

doi:10.16779/j.cnki.1003-5508.2017.04.004

5种草坪草种在镉胁迫下的萌发响应

杨婧*, 张晓蓉¹, 鲁松²

(1. 成都市华阳中学, 四川 成都 610213; 2. 四川省自然资源科学研究院, 四川 成都 610015)

摘要:通过发芽试验法比较了重金属镉胁迫下5种草坪草种的萌发响应情况,比较了几种草坪草种对镉的耐受性。实验以百三叶、紫花苜蓿、狗牙根、日本结缕草、马尼拉作为实验材料,比较其在不同浓度镉离子溶液处理下的发芽率、发芽指数及毒害率的变化。实验结果表明,随镉离子浓度增大,5种草坪草种发芽率均减小,毒害率均增大,发芽指数在整体上呈现减小的趋势。5种草坪草对镉离子的耐受性大小为:马尼拉>日本结缕草>百三叶>紫花苜蓿>狗牙根,低浓度的镉处理会促进马尼拉种子的萌发。本研究的结果为治理镉污染时草坪草的选种提供了参考,也为研究草坪草种在重金属胁迫中的防御机制提供了依据。

关键词:草坪草;镉胁迫;种子萌发

中图分类号:S722.3 文献标识码:A 文章编号:1003-5508(2017)04-0015-06

Seed Germination of Five Turf Grasses under Cadmium Stress

YANG Jing^{1*} ZHANG Xiao-rong¹ LU Song²

(1. Chengdu Huayang High School, Chengdu 610213, Sichuan, China;

2 Sichuan Natural Resources Science Academy, Chengdu 610015, Sichuan, China)

Abstract: In this article, tests were conducted on the seed germination of five kinds of turf grass under Cadmium stress. Comparisons were made on the changes of germination rate, germination index and toxicity rate of *Trifolium repens*, *Medicago sativa*, *Cynodon dactylon*, *Zoysia japonica* and *Zoysia matrella* under different concentrations of Cd²⁺ treatments. The results showed that higher Cd²⁺ concentration decreased the seeds germination rate, and increased the toxicity rate. The germination index showed a decreasing tendency to all grasses on the whole. The tolerance to Cd²⁺ successively diminished for *Zoysia matrella*, *Zoysia japonica*, *Trifolium repens*, *Medicago sativa*, and *Cynodon dactylon*. The low concentration of Cadmium treatment promoted the germination of *Zoysia matrella*. The study provided reference for the seed selection of turf grass in reducing Cd²⁺ pollution, and also laid a foundation in the study of the defense mechanism for turf grass under heavy metal stress.

Key words: Turf grass, Cadmium stress, Seed germination

近年来,人们对环境保护的重视程度在逐渐增强。我国也在不断关注环境问题,其中的重金属污染问题更是不断被提及。环境中的重金属污染包括大气、水体、土壤三个方面的污染^[1]。而土壤作为

植物生长的基础,一旦受到重金属污染,不仅会影响植物生长,而且部分受污染的农作物或饲草中的有害金属也将通过食物链影响到动物和人类的身体健康。在所有重金属中,Cd是毒性很强的一种重金

收稿日期:2017-04-11

作者简介:杨婧(2000-),女。E-mail:1341043921@qq.com,*为通讯作者。

属,也是农田受污染最普遍的重金属之一,是国际上认定的重点环境污染物^[2]。此外,Cd在生物体内迁移性比较强,在人体中累积达到一定程度,会造成慢性中毒^[3]。典型的Cd中毒事件曾发生在日本神通川地区,当地居民因食用了被Cd废水污染了的稻米而被卷入了骨痛病的阴霾。据不完全统计,我国重金属Cd污染农田面积已超过28万hm²,对农产品质量安全和人畜健康构成严重威胁^[4]。由此可见,治理土壤中的重金属污染已经刻不容缓。目前重金属污染土壤治理和修复方法可分为工程物理化学法、土壤农化调控法和生物学修复法。其中,生物学修复法中的植物修复技术这种新兴的,高效的途径,正逐渐被人们接受^[5]。

草坪草作为城市绿化的重要组成部分,具有适应能力强,抗逆性强,繁殖能力强,分布范围广的优点。选用草坪草来治理重金属污染,是一种可操作性较强的办法。本研究结合文献资料^[6~11],选取百三叶、马尼拉、日本结缕草、紫花苜蓿、狗牙根这5种草坪草种为研究对象,探讨不同草坪草种对镉胁迫的响应状况,为重金属污染土壤中草坪草种植的适宜性研究提供参考,也为研究草坪草种在重金属胁迫中的防御机制提供了依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

