

重金属胁迫下桉树种子的响应与生态毒性效应

游秀花¹, 吴星镜², 陈福海², 李万年², 李文禄², 林巧香², 何东进²

(¹福建农林大学生命科学学院, 福州 350002; ²福建农林大学林学院, 福州 350002)

摘要:以南方重要造林树种邓恩桉、本沁桉、巨桉、直杆蓝桉为研究对象,采用溶液培养方法,在20天内研究了不同质量分数的铜、锌、镉对这4种桉树种子发芽与根伸长的污染效应。结果表明,不同质量分数的铜、锌、镉对邓恩桉、本沁桉、巨桉与直杆蓝桉的种子发芽与根伸长均存在抑制效应,其中对种子的发芽具有明显的抑制性,但对种子发芽过程(发芽高峰期)影响较小。4种桉树对3种重金属的响应中均表现出对铜具较高敏感性。另外,重金属质量分数与种子发芽抑制率之间普遍存在着显著的回归关系,且对根伸长的抑制效应明显大于对种子发芽的影响,高质量分数重金属对根伸长的抑制率均达80%以上,甚至达到100%。

关键词:重金属;桉树;种子发芽;根生长;生态毒性

中图分类号:S718;X173 **文献标识码:**A

Eco-toxicology of Heavy Metals on the Inhibition of Seed of Eucalyptus

You Xiuhua¹, Wu Xingjing², Chen Fuhai², Li Wannian², Li Wenlu², Lin Qiaoxiang², He Dongjin²

(¹College of Life Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002;

²College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002)

Abstract: The ecological effects of copper, zinc and cadmium on the inhibition of seed germination and root elongation of *Eucalyptus dunnii*, *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus grandis*, *Eucalyptus labill* were studied in this paper in 20 days of the trial period. Results indicated that the inhibition effects of heavy metals on seed germination and root elongation were all obvious in each concentration of heavy metals, heavy metals decreased the rate of seed germination, but these are the eucalyptus seed germination process less affected. And also, the result indicated that eucalyptus in the four tests designed by three kinds of heavy metals Cu, Zn, Cd than in the three show they are more sensitive to the Cu. In addition, the regression relationships between heavy metal concentration and the inhibition rates of seed germination and root elongation of *Eucalyptus* were remarkable, eucalyptus seed more sensitive to heavy metal pollution, inhibition of root elongation generally reach 100 percent, significantly higher than inhibit seed germination rate.

Key words: heavy metal, *Eucalyptus*, seed germination, root elongation, eco-toxicology

重金属污染是当今世界上普遍关注的环境问题之一,它不仅严重影响了农作物的质量与产量,而且通过在生态系统中的迁移积累,最终影响人类,危及人体健康和生命安全^[1]。20世纪60年代日本发生的第二公害病——骨痛病,便是由于食用被镉废水污染了的土壤

生产的“镉米”所致^[2]。

桉树(*Eucalyptus*)是桃金娘科桉属树种的统称^[3],天然分布于大洋洲,种类包括变种、亚种约945种,为世界四大速生树种之一。因其具有速生、适应性强、轮伐期短、木材用途广、经营经济效益高等优点而成为最

基金项目:福建省自然科学基金资助项目“福建省主要造林树种种苗重金属伤害及其生理生化特性研究”(2007J0213);福建省大学生创新性实验项目“不同桉树品种抗重金属伤害的生理生化特性比较研究”。

第一作者简介:游秀花,女,1969年出生,福建南平人,高级实验师,从事污染生态学与化学生态学研究。通信地址:350002 福建福州金山 福建农林大学生命科学学院, E-mail: fyxh1106@126.com。

收稿日期:2008-10-24, **修回日期:**2009-02-16。

重要的人工用材林造林树种之一,被中国列为国家工业原料林造林的首选树种。桉树大面积造林在中国始于20世纪80年代后期和90年代初期。由于优良无性系的大面积推广及栽培技术的提高,桉树产量较过去有显著提高^[4]。但是,随着工业化规模不断扩大和城市化的快速发展,森林生态系统重金属污染问题日趋严重^[5],桉树人工林也不例外,桉树种植过程中大量使用化肥是导致桉树人工林重金属污染的重要原因。根据高志岭等研究报道^[6],全世界范围内磷肥的平均含镉量约为7 mg/kg,每年由于施用磷肥给全球带入约660 t的镉,为此,笔者选择中国南方广泛种植的4种桉树(邓恩桉、直杆蓝桉、巨桉、本沁桉)种子为研究对象,采用溶液培养法进行重金属污染对种子发芽与根伸长抑制的研究,旨在为桉树人工林的速生丰产和可持续经营提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料与实验设计

