

镉胁迫下三种观赏草的生理响应及对铜、锌离子的吸收特性

赵利清^{1,2}, 彭向永², 冀瑞卿³

(1. 国家开放大学 农林医药教学部, 北京 100039; 2. 中国林业科学研究院 林业研究所, 北京 100091;
3. 吉林农业大学 食药菌教育部工程研究中心, 吉林 长春 130118)

摘 要:以狼尾草、大油芒和花叶芒为试材, 采用盆栽法研究了低浓度($0.05 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)和高浓度($0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)镉处理对3种观赏草生长、生理及金属离子吸收的影响, 以期在城市特别是镉污染区观赏草的选择和利用提供参考依据。结果表明: 2种浓度镉处理3种观赏草的生长高度和生物量均有不同程度的变化, 花叶芒高浓度($0.20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)处理与对照存在显著差异($P < 0.05$), 大油芒生长高度对镉比较敏感, 2种浓度与对照处理间都存在显著差异($P < 0.05$), 而狼尾草的生长高度和生物量在镉处理下变化不大, 与对照没有显著差异。2种浓度均可显著提高3种观赏草的游离脯氨酸含量和狼尾草抗坏血酸含量, 但只有高浓度的镉处理能显著提高大油芒和花叶芒的抗坏血酸含量, 低浓度则没有显著影响。高浓度镉处理3种观赏草可溶性蛋白质含量均显著降低($P < 0.05$), 低浓度无显著影响。除了大油芒的丙二醛含量随着镉浓度增加而显著增加外($P < 0.05$), 其它2种的丙二醛含量与对照没有显著差异。综合各项指标可知, 3种草对镉的耐性表现为狼尾草 > 花叶芒 > 大油芒。此外, 3种观赏草对镉均具有较强的累积能力, 在2种浓度下, 3种观赏草叶片中镉含量均显著增加($P < 0.05$); 2种浓度的镉胁迫下, 3种观赏草对锌的吸收均低于对照, 但高浓度的镉胁迫能够提高3种观赏草对铜的吸收。

关键词:观赏草; 镉胁迫; 生理特性; 铜; 锌; 吸收特性

中图分类号:S 688.401 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2017)15-0072-07

随着我国工业化的推进, 矿山开采、化石燃料燃烧和工业废物排放以及农业生产中重金属杀虫剂的大量应用, 导致很多地区的土壤重金属污染^[1]。镉是毒性最强的重金属污染元素之一^[2], 是植物非必要、高毒性元素, 具有相对高的流动性, 能够与钙、铁和锌等必要元素一起被植物吸收。镉不仅会对植物产生毒害作用, 而且还可通

过食物链进入人体, 危害人类健康^[3-5]。近年来关于镉污染的报道也越来越多^[6], 如何去除污染土壤中的镉是当前环保研究中的热点。

植物修复是治理镉污染土壤的重要手段, 目前已发现的镉超积累植物普遍生物量较低、生长缓慢、镉迁移总量较小, 仅适合做抗性机理方面的理论研究^[7]。狼尾草(*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.)、大油芒(*Spodiopogon sibiricus* Trinius.)和花叶芒(*Miscanthus sinensis* 'Variegatus')属禾本科多年生宿根草本植物, 生长速度快, 生物量大, 分布广泛^[8]。生长一段时间后可刈割移出, 不会留在土壤中造成二次污染。同时作

第一作者简介:赵利清(1976-), 女, 博士研究生, 讲师, 研究方向为园林植物逆境生理与分子生物学。E-mail: 195432830@qq.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(31600020)。

收稿日期:2017-04-05

为园林绿化植物,可单株种植,也可同其它植物配置种植,建成花园、花坛或花镜,还可以用作地被植物^[9]。因此这 3 种草在镉污染土壤修复兼顾园林造景方面有广阔的应用前景。

关于狼尾草对镉的抗性已有研究报道^[6,10],关于大油芒和花叶芒对镉的抗性研究至今鲜有报道。现以狼尾草、大油芒和花叶芒 3 种观赏草为试材,研究镉胁迫下的生理响应及对铜、锌金属离子吸收特性,以期为城市特别是镉污染区观赏草的选择和利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试狼尾草(*Pennisetum alopecuroides* (L.) Spreng.)、大油芒(*Miscanthus sinensis* ‘Variegatus’)和花叶芒(*Spodiopogon sibiricus* Trinius.)为宿根萌发的一年生植株,来自北京农林科学院草业与环境研究发展中心,土壤类型为粘壤土,常规方法分析理化性质^[11],土壤重金属镉的测定采用 GB/T 5009.15-2003 方法,结果见表 1。