百三叶(*Trifolium repens* L.)、狗牙根(*Cynodon dactylon* L.)、紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、日本结缕草(*Zoysia japonica* Steud.)、马尼拉(*Zoysia matrella*),采购于网上种子公司,所有选择的材料皆为无包衣处理的种子,经预试验比较选择种子活力在95%以上的购自四川省百汇草业有限责任公司的5种种子作为实验材料。

1.2 实验方法

1.2.1 溶液配制

依据中华人民共和国国家土壤环境质量标准(GB 15618-2008)3级土壤环境标准量进行配制,共设置7个浓度镉梯度:0 mg·kg⁻¹,1 mg·kg⁻¹,50 mg·kg⁻¹,100 mg·kg⁻¹,150 mg·kg⁻¹,300 mg·kg⁻¹,500 mg·kg⁻¹。同时设置对照处理。

1.2.2 处理方法

采用发芽实验法,将5种草坪草种子各选100粒进行实验。将其用蒸馏水洗净后,用0.5%次氯

酸钠溶液消毒30 min,再用蒸馏水冲洗干净。取直径为90 mm的培养皿,皿内以双层滤纸为发芽床,测定发芽率并设置3个重复。

根据测定的种子活力,选取种子活力95%以上的草坪草种子进行试验。先通过测量百粒重得到种子千粒重,再将选用草种用蒸馏水洗净,用0.5%次氯酸钠溶液消毒30 min。然后取直径为90 mm的培养皿,皿内以双层滤纸为发芽床,每皿内均匀放置100粒种子。最后将配置好的镉离子溶液加入培养皿中,每个处理重复3次。采用人工气候箱变温培养模式,模拟自然环境条件,白天取14 h,设置为25℃,夜晚取10 h,设置为20℃。并测量其发芽率和发芽势及毒害率。

1.2.3 指标测定

千粒重 = $10 \times \bar{X}$; (S) = $\sqrt{\frac{n(\sum X^2) - (\sum X)^2}{n(n-1)}}$ 式中,X = 各重复重量(g) N = 重复次数;变异系数(C) = $\frac{S}{\bar{X}} \times 100\%$ 其中,S = 标准差, \bar{X} = 100粒种子的平均质量(g);发芽率 = 发芽种子数/种子总数 × 100%;发芽指数(GI) = $\sum Gt/Dt$,Dt——发芽日数,Gt——与Dt相对应的每天发芽种子数;毒害率 = 毒害种子数/发芽种子数 × 100%。

1.3 数据统计分析

数据分析及统计作图使用SPSS19.0及excel进行。使用SPSS19.0软件对各指标进行一元方差分析(ANOVA),平均数间的多重比较采用Duncan's检验(P < 0.05)。

2 实验结果

2.1 种子千粒重

从表1可以看出,5种草坪草种的千粒重变异系数均小于5%,符合实验要求。

表1 不同草坪草的种子千粒重
Tab. 1 The thousand-grain weight of 5 turf grasses

	百三叶	狗牙根	紫花苜蓿	日本结缕草	马尼拉
平均重量	0.700	0.159	2.104	3.947	2.735
标准差	0.021	0.008	0.071	0.129	0.112
变异系数	2.99%	4.98%	3.39%	3.26%	4.09%

2.2 种子活力

从表2中可以看出,几种所购买的该批次5种

草坪草的种子活力都在 98% 以上,符合本试验的要求。

表 2 5 种草坪草的种子活力

Tab. 2 The seed vigor of 5 turf grasses

百三叶	狗牙根	紫花苜蓿	日本结缕草	马尼拉
98.67 ± 2.31	99.33 ± 1.15	99.33 ± 1.15	99.33 ± 1.15	100 ± 0
5.33	1.33	1.33	1.33	0

表 3

不同浓度镉处理对百三叶种子发芽的影响

Tab. 3

Effect of heavy Cd²⁺ treatment on seed germination rates of *Zoysia matrella*

镉处理	第 3 天	第 5 天	第 7 天	第 9 天	第 11 天	第 13 天	第 15 天	第 17 天
ck	38.3 ± 4.72d	81.3 ± 7.23d	87.67 ± 1.53d	89.67 ± 3.21d	97.3 ± 1.53d	98.67 ± 2.31e	98.67 ± 2.31e	98.67 ± 2.31e
1 mg·kg ⁻¹	34 ± 6.24cd	71 ± 2.65c	82.67 ± 8.39cd	89.67 ± 2.08d	96 ± 5.19d	98.67 ± 0.58e	98.67 ± 0.58e	98.67 ± 0.58e
50 mg·kg ⁻¹	28 ± 5bc	72 ± 3.6c	79 ± 7.94cd	84.3 ± 4.51cd	85 ± 3.61c	85.3 ± 3.51cd	85.3 ± 3.51cd	85.3 ± 3.51cd
100 mg·kg ⁻¹	23.7 ± 3.21ab	73.3 ± 3.79cd	76 ± 7c	86 ± 2d	86.3 ± 2.08c	86.3 ± 2.08d	86.3 ± 2.08d	86.3 ± 2.08d
150 mg·kg ⁻¹	18 ± 3.6a	72.67 ± 3.06c	72.67 ± 3.06c	78 ± 5.57c	79.67 ± 3.51c	79.67 ± 3.51c	79.67 ± 3.51c	79.67 ± 3.51c
300 mg·kg ⁻¹	20.7 ± 4.61ab	47.3 ± 6.35b	47.3 ± 6.35b	54.3 ± 6.35b	55.67 ± 4.04b	55.67 ± 4.04b	55.67 ± 4.04b	55.67 ± 4.04b
500 mg·kg ⁻¹	15.7 ± 1.15a	26 ± 4.36a	26 ± 4.36a	32.3 ± 4.73a	33.67 ± 5.86a	34 ± 5.29a	34 ± 5.29a	34 ± 5.29a
P > F _c	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