1.1.1 材料 桉树种子由福建永安林业(集团)股份有限公司种苗中心提供的优良桉树种子;CuSO₄·5H₂O、ZnSO₄·7H₂O、CdCl₂·2.5H₂O均为分析纯;受控环境生长箱,硬质玻璃培养皿,无灰定性滤纸。实验于2008年7—8月在福建农林大学生命科学学院实验室进行。

1.1.2 试验设计 每种污染物设置6个水平,每水平设置3次重复,供试污染物浓度设计见表1。

表1 污染物的浓度设计 (mg/kg)

处理	Cu	Zn	Cd
1	50	100	0.5
2	100	200	2.5
3	200	400	5.0
4	300	600	10.0
5	400	800	20.0
6	500	1000	40.0
对照(CK)	0	0	0

1.2 方法

1.2.1 种子预处理 用0.15%的福尔马林溶液对供试的桉树种子消毒30 min,然后放到初始温度为45℃的蒸馏水中浸泡24 h后取出,完成种子的预处理。

1.2.2 种子发芽试验和根伸长试验 将试验所需要的培养皿、培养箱等仪器进行消毒处理,在每个培养皿的底部垫上一张无灰定性滤纸,随机抽取预处理过的桉树种子20粒平放在滤纸上,用胶头滴管加入相应的培养液,对照处理则直接加蒸馏水。将装有试验种子的培养皿放进25℃、湿度为65%的培养箱中进行种子发芽

与根伸长试验。

1.2.3 数据统计与分析 试验设计时间是20天,每天观察、记录各处理的种子发芽情况,每隔24 h添加一次溶液并记录,连续20天。待试验结束后,统计种子总发芽数、测定所有发芽种子的根长、种子萌发数量和根长,取3个重复组的平均值,计算种子发芽率与根伸长抑制率^[7],并绘制重金属浓度与桉树种子发芽率、根长抑制率之间的剂量-效应曲线,以浓度-发芽率(或抑制率)进行回归分析。

2 结果与分析

重金属铜、锌、镉对邓恩桉、本沁桉、巨桉、直杆蓝桉等4种桉树种子发芽过程、种子发芽抑制率、种子根伸长抑制率等方面的影响见表2、表3与图1。

2.1 铜、锌、镉污染对4种桉树种子发芽的影响

2.1.1 对发芽率的影响 表2与图1显示,不同浓度重金属污染对邓恩桉种子发芽过程产生一定的影响。与对照(CK)相比,3种重金属6种浓度下邓恩桉种子的发芽率均有所降低,表明重金属对邓恩桉种子发芽存在抑制现象,其中抑制程度最大的是400 mg/kg和500 mg/kg的铜,种子发芽率下降了70.6%,抑制程度最小的是100 mg/kg和400 mg/kg的锌,种子发芽率抑制率为0,即未对邓恩桉种子发芽产生作用。不同重金属以及同一重金属不同污染程度对种子发芽的抑制效应也不一样,铜与镉基本表现为浓度越大,对种子发芽的抑制性越强,种子的发芽率就越低,而锌却表现为随着浓度的增大,种子发芽受抑制程度出现先高后低再高的波浪状现象(图1)。从表3可以看出,铜、镉浓度与邓恩桉种子发芽抑制率之间存在显著或者极显著的回归关系,而锌浓度与邓恩桉种子发芽抑制率之间的相关性较差,说明邓恩桉种子发芽对不同的重金属敏感度不同,其敏感度大小顺序为铜>镉>锌。

重金属污染对本沁桉种子发芽率也有存在一定的影响,且这种影响与污染物对其他桉树种子发芽率的影响明显不同。在对照试验(CK)下,本沁桉种子发芽率是95%,受重金属污染的本沁桉种子发芽率多次出现不降反而升高的趋势,如100 mg/kg锌处理和0.5、2.5、5.0 mg/kg镉处理下的发芽率均为105.3%(以CK发芽率为100%折算),这表明低浓度的锌、镉污染不仅不会抑制本沁桉种子的发芽,反而起到促进作用。从图1还可以看出,重金属污染对本沁桉种子发芽抑制率多数比较小,抑制率多介于-5.3%~5.3%之间,只有200 mg/kg、300 mg/kg、400 mg/kg、500 mg/kg铜处理下的本沁桉种子发芽受到较大的抑制作用。