表 1

供试土壤理化性质

Table 1

Physic-chemical properties of test soil

土壤 类型 Soil type	有机质 Organic matter /%	pH	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total P /(g·kg ⁻¹)	全钾 Total K /(g·kg ⁻¹)	碱解氮 Andlkali- hydrolyzable N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	铜 Cu /(mg·kg ⁻¹)	锌 Zn /(mg·kg ⁻¹)	镉 Cd /(mg·kg ⁻¹)
粘壤土 Clay loam	1.87	7.07	0.96	0.84	8.93	25.62	19.98	103.6	41.19	63.68	0.07

1.2 试验方法

盆栽试验选用高 30 cm、直径 25 cm 陶土盆作为栽培容器,盆下放置蓄水垫盘,每盆装土 3 kg,将 3 种观赏草越冬宿根植入盆中,恢复生长 14 d 后,选生长一致的植株,进行镉处理。处理分成 3 组,每组 9 盆,第 1 组浇灌 0.05 mmol·L⁻¹ 的 CdCl₂·2.5H₂O 的溶液(T1),第 2 组浇灌 0.20 mmol·L⁻¹ 的 CdCl₂·2.5H₂O 溶液(T2),第 3 组浇灌自来水作对照(CK),每周浇灌 1 次,每次浇灌 1 000 mL,置于室外并定期进行养护,处理 5 周时,测定生长高度和生物量,并取植株功能叶片,测定其它指标。

1.3 项目测定

1.3.1 生长高度及叶的生物量测定

每处理随机取 10 株幼苗,测定植株基部至第 3 叶尖长度作为植株生长高度(cm);随机取 10 株幼苗,先用自来水洗净,再用去离子水冲洗,擦干。于烘箱内 105 ℃下杀青 15 min,80 ℃条件下烘干至恒重,用干质量与鲜质量比值的百分数表示生物量。

1.3.2 渗透调节物质含量测定

游离脯氨酸含量的测定采用酸性茚三酮比色

法,抗坏血酸(AsA,又称维生素 C)含量的测定采用 2,6-二氯酚靛酚氧化还原法,可溶性蛋白质含量测定采用考马斯亮蓝 G-250 法,以上均参考李合生^[12]的方法。

1.3.3 丙二醛(MDA)含量测定

采用硫代巴比妥酸(TBA)显色法测定^[12]。

1.3.4 叶片重金属含量测定

采用酸消解法,取植株叶片干样,磨碎混匀,取 0.05 g 放入试管中,加 5 mL 消解液(HNO₃:HClO₄=9:1),待完全消解后,蒸发去酸,用蒸馏水定容至 50 mL,0.45 μm 膜过滤,利用原子吸收分光光度计(TAS-990,普析通用仪器公司)测定 Cd、Cu 和 Zn 3 种金属元素含量。

1.4 数据分析

所有数据均以平均数±标准差(Mean±SD)表示,采用 Excel 2003 进行数据处理,利用 SPSS 19.0 统计软件对结果进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并用最小显著性差异法(LSD)对组间进行差异检验,显著性水平设定 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 镉对 3 种观赏草生长高度及生物量的影响

由表 2 可知,与对照(CK)相比较,在低浓度

(T1)和高浓度(T2)镉处理下,狼尾草生长高度无差异。大油芒的CK高度达到了27.0 cm,而T1、T2处理分别下降了22.2%和38.9%,不同处理间差异显著($P<0.05$)。花叶芒的T1处理与CK间无显著差异,但T2处理比CK显著下降了18.3%($P<0.05$)。从生长高度这个指标来看,狼尾草对镉胁迫的抗性最强,花叶芒次之,大油芒最差。随镉处理浓度的升高,狼尾草生物量积累

呈上升趋势,CK狼尾草生物量最低,T2处理最高,但不同浓度镉处理下狼尾草生物量无显著差异。大油芒和花叶芒生物量均呈下降趋势,与CK相比,T2处理大油芒生物量显著下降了21.03%,花叶芒显著下降了12.51%($P<0.05$)。这说明高浓度镉胁迫对大油芒和花叶芒影响较大,而狼尾草可以耐受较高浓度的镉胁迫。