同列中不同字母表示不同处理间同一性状在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯式新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test. ns, no significant; *, $0.01 < P \leq 0.05$; **, $0.001 < P \leq 0.01$; ***, $P \leq 0.001$ 。

从表 4 可以看出,实验组发芽率均不高于对照组,这说明镉离子对狗牙根表现为无明显作用或抑制作用。镉离子为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度处理时和对照组无明显差异, $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上浓度的镉离子处理时则与对照表现出了明显差异,镉离子

2.3 镉离子胁迫对 5 种草坪草种发芽率影响

从表 3 可以看出,百三叶种子在不同浓度镉处理下发芽率均低于对照组,当镉离子浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,镉离子开始显著抑制百三叶发芽。从发芽时间上看,镉离子浓度越大,发芽的高峰期越早结束,也表明镉离子的抑制作用与镉离子浓度呈正相关。

浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,狗牙根几乎不萌发,说明已达到致死剂量。从发芽势来看,镉离子浓度越大,发芽结束的时间越提前,说明镉离子浓度越高,抑制狗牙根的作用越明显。

表 4

不同浓度镉处理对狗牙根种子发芽的影响

Tab. 4

Effect of heavy Cd²⁺ treatment on seed germination rates of *Cynodon dactylon*

镉处理	第 5 天	第 7 天	第 9 天	第 11 天	第 13 天	第 15 天	第 17 天	第 19 天	第 21 天	第 23 天
ck	13.3 ± 2.31c	29.3 ± 3.05c	47.3 ± 2.52e	70.3 ± 1.53f	84.67 ± 1.15f	94.67 ± 2.51f	97.67 ± 4.04e	99.3 ± 1.15f	99.3 ± 1.15f	99.3 ± 1.15f
1 mg·kg ⁻¹	14.3 ± 3.79c	28.67 ± 5.51c	44.3 ± 5.13e	60 ± 8.54e	66 ± 6.08e	74.67 ± 3.21e	95 ± 3e	95.3 ± 2.52f	99.3 ± 2.52f	99.3 ± 2.52f
50 mg·kg ⁻¹	4.67 ± 1.53b	11 ± 2.65b	22.3 ± 4.04d	33.3 ± 6.5d	37 ± 6.08d	43 ± 7.93d	53 ± 8.6d	57 ± 6.56e	60.3 ± 2.31e	60.3 ± 2.31e
100 mg·kg ⁻¹	2.33 ± 0.58ab	7.67 ± 2.51b	15.3 ± 3.06c	25.67 ± 3.21d	30.67 ± 3.06cd	40.3 ± 5.5d	45.67 ± 2.51d	48.67 ± 5.03d	48.67 ± 5.03d	48.67 ± 5.03d
150 mg·kg ⁻¹	0	1.67 ± 1.53a	8 ± 1b	17.3 ± 0.58c	27.3 ± 1.15c	31 ± 2.64c	36.3 ± 2.89c	38 ± 4.58c	38 ± 4.58c	38 ± 4.58c
300 mg·kg ⁻¹	0	0	3.3 ± 3.51ab	8.67 ± 3.78b	15.67 ± 3.79b	22.7 ± 5.78b	23.3 ± 4.61b	23.3 ± 4.62b	23.3 ± 4.62b	23.3 ± 4.62b
500 mg·kg ⁻¹	0	0	0	0.68 ± 1.10a	2 ± 2a	2.67 ± 2.3a	3 ± 2.64a	3 ± 2.64a	3 ± 2.64a	3 ± 2.64a
P > F _c	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

同列中不同字母表示不同处理间同一性状在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯式新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test. ns, no significant; *, $0.01 < P \leq 0.05$; **, $0.001 < P \leq 0.01$; ***, $P \leq 0.001$ 。