表2 3种重金属污染对桉树种子整个发芽过程的影响

处理	发芽高峰 期/天	种子发芽 率/%	发芽抑制 率/%	根长/ cm	根伸长抑制 率/%	发芽高峰期/ 天	种子发芽 率/%	发芽抑制率/ %	根长/ cm	根伸长抑制 率/%
CK	3	100.0	0.0	1.45	0.0	3	100.0	0.0	1.02	0.0
Cu-1	3	94.1	5.9	0.31	78.6	3	100.0	0.0	0.2	80.4
Cu-2	4	64.7	35.3	0.1	93.1	4	100.0	0.0	0.05	95.1
Cu-3	7	52.9	47.1	0.09	94.5	84.2	15.8	0.04	96.1	96.1
Cu-4		35.3	64.7	0.06	95.9	47.4	52.6	0.04	96.1	96.1
Cu-5		29.4	70.6	0.06	95.9	42.1	57.9	0	100.0	100.0
Cu-6		29.4	70.6	0	100.0	36.8	63.2	0	100.0	100.0
Zn-1	3	100.0	0	0.33	77.2	3	105.3	-5.3	0.42	58.8
Zn-2	3	88.2	11.8	0.21	85.5	3	100.0	0.0	0.26	75.5
Zn-3	3	100.0	0	0.2	86.2	3	100.0	0.0	0.19	81.4
Zn-4	3	94.1	5.9	0.21	85.5	3	100.0	0.0	0.18	82.4
Zn-5	4	88.2	11.8	0.17	88.3	4	100.0	0.0	0.17	83.3
Zn-6	3	88.2	11.8	0.16	89.0	3	100.0	0.0	0.16	84.3
Cd-1	3	94.1	5.9	1.18	18.6	3	105.3	-5.3	0.96	5.9
Cd-2	3	94.1	5.9	1.07	26.2	3	105.3	-5.3	0.64	37.3
Cd-3	3	94.1	5.9	0.4	72.4	3	105.3	-5.3	0.44	56.9
Cd-4	3	88.2	11.8	0.14	90.3	3	100.0	0.0	0.12	88.2
Cd-5	3	76.5	23.5	0.05	96.6	3	94.7	5.3	0	100.0
Cd-6	3	76.5	23.5	0	100.0	3	94.7	5.3	0	100.0
处理	巨桉					直杆蓝桉				
CK	3	100.0	0.0	2.07	0.0	3	100.0	0.0	5.99	0.0
Cu-1	3	95.0	5.0	0.31	85.0	4	90.0	10.0	0.62	89.6
Cu-2		75.0	25.0	0.2	90.3	80.0	20.0	0.20	96.7	96.7
Cu-3		35.0	65.0	0.2	90.3	60.0	40.0	0.15	97.5	97.5
Cu-4		20.0	80.0	0.18	91.3	45.0	55.0	0.11	98.2	98.2
Cu-5		15.0	85.0	0.17	91.8	35.0	65.0	0.05	99.2	99.2
Cu-6		10.0	90.0	0.13	93.7	35.0	65.0	0.00	100.0	100.0
Zn-1	3	95.0	5.0	0.3	85.5	3	95.0	5.0	1.00	83.3
Zn-2	3	100.0	0.0	0.18	91.3	3	90.0	10.0	0.33	94.5
Zn-3	4	95.0	5.0	0.07	96.6	3	90.0	10.0	0.23	96.2
Zn-4	4	90.0	10.0	0	100.0	4	90.0	10.0	0.20	96.7
Zn-5	4	85.0	15.0	0	100.0	4	80.0	20.0	0.14	97.7
Zn-6	4	85.0	15.0	0	100.0	4	80.0	20.0	0.13	97.8
Cd-1	3	95.0	5.0	1.38	33.3	3	85.0	15.0	4.87	18.7
Cd-2	3	95.0	5.0	0.35	83.1	4	100.0	0.0	1.97	67.1
Cd-3	3	95.0	5.0	0.27	87.0	3	90.0	10.0	0.86	85.6
Cd-4	3	90.0	10.0	0.15	92.8	3	90.0	10.0	0.23	96.2
Cd-5	3	85.0	15.0	0.06	97.1	3	85.0	15.0	0.10	98.3
Cd-6	4	70.0	30.0	0	100.0	3	80.0	20.0	0.00	100.0

