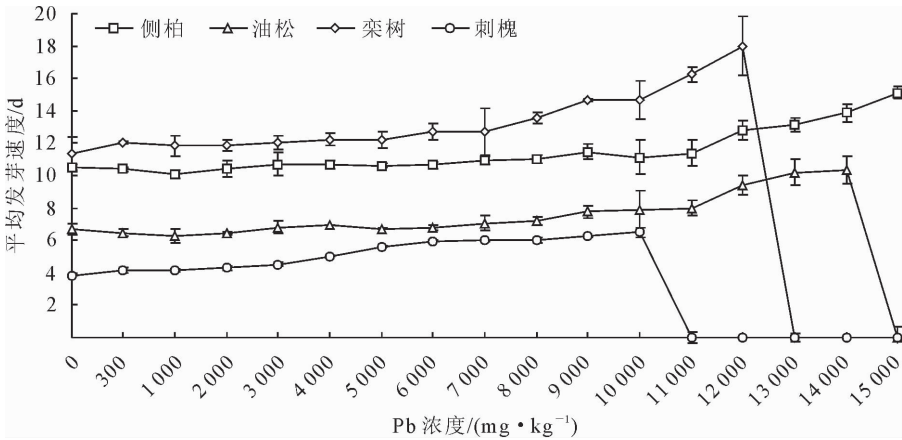


图 3 不同 Pb 浓度对 4 种乔木种子平均发芽速度的影响

Fig. 3 Effects of different Pb concentrations on average germination rate of the seeds of four tree species

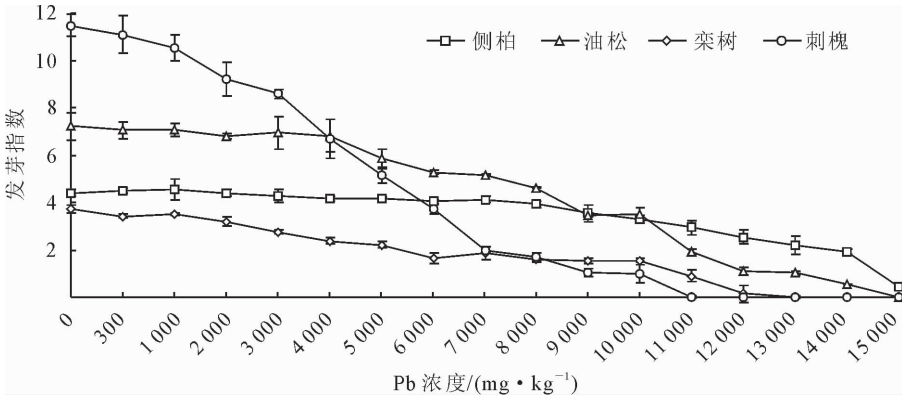


图 4 不同 Pb 浓度对 4 种乔木种子发芽指数的影响

Fig. 4 Effects of different Pb concentrations on germination index of the seeds of four tree species



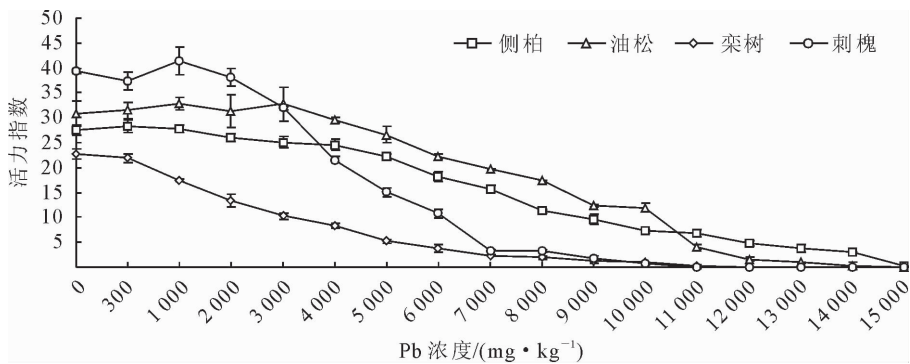


图 5 不同 Pb 浓度对 4 种乔木种子活力指数的影响

Fig. 5 Effects of different Pb concentrations on vigor index of the seeds of four tree species

栎树种子的活力指数呈现出抑制作用,且在 1 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下达到显著水平( $P<0.05$ )。在 2 000~7 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理区间内,除油松种子活力指数在 2 000、3 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理下较对照略有提高外,在其他处理下,各树种种子活力指数均呈现下降趋势。随着铅浓度升高到 11 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,刺槐种子已失去活力,此时栎树种子的品质已极差,随之在 12 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的铅胁迫下失去活力。15 000  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的铅胁迫下,油松的种子失去活力,而侧柏的种子并未完全失去活力。说明铅胁迫对刺槐、栎树种子的活力指数影响比较大,对油松、侧柏种子的活力指数影响比较小。