从表 5 可以看出,在不同浓度的镉离子浓度处理下,发芽率均低于对照组,说明不同浓度的镉离子对紫花苜蓿均表现为抑制作用。在 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉离子浓度处理中,实验组与对照组相比,表现为发芽更加迟缓,但无明显抑制作用;在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 及更高浓度处理中,镉离子对紫花苜蓿才表现为明显抑制作用。

从表 6 可以看出,在不同浓度镉离子浓度下,实验组发芽率均未达到对照组,说明镉离子对日本结缕草仅有抑制作用。并且在镉离子浓度达到 150

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,开始表现为明显的抑制。从发芽时间上看,日本结缕草的发芽高峰期随镉离子浓度增大而逐渐提前。

从表 7 可以看出,不同浓度镉离子浓度时,实验组发芽率均低于对照组,表明镉离子对马尼拉只有抑制作用。 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时镉离子浓度下马尼拉发芽率与对照组均无明显差异;浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时发芽率与对照组开始出现差异,并且浓度越大,差异越明显。随镉离子浓度增高,马尼拉也表现为发芽高峰期提前。

表5 不同浓度镉处理对紫花苜蓿种子发芽的影响

Tab. 5 Effect of heavy Cd²⁺ treatment on seed germination rates of *Medicago sativa*

镉处理	第3天	第5天	第7天	第9天	第11天	第13天	第15天	第17天
ck	27.3 ± 1.52d	63 ± 1bc	74.3 ± 3.21c	83.67 ± 1.15d	96.3 ± 1.53e	99.3 ± 1.15e	99.3 ± 1.15e	99.3 ± 1.15e
1 mg·kg ⁻¹	24.3 ± 2.89cd	57 ± 4.58b	64.3 ± 1.53b	64.3 ± 1.53b	97.67 ± 1.53e	97.67 ± 1.53e	97.67 ± 1.53e	97.67 ± 1.53e
50 mg·kg ⁻¹	19 ± 1.73ab	63.3 ± 4.16bc	72 ± 2.64c	72 ± 2.64c	83.3 ± 2.52d	83.3 ± 2.52d	83.3 ± 2.52d	83.3 ± 2.52d
100 mg·kg ⁻¹	20.67 ± 3.21bc	67.3 ± 1.53c	71.67 ± 4.04c	71.67 ± 4.04c	74.67 ± 1.53c	74.67 ± 1.53c	74.67 ± 1.53c	74.67 ± 1.53c
150 mg·kg ⁻¹	15 ± 2.65a	61 ± 6bc	64 ± 4b	64 ± 4b	64.3 ± 3.51b	64.3 ± 3.51b	64.3 ± 3.51b	64.3 ± 3.51b
300 mg·kg ⁻¹	17.67 ± 1.53ab	37.67 ± 4.16a	48.67 ± 2.51a	48.67 ± 2.51a	53.67 ± 3.21a	54.3 ± 2.08a	54.3 ± 2.08a	54.3 ± 2.08a
500 mg·kg ⁻¹	15.67 ± 2.31a	36.3 ± 8.5	47.67 ± 5.51a	47.67 ± 5.51a	51.67 ± 8.96a	51.67 ± 8.96a	51.67 ± 8.96a	51.67 ± 8.96a
P > Fc	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

同列中不同字母表示不同处理间同一性状在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯氏新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test. ns, no significant; *, $0.01 < P \leq 0.05$; **, $0.001 < P \leq 0.01$; ***, $P \leq 0.001$.

表6 不同浓度镉处理对日本结缕草种子发芽的影响

Tab. 6 Effect of heavy Cd²⁺ treatment on seed germination rates of *Zoysia japonica*

镉处理	第3天	第5天	第7天	第9天	第11天	第13天	第15天
ck	37.33 ± 1.15c	61.33 ± 4.93c	84 ± 12.17c	97 ± 2.65e	99 ± 1d	99.33 ± 1.15d	99.33 ± 1.15d
1 mg·kg ⁻¹	38.33 ± 2.52c	67.67 ± 11.59c	79 ± 16.37c	89.33 ± 7.57de	98 ± 0d	98.67 ± 1.15d	98.67 ± 1.15d
50 mg·kg ⁻¹	37 ± 2c	60.67 ± 2.52c	75.67 ± 2.52c	85.67 ± 5.86cd	97 ± 1d	99 ± 0d	99 ± 0d
100 mg·kg ⁻¹	36.67 ± 1.15c	67.67 ± 11.72c	81.33 ± 13.65c	90.67 ± 6.43de	96.67 ± 1.15d	98 ± 2d	98 ± 2d
150 mg·kg ⁻¹	37.67 ± 1.53c	58 ± 3c	68 ± 2bc	77.33 ± 3.06c	89.67 ± 2.89c	89.67 ± 2.89c	89.67 ± 2.89c
300 mg·kg ⁻¹	18.67 ± 3.06b	37.67 ± 2.52b	55.67 ± 4.93b	63.33 ± 6.11b	68 ± 5.29b	68 ± 5.29b	68 ± 5.29b
500 mg·kg ⁻¹	6.33 ± 1.53a	13.33 ± 1.53a	17 ± 2.65a	20 ± 2.65a	29.67 ± 4.04a	29.67 ± 4.04a	29.67 ± 4.04a
P > Fc	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