注:表中各处理值均为3个重复的平均值;Cu-1表示铜浓度为50 mg/kg,其它依此类推;发芽高峰期出现的时间中“/”表示未出现发芽高峰期;种子发芽率是以对照(CK)发芽率为100%折算。

表2与图1的结果显示了铜、锌、镉重金属污染对巨桉种子的发芽影响情况,它与邓恩桉、本沁桉有着共

同的特点,都对重金属铜较锌与镉敏感,在铜浓度为500 mg/kg时,发芽抑制率达到90.0%,而锌与镉对种

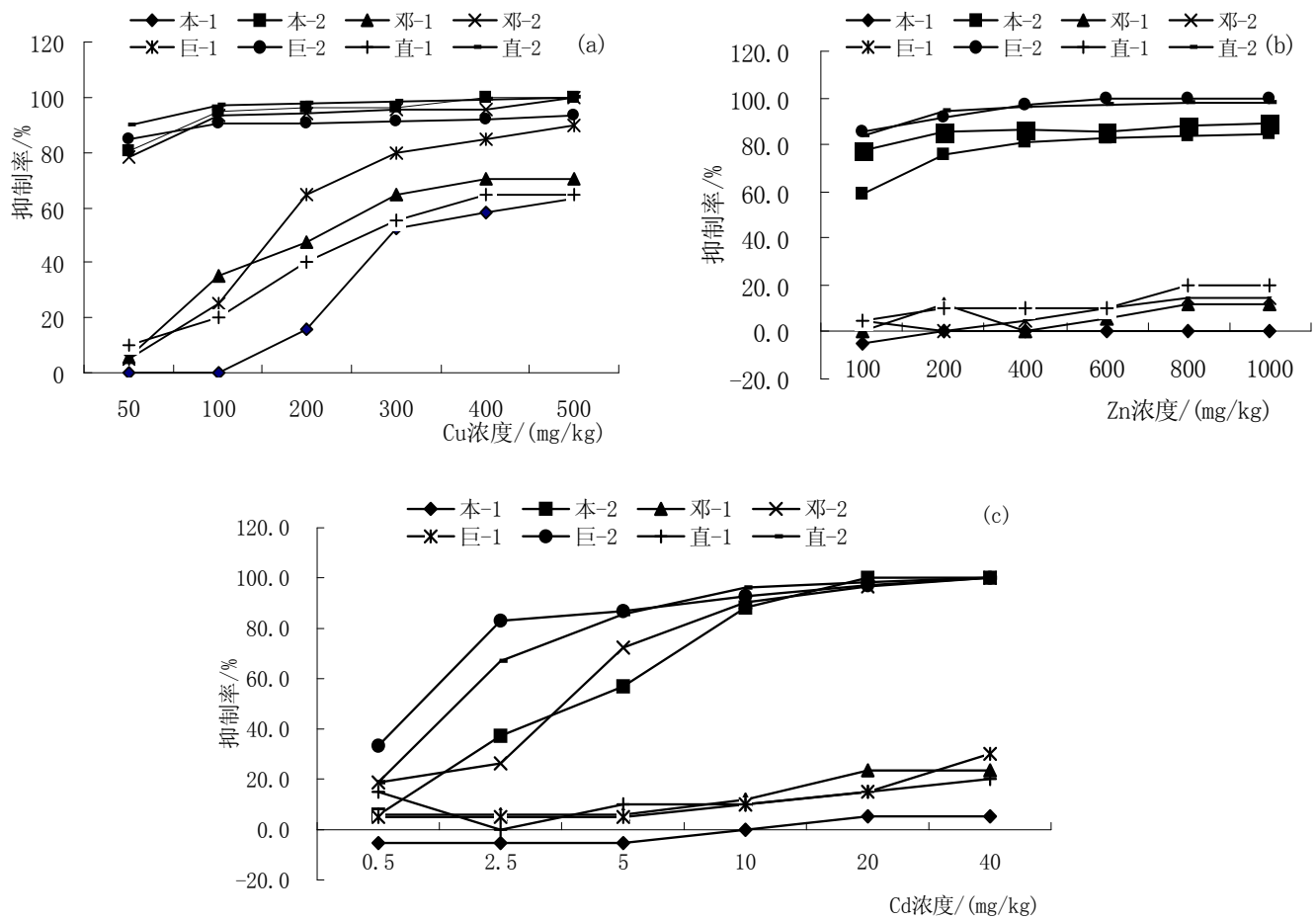


图1 铜锌镉污染对桉树种子发芽与根伸长抑制率的影响比较

注:本:本沁桉;邓:邓恩桉;巨:巨桉;直:直杆蓝桉;1:种子发芽率,2:根伸长抑制率。

子最大的抑制率均低于30.0%。此外,图1还显示巨桉种子发芽抑制率随浓度增大而增大的特点,这也与邓恩桉、本沁桉相似。

铜污染对直杆蓝桉种子发芽率的影响较锌与镉大,在400 mg/kg与500 mg/kg的铜处理下,直杆蓝桉种子发芽抑制率达到65%,而在锌和镉处理下的种子发芽率最大抑制率也不超过20%,由此认为直杆蓝桉与邓恩桉、本沁桉和巨桉一样对铜污染比较敏感。直杆蓝桉种子发芽抑制率随着重金属铜、锌的浓度的增

大而逐渐增大,但直杆蓝桉对镉重金属的反应却表现为随镉浓度增大,种子发芽抑制率呈先降低后逐渐增大趋势,这种现象类似于锌污染对巨桉种子发芽抑制率的影响。

通过建立重金属(铜锌镉)质量分数与种子发芽率之间的回归模型(表3),发现除个别情况外(锌与邓恩桉、本沁桉,镉与直杆蓝桉),各重金属质量分数与种子发芽率之间均存在显著或极显著的回归关系,这也进一步说明重金属对种子发芽率存在的显著或极显著的影响。

表3 3种重金属浓度(x)与桉树种子发芽抑制率(y₁)、根伸长抑制率(y₂)的关系

树种	重金属浓度	回归模型	相关系数	F值	α值
	铜浓度(x ₁)	y ₁ =4.333+12.771x ₁	0.9403	19.5967	<0.05
		y ₂ =81.333+3.33x ₁	0.8410	6.6893	<0.10
邓恩桉	锌浓度(x ₂)	y ₁ =0.393+1.854 x ₂	0.5980	1.96	不显著
		y ₂ =78.667+1.892 x ₂	0.8429	6.9074	<0.10