3 结论与讨论

3.1 结论

低浓度的铅胁迫对侧柏、油松、刺槐种子的萌发均有促进作用,随着铅胁迫的增强,促进作用逐渐转变为抑制作用。而无论是低浓度还是高浓度的铅胁迫均对栎树的萌发有抑制作用。且土壤中的铅浓度越高,铅胁迫对 4 种树种种子的萌发抑制作用越强,均达显著水平。

综合种子萌发的相关指标来看,铅胁迫对各树种种子活力指数的影响最大。栎树、刺槐受铅胁迫的影响较大,侧柏、油松的抗铅性较强。因此侧柏、油松 2 种乔木树种种子具有在严重铅污染土壤上萌芽更新的能力。

3.2 讨论

种子萌发是植物对外界环境反应的开始,也是对环境胁迫较为敏感的时期,了解种子萌发对铅胁迫的反应,是系统认识重金属伤害机理的较好途径<sup>[12-14]</sup>。因此通过研究重金属铅胁迫对植物种子萌发状况的影响,可以一定程度反映出植物对铅胁迫的耐性。

重金属铅胁迫对植物种子萌发的影响存在较低

浓度下的刺激效应和高浓度下的抑制效应,但不同植物种子对  $\text{Pb}^{2+}$  毒性的反应程度有所不同,因此这种刺激或抑制效应因植物种类不同又存在浓度范围差异。这除了与植物自身的遗传特性相关外,还与种子结构及其对重金属的抗性有很大关系<sup>[15-16]</sup>。本研究结果显示,低浓度的铅胁迫对侧柏、油松、刺槐种子的萌发均有不同程度的促进作用,但随着铅浓度的不断升高,铅胁迫对种子各萌发指数的促进效应逐渐转变为抑制效应,且铅浓度越高,抑制效应越明显。而栎树各项种子萌发指数随着铅浓度的不断升高始终呈现下降趋势。该结论与张远兵<sup>[17]</sup>等、古红梅<sup>[18]</sup>等的研究结果一致。造成铅胁迫对种子萌发低促高抑现象的原因可能是,低浓度的铅胁迫可以促进种子内某些生理生化反应的进行和一些酶活性的增加,从而刺激胚的生理活性,促进种子萌发,即植物的应激反应。而植物种子的萌发对重金属的应激反应存在一个耐性临界值,当土壤中的铅含量超过这一临界值时,会抑制淀粉酶、蛋白酶的活性,进而抑制种子内贮藏淀粉和蛋白质的分解,影响了种子萌发所需要的物质和能量,且土壤中高浓度的  $\text{Pb}^{2+}$  也会抑制种子吸水,最终抑制了种子的萌发<sup>[19-20]</sup>。

本研究表明:铅胁迫对种子的活力指数影响最大,较低浓度的铅胁迫已对种子活力指数造成显著性影响,这与陈伟<sup>[21]</sup>等的试验结果一致。这可能是由于在种子萌发的开始阶段,主要是通过吸胀作用从环境中获得水分完成内部储藏物质的代谢分解,为种子萌发提供养分。随着种子萌发进程的继续,种子代谢活动增强,需要从外界获得更多的养分和水分,外界环境的  $\text{Pb}^{2+}$  会大量进入到种子体内,从而抑制种子萌发。因此种子萌发过程除受外界环境影响外,还依赖于胚内养分的供应,但胚根和胚芽的生长全过程都受土壤中  $\text{Pb}^{2+}$  的胁迫,所以它们受铅胁迫的影响要>种子萌发的影响,尤其是对于直接暴露于土壤的胚根而言<sup>[22-24]</sup>。而种子活力指数是种

子发芽速率和幼苗长势的综合反映。所以种子活力指数受铅胁迫的影响要>其他 4 个种子萌发指标的影响。

参考文献：

[1] 郑奎,李林.我国铅锌矿区的重金属污染现状及治理[J].安徽农业科学,2009,37(30):14837-14838,14870.  
ZHENG K,LI L. The status of heavy metal pollution and its control in the Pb and Zn mining districts of China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(30): 14837-14838, 14870. (in Chinese)

[2] 徐佩,吴超,邱冠豪.我国铅锌矿山土壤重金属污染规律研究[J].土壤通报,2015,46(3):739-744.  
XU P,WU C,QIU G H. Study on the lawof soil heavy metals pollution around lead-zinc mining areas in China[J]. Chinese Journal of Soil Science,2015,46(3):739-744. (in Chinese)

[3] MANTA D S, ANGELONE M, BELLANEA A, *et al.* Heavy metal in urban soil;a case study from the city of Palermo(Sicily),Italy[J]. The Science of the Total Environmental, 2002, 300(1/3):292-243.