同列中不同字母表示不同处理间同一性状在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯氏新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test. ns, no significant; *, $0.01 < P \leq 0.05$; **, $0.001 < P \leq 0.01$; ***, $P \leq 0.001$.

表7 不同浓度镉处理对马尼拉种子发芽的影响

Tab. 7 Effect of heavy Cd²⁺ treatment on seed germination rates of *Zoysia matrella*

镉处理	第3天	第5天	第7天	第9天	第11天	第13天	第15天	第17天
ck	38.33 ± 1.53cd	61 ± 4.36b	84.33 ± 11.84c	97 ± 2.65d	99.67 ± 0.58d	100 ± 0d	100 ± 0d	100 ± 0d
1 mg·kg ⁻¹	38.67 ± 3.05cd	70.33 ± 9.5b	83.33 ± 11.37c	89 ± 8.18cd	98 ± 1d	99.67 ± 0.58d	99.67 ± 0.58d	99.67 ± 0.58d
50 mg·kg ⁻¹	38.33 ± 1.15cd	60.67 ± 4.04b	77 ± 1c	89 ± 1cd	95.67 ± 2.31d	98 ± 1d	98 ± 1d	98 ± 1d
100 mg·kg ⁻¹	39.67 ± 0.58d	67 ± 11.36b	81.33 ± 13.57c	91 ± 5.57d	97.33 ± 0.58d	98 ± 1.73d	98 ± 1.73d	98 ± 1.73d
150 mg·kg ⁻¹	35 ± 3.46c	63.67 ± 4.16b	68 ± 0c	81.3 ± 6.11c	86 ± 6.08c	91.67 ± 1.15c	91.67 ± 1.15c	91.67 ± 1.15c
300 mg·kg ⁻¹	17 ± 2.65b	27 ± 2.65a	48.33 ± 9.07b	64.67 ± 4.16b	70 ± 9.16b	76.67 ± 6.80b	76.67 ± 6.80b	76.67 ± 6.80b
500 mg·kg ⁻¹	7.67 ± 2.52a	17 ± 4.36a	30.67 ± 5.03a	34.33 ± 3.21a	43 ± 3.60a	43.67 ± 2.52a	43.67 ± 2.52a	43.67 ± 2.52a
P > Fc	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***	0.000 ***

同列中不同字母表示不同处理间同一性状在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯氏新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test. ns, no significant; *, $0.01 < P \leq 0.05$; **, $0.001 < P \leq 0.01$; ***, $P \leq 0.001$.

2.4 镉离子胁迫对5种草坪草种发芽指数影响

从图1可以看出,发芽指数均小于对照组,说明镉离子对百三叶表现为抑制作用。同时,随镉离子浓度增大,百三叶发芽指数整体呈现减小趋势,其中,在镉离子浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,开始出现显著性差异。

从图2可以看出,不同浓度镉离子处理下狗牙根发芽指数均低于对照组,表明不同浓度的镉离子对狗牙根均表现为抑制作用。当镉离子浓度为 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,镉离子对狗牙根表现为显著抑制,并且随镉离子浓度的增大,抑制作用不断增强。

从图3可以看出,实验组紫花苜蓿发芽指数均低于对照组,说明镉离子对紫花苜蓿表现为抑制作

用。当镉离子浓度达到 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,表现为显著抑制,而且镉离子浓度越大,抑制作用越强。

从图4可以看出,实验组不同浓度处理下,发芽指数不高于对照组,说明镉离子对日本结缕草表现为无明显作用或者抑制作用。镉离子浓度变为 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,发芽指数与对照组开始出现显著差异,并且镉离子浓度越大,差异越显著。

从图5可以看出,马尼拉种子除在 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉离子浓度处理时发芽指数略高于对照组外,在其它不同浓度镉离子处理下,发芽指数均低于对照组,表明镉离子在低浓度下,有微弱的促进种子萌发的作用,但在高浓度时则表现为抑制。在镉离子浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,发芽指数与对照组出现显著差