	镉浓度(x ₃)	y ₁ =-1.92+4.191x ₃	0.9081	16.991	<0.05
		y ₂ =3.770+18.167x ₃	0.9397	5.0328	<0.10

(续表 3)

树种	重金属浓度	回归模型	相关系数	F 值	α 值
本沁桉	铜浓度(x_1)	$y_1=15.043x_1-21.067$	0.9511	45.8129	<0.01
		$y_2=3.221x_1+83.333$	0.8281	6.0580	<0.10
	锌浓度(x_2)	$y_1=0.757x_2-3.533$	0.6547	2.0833	不显著
		$y_2=4.342x_2+62.418$	0.8362	6.4140	<0.10
	镉浓度(x_3)	$y_1=2.574x_3-9.893$	0.9242	14.3677	<0.05
		$y_2=19.72x_3-4.314$	0.9642	6.0051	<0.01
巨桉	铜浓度(x_1)	$y_1=17.714x_1-3.667$	0.9424	23.3359	<0.01
		$y_2=1.394x_1+85.539$	0.8928	10.7834	<0.05
	锌浓度(x_2)	$y_1=2.857x_2-1.667$	0.8827	20.6697	<0.05
		$y_2=2.912x_2+85.378$	0.1649	13.6743	不显著
	镉浓度(x_3)	$y_1=4.571x_3-4.333$	0.8698	295.0311	<0.01
		$y_2=10.89x_3+44.09$	0.8233	2.2873	<0.05
直杆蓝桉	铜浓度(x_1)	$y_1=12.143x_1$	0.9709	49.3968	<0.01
		$y_2=1.712x_1+90.863$	0.8605	7.6087	<0.10
	锌浓度(x_2)	$y_1=3.0x_2+2.0$	0.9165	20.0132	<0.05
		$y_2=2.361x_2+86.088$	0.7967	4.8012	<0.10
	镉浓度(x_3)	$y_1=2.0x_3+4.667$	0.5477	3.4503	不显著
		$y_2=14.591x_3+26.589$	0.8702	2.6278	<0.10