[4] 周芙蓉.侧柏和国槐对干旱和铅胁迫的耐性及对铅污染土壤的修复[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2014.

[5] 韦秀文,姚斌,刘慧文,等.重金属及有机物污染土壤的树木修复研究进展[J].林业科学,2011,47(5):124-130.  
WEI X W, YAO B, LIU H W, *et al.* Application of dendroremediation to the soil contaminated soil by heavy metals and organic pollutants[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2011, 47(5): 124-130. (in Chinese)

[6] 马惠芳,王进鑫,张青,等.干旱和铅双重胁迫对刺槐叶片有机渗透调节物质的影响[J].西北林学院学报,2012,27(3):1-6.  
MA H F, WANG J X, ZHANG Q, *et al.* Influences of drought and lead stresses on organic osmolytes in the leaves of *Robinia pseudoacacia*[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(3):1-6. (in Chinese)

[7] 刘俊峰,王进鑫,邹朋,等.水分和铅交互胁迫对侧柏幼苗叶片生理指标的影响[J].西北林学院学报,2014,29(2):32-36,91.  
LIU J F, WANG J X, ZOU P, *et al.* Effects of interactive drought and lead stress on physiological indexs of *Platycladus orientalis* seedlings[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2014, 29(2): 32-36, 91. (in Chinese)

[8] 初江涛,王进鑫,邹朋,等.干旱和铅胁迫对生长初期的国槐和侧柏叶绿素的影响[J].西北林学院学报,2012,27(4):19-23.  
CHU J T, WANG J X, ZOU P, *et al.* Effects of drought and Pb stress on the contents of chlorophylls of *Sophor japonica* and *Platycladus orientalis* in their initial growth stages[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(4): 19-23. (in Chinese)

[9] 王榆鑫.干旱和铅对 4 种林木种子播种苗的胁迫阈值研究[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2016.

[10] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业出版社,2000:224-240.

[11] 于淑兰,陈幼生,赵德铭,等. GB 2772-1999 中华人民共和国国家标准 林木种子检验规程[S].北京:中国标准出版社,2000.

[12] 崔俊芳,胡春胜,张玉铭,等.重金属铅对不同品种小麦种子发芽和幼苗生长的影响[J].安徽农业科学,2010,38(2):622-623,633.  
CUI J F, HU C S, ZHANG Y M, *et al.* Effects of the heavy metal lead on the seed germination and seedling growth of different wheat varieties[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(2): 622-623, 633. (in Chinese)

[13] 陈俊任,柳丹,吴家森,等.重金属胁迫对毛竹种子萌发及其富集效应的影响[J].生态学报,2014,34(22):6501-6509.  
CHEN J R, LIU D, WU J S, *et al.* Seed germination and metal accumulation of Moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) under heavy metal exposure[J]. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(22): 6501-6509. (in Chinese)

[14] KURIAKOSE S V, PRASAD M N V. Cadmium stress affects seed germination and seedling growth in *Sorghumbicolor*(L.) Moenchby changing the activities of hydrolyzing enzymes[J]. Plant Growth Regulation, 2008, 54(2): 143-156.

[15] BONIFACIO R S, MONTANO N E. Inhibitory effects of mercury and cadmium on seed germination of *Enhalusacoroides* (L. F.) Royle [J]. Bulletinof Environmental Contamination and Toxicology, 1998, 60(1): 45-51.

[16] 张显强,李超,谌金吾,等.镉、铅胁迫对三叶鬼针草(*Bidenspilosa* L.)种子萌发的影响[J].种子,2014,33(7):40-42, 46.  
ZHANG X Q, LI C, CHEN J W, *et al.* Effects of cadmium and lead stress on the germination of *Bidenspilosa*(L.)[J]. Seed, 2014, 33(7): 40-42, 46. (in Chinese)

[17] 张远兵,刘爱荣,孟祥辉,等.铅胁迫对 19 个品种草坪草种子萌发和幼苗生长的影响[J].核农学报,2009,23(3):506-512.  
ZHANG Y B, LIU A R, MENG X H, *et al.* Effect of lead stress on the seed germination and seeding growth ofnineteen varitiesturfgrasses[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2009, 23(3): 506-512. (in Chinese)

[18] 古红梅,胡述龙,王红星.重金属铅对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J].广东农业科学,2011(1):36-38.  
GU H M, HU S L, WANG H X. Effects of heavy mental lead on corn seed germination and seedling growth[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011(1): 36-38. (in Chinese)

[19] 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.  
GE C J, CHEN Q B, YU H M, *et al.* Effect of Cd on germination and inhibition of root elongation of tropical forage plants [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2008, 29(5): 567-571. (in Chinese)

[20] 杨玲,张勇,吴洪娇,等.铅锌胁迫对早熟禾和狗牙根种子出苗和幼苗生长的影响[J].云南农业大学报:自然科学,2013,28(3):405-410.  
YANG L, ZHANG Y, WU H J, *et al.* Effect of lead and zinc stress on emergence and seedling growth of *Poa annua* and *Cynodon dactylon*[J]. Journal of Yunnan Agricultural University: Natural Science, 2013, 28(3): 405-410. (in Chinese)

south-eastern distribution limit in Europe[J]. *Plant Biosystems*, 2009, 143: 34-45.