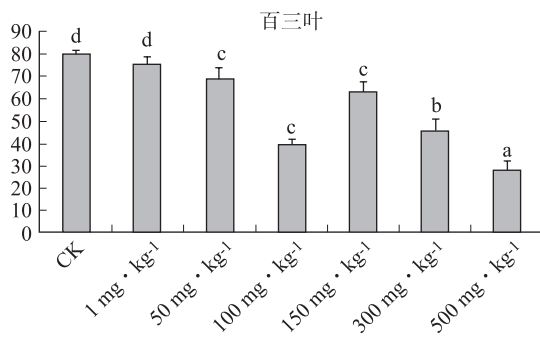


图1 不同浓度镉处理下百三叶的发芽指数

Fig. 1 The effects of Cd²⁺ treatment on the germination index of *Zoysia matrella* seed

不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯式新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

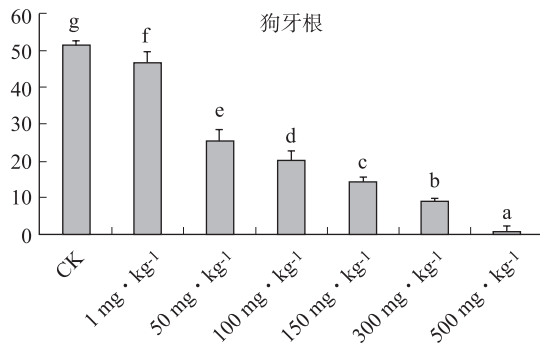


图2 不同浓度镉处理下狗牙根的发芽指数

Fig. 2 The effects of Cd²⁺ treatment on the germination index of *Cynodon dactylon* seed 不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯式新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

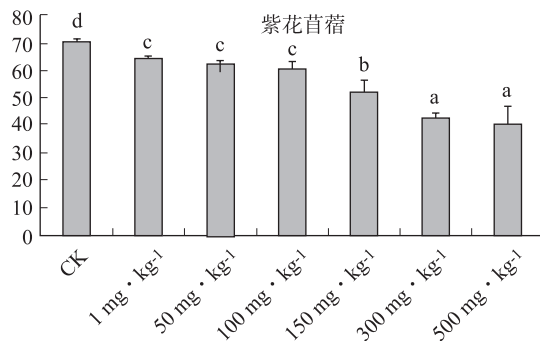


图3 不同浓度镉处理下紫花苜蓿的发芽指数

Fig. 3 The effects of Cd²⁺ treatment on the germination index of *Medicago sativa* seed

不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯式新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

异,表明此时抑制作用显著,而且随镉离子浓度的增大,抑制作用逐渐增强。

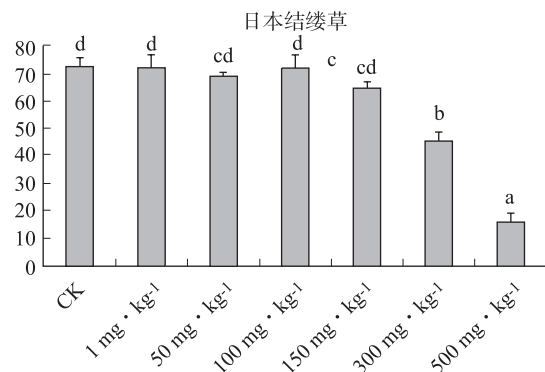


图4 不同浓度镉处理下日本结缕草的发芽指数

Fig. 4 The effects of Cd²⁺ treatment on the germination index of *Zoysia japonica* seed

不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯式新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

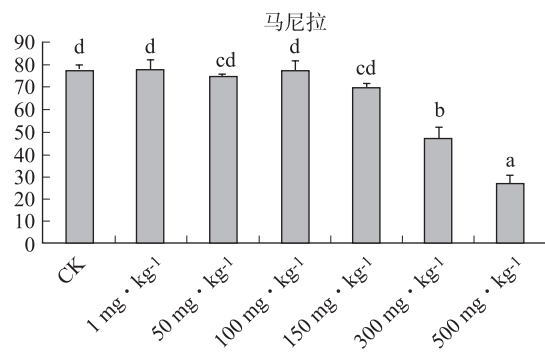


图5 不同浓度镉处理下马尼拉的发芽指数

Fig. 5 The effects of Cd²⁺ treatment on the germination index of *Zoysia matrella* seed

不同字母表示不同处理间在 $P < 0.05$ (Duncan's multiple range test 邓肯式新复极差法) 水平上的显著差异。Values followed by the same letter in the same column are not significantly different at the $P < 0.05$ level according to Duncan's multiple range test.