2.1.2 对发芽过程的影响 如前所述,铜、锌、镉对4种桉树种子发芽率的影响迥然不同,但从表2可以发现,重金属对4种桉树种子发芽过程的影响却差异不大。以种子发芽高峰期来说,总体上可以看出,铜污染对各树种种子发芽高峰期的影响较锌与镉明显,除50 mg/kg外其他浓度的铜污染下,各种子发芽高峰期出现推迟1天、4天或未出现发芽高峰期的现象。而在锌与镉污染下,各树种种子发芽高峰期基本上仍然是第3天(与CK相同),个别情况也仅推迟一天。

尽管如此,不同重金属污染对桉树种子发芽过程的影响还是有一定的差异,特别是锌对巨桉和直杆蓝桉种子发芽过程的影响,在锌污染的6种浓度中就有3~4种的种子发芽高峰出现在第4天,比对照(CK)推迟了一天,由此说明巨桉、直杆蓝桉种子的发芽过程对锌较邓恩桉和本沁桉敏感。

2.2 铜、锌、镉污染对4种桉树种子根伸长的影响

与对种子发芽率影响相比(图1),重金属对根伸长的抑制效应强烈得多。重金属污染对邓恩桉种子根伸长的影响大,未受污染条件下(CK),邓恩桉种子的平均根长为1.45 cm,而在受到污染后只有浓度相对较低的镉污染水平邓恩桉的种子才出现较长的根,铜和锌在6种不同浓度的处理中种子的根都很短,根伸长抑制率达80%以上,这说明邓恩桉对重金属污染非常敏感,也说明了重金属污染对邓恩桉的繁殖、种植、生

长有显著的影响。此外,不同污染物下邓恩桉根伸长抑制率与重金属浓度之间的相关性均较大(表3),而且从表2可以发现,重金属对邓恩桉根伸长抑制率要远大于对种子发芽的抑制率,究其原因主要是种子发芽和根伸长的生长过程不一样原因。因为种子发芽所需要的营养来源主要是来自种子内部的胚乳,种子发芽受外界的影响比较小^[8],其受到外界环境即重金属污染的影响比较小。根作为植物主要的吸收器官,从一开始就完全暴露在重金属溶液中,其生长和发育的全过程都将受到重金属污染的影响。因此,根对重金属污染的反应更敏感,致使根伸长抑制率较高,这与前人在其他领域的研究结果相似^[9-12]。

重金属污染对本沁桉种子根伸长的影响差异较大,抑制效应强烈得多。如100 mg/kg的铜对本沁桉种子发芽抑制率为0,但是它对其根伸长抑制率达到了95%。锌对本沁桉种子发芽不仅没有抑制作用,有时还起促进作用,但不同浓度的锌污染对本沁桉种子根伸长均存在抑制效应。镉也有类似的情况。通过比较铜、锌、镉单一污染时本沁桉种子发芽与根伸长的抑制效应,以剂量一效应关系作图,并进行回归分析(表3)可以看出,铜、锌和镉浓度与本沁桉种子发芽抑制率之间存在显著或者较显著的回归关系。

从铜、锌和镉对巨桉根伸长抑制效应来看,锌对其影响要强于铜和镉,锌污染浓度一旦超过600 mg/kg,

巨桉根伸长完全受到抑制,但这种现象在铜与镉不同处理下很少出现,另外,同一污染物对巨桉根伸长的影响普遍高于邓恩桉和本沁桉,可见巨桉种子对镉的敏感度比邓恩桉和本沁桉强。从根伸长抑制率(y_2)与重金属浓度(x)之间的关系看,其相关系数分别为0.8928、0.1649、0.8233,显著度较低或不显著,这并不是说重金属浓度与巨桉种子根伸长抑制率没有关系,而是因为种子对镉在设计的浓度范围内敏感,抑制率多达到100%,从而出现相关性低(0.1649)的情况。