[12] 艾泽民,陈云明,曹扬. 黄土丘陵区不同林龄刺槐人工林碳、氮储量及分配格局[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(2): 333-341. AI Z M, CHEN Y M, CAO Y. Storage and allocation carbon and nitrogen in *Robinia pseudoacacia* plantation at different ages in the Loess Hilly region, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(2): 333-341. (in Chinese)

[13] 李芳菲. 刺槐人工林 C、N、P 分配格局及其化学计量特征研究[D]. 陕西杨陵: 西北农林科技大学, 2015.

[14] 刘冰燕,陈云明,曹扬,等. 秦岭南坡东段油松人工林生态系统碳、氮储量及其分配格局[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 643-652. LIU B Y, CHEN Y M, CAO Y, *et al.* Storage and allocation carbon and nitrogen in *Pinus tabulaeformis* on the south slope of the east Qinling Mountains, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 643-652. (in Chinese)

[15] 刘冰燕,陈云明,曹扬. 渭北黄土区刺槐人工林氮、磷生态化学计量特征[J]. *西北林学院学报*, 2016, 31(1): 1-6. LIU B Y, CHEN Y M, CAO Y. Nitrogen and phosphorus stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* plantation in Weibei Loess Plateau region[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2016, 31(1): 1-6. (in Chinese)

[16] 宋变兰,关晋宏,杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林碳氮密度及其分配特征[J]. *水土保持研究*, 2016, 23(4): 55-59. SONG B L, GUAN J H, DU S. Carbon and nitrogen densities and their allocation characteristics in a black locust plantation and an oak forest in the loess hilly region[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016, 23(4): 55-59. (in Chinese)

[17] LIU X P, GONG C M, FAN Y Y, *et al.* Response pattern of amino compounds in phloem and xylem of trees to drought depends on drought intensity and root symbiosis[J]. *Plant Biology*, 2013, 15(Supp. 1): 101-108.

[18] LEWIS O A M, WATSON E F, HEWITT E J. Determination of nitrate reductase activity in barley leaves and roots[J]. *Annals Botany*, 1982, 49: 31-17.

[19] LAMOTHE P J, MCCORMICK P G. Role of hydrindantin in the determination of amino acids using ninhydrin[J]. *Analytical Chemistry*, 1973, 45: 1906-1911.

[20] BRANDFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantification of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248-254.

[21] LIU X P, FAN Y Y, LONG J X, *et al.* Effects of soil water and nitrogen availability on photosynthesis and water use efficiency of *Robinia pseudoacacia* seedlings[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2013, 25(3): 585-595.

[22] 王昕,孙永林,刘西平. 土壤含水量对刺槐光合能力和碳水化合物分配的影响[J]. *西北林学院学报*, 2015, 30(1): 20-25. WANG X, SUN Y L, LIU X P. Effects of soil water contents on leaf photosynthesis and carbohydrate partitioning in *Robinia pseudoacacia*[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2015, 30(1): 20-25. (in Chinese)

(上接第 12 页)

[21] 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. CHEN W, ZHANG M M, SONG Y Y, *et al.* Inhibitory effects of heavy metal stress on the seed germination of four turfgrass types[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2013, 21(3): 556-563. (in Chinese)

[22] 刘垚,张薇,刘鸣达. 镉-苯并(a)芘单一及复合污染对小麦种子萌发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(2): 265-269. LIU Y, ZHANG W, LIU M D. Effect of cadmium-benzo(a)pyrene single and combined pollution on wheat seed germination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(2): 265-269. (in Chinese)

[23] LIU X L, ZHANG S Z, SHAN X Q, *et al.* Toxicity of arsenate and arsenite on germination, seedling growth and amylolytic activity of wheat [J]. *Chemosphere*, 2005, 61(2): 293-301.

[24] 恽焯,李威,张银龙,等. 5-氟尿嘧啶与镉单一及复合污染对三种作物种子萌发的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(6): 1075-1081. YUN Y, LI W, ZHANG Y L, *et al.* Eco-toxicity of single and combined contamination of 5-fluorouracil and Cd on seed germination of wheat, Chinese cabbage and rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(6): 1075-1081. (in Chinese)