2.5 镉离子胁迫对五种草坪草种毒害率影响

从图6可以看出,在镉离子浓度较低时,无明显毒害作用,随镉离子浓度不断增大,镉离子对草种的毒害率不断增大。可以明显看出,狗牙根在任何镉离子浓度处理下,毒害率都最大,表明狗牙根对镉离子胁迫抗性最小。从 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉离子浓度处理时,百三叶毒害率均大于日本结缕草,但在 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉离子处理时,日本结缕草毒害率大于百三叶,这可能说明百三叶在低浓度时抗性不强,高浓度时抗性较强。紫花苜蓿 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,毒害率和百三叶相当,在 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

kg^{-1} 镉离子浓度处理下,毒害率比百三叶小,表明其对镉离子胁迫抗性比百三叶强。马尼拉在镉离子浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,才开始被毒害,说明马尼拉抗性较强。 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 5 种草坪草对镉离子耐性大到小依次为:马尼拉 > 日本结缕草 > 百三叶 > 紫花苜蓿 > 狗牙根; $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 5 种草坪草对镉离子耐性大到小依次为:紫花苜蓿 > 马尼拉 > 百三叶 > 日本结缕草 > 狗牙根。

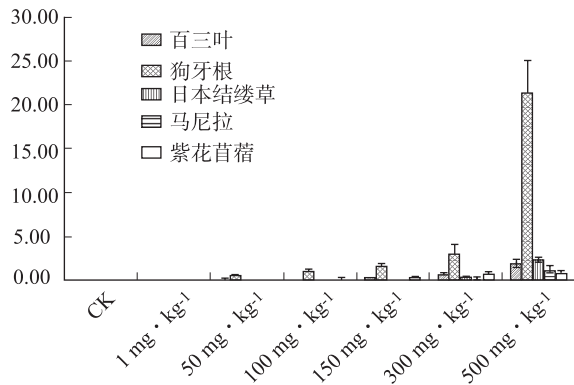


图6 不同浓度镉处理对各草坪草的毒害率

Fig. 6 The toxicity rate of different turf grasses seeds treated with different concentration of Cd^{2+}

3 讨论

本实验中镉离子浓度处理时,实验组发芽率均低于对照组,说明镉离子对 5 种草坪草种萌发都表现出抑制作用,只是抑制程度不同。镉离子浓度较低时,5 种草种均无明显被抑制现象,但随浓度升高,镉离子逐渐开始抑制草种萌发,并且抑制作用随浓度增大不断增强。其中,百三叶、狗牙根、紫花苜蓿在达到 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉离子浓度时开始有显著抑制作用,并且镉离子浓度越大,抑制作用越强。日本结缕草和马尼拉则是在镉离子浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时开始显著抑制, $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 到 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时抑制作用更强。

从发芽时间来看,随镉离子浓度增大,5 种草坪草种的发芽高峰期逐渐提前并且持续的时间逐渐变短,发芽的数量也逐渐变少,这也说明镉离子浓度越高,抑制作用越强。从发芽指数来看,大部分草坪草种在镉离子浓度增大时都表现为抑制作用加强,但也有少部分草坪草种表现为低浓度时略高,高浓度时较低。

韩宝贺等发现:在 $0 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $100 \mu\text{mol} \cdot$

L^{-1} 、 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $300 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd^{2+} 胁迫下,百三叶的发芽率、发芽势、发芽指数、胚芽及胚根长度均随 Cd^{2+} 浓度的增加呈下降趋势^[7]。陈伟等研究发现在镉离子浓度为 $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时百三叶发芽率为 82%^[8]。宋凤鸣等发现在镉离子浓度为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,百三叶发芽率为 80%^[12]。慈恩等发现, Cd^{2+} 浓度为 $0 \sim 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对紫花苜蓿发芽率的影响不显著,但对发芽势的影响较明显;当浓度达 $30 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 后对发芽的抑制作用表现非常明显,发芽势和发芽率均急剧下降^[13]。尹国丽等研究发现 Cd 胁迫显著抑制紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长,种子发芽势、发芽率及幼苗的胚芽长、胚根长和干重均随着 Cd 处理浓度提高显著降低,且对发芽势的抑制作用大于发芽率^[14]。马敏等发现低浓度镉离子对狗牙根有一定促进作用^[15]。本研究结果与韩宝贺、陈伟、宋凤鸣、慈恩、尹国丽等结论一致或相近,与马敏等实验结果不同。笔者推测原因可能是草坪草种的来源地不同、保存方法不同或者是选用对材料的处理不完全相同。少数草坪草种发芽指数呈现出低浓度略高,高浓度略低,笔者推测这可能是因为低浓度的镉离子对种子胚产生一定刺激作用,提高了胚的生理活性,而高浓度的镉离子对胚、芽产生了伤害作用,抑制了淀粉酶、蛋白酶活性,即抑制种子内淀粉和蛋白质的分解,从而影响了种子萌发,使其受到抑制^[16]。但百三叶在镉离子浓度为 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时受到较强抑制作用,日本结缕草在 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉离子处理下受到较大抑制作用下发芽指数较低,笔者推测这可能与细胞内部机制有关。