直杆蓝桉在铜、锌污染各处理下根伸长均相当困难,抑制率多达90%以上,只有在较低浓度下的镉污染下才长出一定长度的根,如在0.5 mg/kg、2.5 mg/kg、5 mg/kg 镉浓度下,经过20天的试验期后,直杆蓝桉种子根长分别为4.87 cm、1.97 cm、0.86 cm,此时根伸长抑制率分别为18.7%、67.1%、85.6%。重金属浓度与直杆蓝桉根伸长抑制率之间的相关系数分别为0.8605、0.7967和0.8702,显著程度相对较低,表现出与巨桉相类似的结果。

3 小结与讨论

开展重金属对高等植物种子发芽、根伸长抑制效应研究,是高等植物优良种源培育、重金属可富集植物筛选等研究工作的基础。笔者以邓恩桉、本沁桉、巨桉、直杆蓝桉为研究对象,探讨重金属污染对4种桉树种子发芽和根伸长抑制效应试验,这对中国营造速生、丰产、优质的人工林有十分重要的意义。

研究结果表明铜、锌、镉对4种桉树种子发芽与根伸长均具有明显的抑制效应,受重金属污染的桉树种子发芽率降低,但是种子的发芽过程受到的影响不大。与种子发芽抑制率相比,重金属对根伸长的抑制率要大得多,铜、锌对种子的根伸长抑制率普遍达到100%,仅有浓度较低的镉对根伸长抑制率低一点。另外,重金属质量分数与种子发芽抑制率、根伸长抑制率之间普遍存在显著的相关性。通过比较还发现,邓恩桉、本沁桉、巨桉、直杆蓝桉这4种桉树能够耐受较高浓度的镉污染,对铜的抵抗力最弱,根据 Grill 关于在

一些抗性比较强的植物中,只有很少部分的铜离子被结合到铜结合体中,而铜敏感性植物却能大量合成铜离子结合体理论^[13],认为这4种桉树均为铜敏感植物。

随着重金属污染研究的不断深入,以及毒物联合作用的毒性、拮抗作用、加和作用等概念的提出,复合污染研究成为环境科学发展的重要方向之一,有必要进一步开展关于桉树种子重金属复合污染效应以及重金属在桉树苗木中的累积、迁移与分布等方面的研究,另外,关于重金属影响桉树种子发芽与根伸长等现象的生理学原理均需进一步的深入研究。

参考文献

- [1] Koeppel DE. The uptake, distribution, and effect of cadmium and lead in plant[J]. *Sci Tot Environ*, 1977, 7:197-206.
- [2] Asami T. Maximum allowable limits of heavy metals in rice and soil [M]//Kitagishi K, Yamane L eds. *Heavy Metal Pollution in Soil of Japan*. Tokyo: Japan Science Society Press, 1981, 251-274.
- [3] 余雪标,龙腾,杨为东,等.我国桉树人工林经营及研究现状[J]. *热带农业科学*, 1999, (3):596-650.
- [4] 徐大平,张宁南.桉树人工林生态效应研究进展[J]. *广西林业科学*, 2006, 35(4):179-189.
- [5] 王化可,李辉,陈发扬.浅析重金属镉的生态效应及其毒性作用[J]. *西南民族大学学报:自然科学版*, 2005, 31(6):911-916.
- [6] 高志岭,刘建玲.磷肥施用与福污染的研究现状及防治对策[J]. *河北农业大学学报*, 2001, 24(3):90-94.
- [7] 张建新,纳明亮,徐明岗.土壤 Cu Zn Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制及毒性效应[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(3):945-949.
- [8] 周云龙主编. *植物生物学* [M]. 高等教育出版社, 2004:25-39.
- [9] 宋玉芳,许华夏,任丽萍,等.土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性效应[J]. *环境科学*, 2002, 23(1):103-2107.
- [10] 郑文教,王文卿,林鹏.九龙江口桐化红树林对重金属的吸收与累积[J]. *应用与环境生物学报*, 1996, 2(3):207-213.
- [11] 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.
- [12] 秦天才,吴玉树.镉铅及相互作用对小白菜生理生化特性的影响[J]. *生态学报*, 1994, 14(1):46-49.
- [13] Grill E. Phytochelatins, a class of heavy-metal binding peptides of from plants are functionally analogous to metallothioneins[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. 1987, 84:439-443.