总体来看,5 种草坪草在镉离子不同浓度下抗性大小依次为:马尼拉 > 日本结缕草 > 百三叶 > 紫花苜蓿 > 狗牙根。

参考文献:

- [1] 袁祖丽. Cd, Pb 污染对烤烟生理特性及生长发育的影响 [D]. 河南农业大学, 2006.
- [2] 陈飞. 大麦镉吸收与运转机制的研究 [D]. 浙江大学, 2009.
- [3] Alloway B. J. Heavy Metals in Soils [J]. Heavy Metals in Soils, 1995, 85(8):1318 ~ 1324.
- [4] 李玲. 镉胁迫对陆地棉生长发育、产量和品质的影响及其耐镉性的遗传研究 [D]. 浙江大学, 2012.
- [5] 刘磊,肖艳波. 土壤重金属污染治理与修复方法研究进展 [J]. 长春工程学院学报自然科学版, 2009, 10(3):73 ~ 78.

(下转第 24 页)

羯布罗香的树高生长高峰期与其它几个树种略有不同,生长高峰期为12月~2月期间。

4 结论

(1)15a生橡胶林定植的1.5a生5个热带珍贵用材树种苗木,地径生长高峰期基本为每年的6月~8月期间,其生长量分别为格木0.16cm、铁力木0.10cm、羯布罗香0.20cm、望天树0.11cm、海南黄花梨0.40cm,均高于平均值;树高生长高峰期基本为每年10月~12月期间,其生长量分别为格木12.70cm、铁力木16.52cm、望天树29.71cm,均高于其平均值,其中海南黄花梨的树高生长在2月~4月有一个高峰期,其生长量为35.10cm,远高于平均值16.60cm,羯布罗香的树高生长高峰期在12月~2月期间,其生长量为20.03cm,高于平均值11.47cm。

(2)5个热带珍贵用材树种的地径平均年生长量分别为格木0.78cm、铁力木0.42cm、羯布罗香0.96cm、望天树0.6cm、海南黄花梨0.78cm;树高平均年生长量分别为格木70.92cm、铁力木51.36

cm、羯布罗香68.82cm、望天树66.24cm、海南黄花梨99.60cm。

致谢:在本文调查数据过程中,得到了普文试验林场张树明和石从付同志的大力支持,在此一并致谢!

参考文献:

- [1] 王达明. 建设可持续发展的珍贵用材林资源培育产业[J]. 林业实用技术, 2014(9):56~60.
- [2] 孙重明. 西双版纳大力推进珍贵用材林基地建设[J]. 云南林业, 2014(3):23~25.
- [3] 王志伟. 西双版纳州珍贵用材树种发展现状及建议[J]. 现代园艺, 2015(6):144~145.
- [4] 刘绍雄. 西双版纳州扎实推进珍贵用材林基地建设[J]. 云南林业, 2016(3):37~39.
- [5] 杨德军, 邱琼, 钊萍等. 西双版纳州珍贵用材树种发展现状及建议[J]. 山东林业科技, 2013(3):100~103.
- [6] 许林红, 李思广, 蒋云东等. 珍稀树种铁力木. 的保护研究[J]. 四川林业科技, 2015(12):128~130.
- [7] 许林红, 李思广, 蒋云东等. 橡胶林下铁力木和格木生长节律及栽培模式初步研究[J]. 四川林业科技, 2013(12):65~68.
- [8] 宋凤鸣, 刘建华, 吴彩琼, 等. 五种重金属胁迫对百三叶和红三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 亚热带植物科学, 2014, (04):276~280.
- [9] 慈恩, 高明, 王子芳, 等. 镉对紫花苜蓿种子萌发与幼苗生长的影响研究[J]. 中国生态农业学报, 2007, (01):96~98.
- [10] 尹国丽, 师尚礼, 寇江涛, 等. Cd胁迫对紫花苜蓿种子发芽及幼苗生理生化特性的影响[J]. 西北植物学报, 2013, 33(8):1638~1644.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 陈伟, 张苗苗, 宋阳阳, 等. 镉胁迫对4种草坪草抗逆生理特性的影响[J]. 草原与草坪, 2015, (02):65~69.
- [14] 韩宝贺, 朱宏, 张艺馨. 镉对三种草坪草种子萌发与生长的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(3):98~103.
- [15] 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.
- [16] 陈明君, 傅杨武, 周群英, 等. 水体消落带重金属Cu和Cd在双穗雀稗与狗牙根植株中的迁移富集[J]. 贵州农业科学, 2015(3):173~176.
- [17] 白昌军, 韦家少. 暖地型草坪草品种选育及开发利用研究[J]. 草业科学, 1997, 6:61~63.
- [18] 刘建秀. 中国主要暖季型草坪草种质资源的研究与利用[M]. 江苏科学技术出版社, 2011.