表2 镉对3种园林观赏草高度和生物量(干质量/鲜质量)的影响

Table 2 Effects of cadmium on height and biomass(dry weight/fresh weight)in three ornamental grasses

处理 Treatment	高度 Height/cm			生物量(干质量/鲜质量) Biomass(dry weight/fresh weight)/%		
	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.
CK	25.0±0.16a	27.0±0.15a	54.5±0.76a	22.88±0.80a	21.54±1.02a	25.25±0.73a
T1	25.5±0.14a	21.0±0.15b	50.7±2.40a	23.59±0.82a	21.05±1.13a	24.08±0.34a
T2	24.5±0.87a	16.5±0.87c	44.5±1.44b	24.08±2.15a	17.01±0.91b	22.09±0.29b

注:同一列数据后不同字母表示差异达5%显著水平,下同。

Note: The data within a column follow by the different letters are significant difference at 0.05 level. The same below.

2.2 镉对3种观赏草游离脯氨酸和抗坏血酸(AsA)含量的影响

从表3可以看出,随镉处理浓度的升高,3种观赏草游离脯氨酸积累量均呈上升趋势。同一种草不同浓度的镉处理间均达到显著水平($P<0.05$),其中,T2处理狼尾草游离脯氨酸积累量最高,达10.51 mg·g⁻¹DW,为CK的4.2倍,而大油芒和花叶芒游离脯氨酸含量分别为CK的

3.20倍和3.18倍。随镉胁迫浓度的升高,3种观赏草抗坏血酸含量均呈上升趋势,T2处理狼尾草抗坏血酸含量最高达4.59 mg·g⁻¹FW,与T1处理、CK差异显著($P<0.05$),与CK比较,大油芒和花叶芒的T1处理差异不显著,与T2处理差异显著($P<0.05$)。结果表明,3种观赏草均通过合成游离脯氨酸和抗坏血酸来缓解镉胁迫,其中狼尾草的合成量最高,上升幅度最大。

表3 镉对3种园林观赏草脯氨酸和抗坏血酸含量的影响

Table 3 Effects of cadmium on proline content and ascorbic acid content in three ornamental grasses

处理 Treatment	脯氨酸含量 Proline content/(mg·g ⁻¹ DW)			抗坏血酸含量 Ascorbic acid content/(mg·g ⁻¹ FW)		
	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.
CK	2.48±0.17c	2.26±0.14c	1.91±0.10c	2.43±0.13c	1.71±0.07b	1.67±0.10b
T1	4.34±0.23b	3.59±0.05b	3.37±0.17b	3.61±0.11b	1.87±0.05b	1.80±0.11b
T2	10.51±0.64a	7.23±0.18a	6.07±0.30a	4.59±0.19a	2.19±0.08a	2.17±0.10a

2.3 镉对3种观赏草可溶性蛋白质含量和丙二醛(MDA)含量的影响

由表4可知,T1处理3种观赏草可溶性蛋白质含量都升高,但与CK比较均无显著性差异。T2处理3种观赏草可溶性蛋白质含量均下降,且与CK和T1处理差异显著($P<0.05$)。这表明了低浓度镉胁迫可诱导观赏草可溶性蛋白质合成,

高浓度镉胁迫下可抑制可溶性蛋白质的合成。与CK比较,T1、T2处理的狼尾草和花叶芒的丙二醛含量均无显著性差异,而T2处理大油芒丙二醛含量达到了7.65 mg·g⁻¹FW,是CK的1.93倍,3个处理间均差异显著,且呈上升趋势($P<0.05$)。说明镉胁迫可诱导大油芒大量积累膜质过氧化产物丙二醛,而对狼尾草和花叶芒的影响不大。

表 4 镉对 3 种园林观赏草可溶性蛋白质含量和丙二醛含量的影响

Table 4 Effects of cadmium on soluble protein content and malondialdehyde content in three ornamental grasses

处理 Treatment	可溶性蛋白质含量 Soluble protein content/(mg · g ⁻¹ FW)			丙二醛含量 Malondialdehyde content/(mg · g ⁻¹ FW)		
	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.
CK	22.03±0.90a	14.90±0.50a	19.64±0.11a	2.87±0.16a	3.97±0.21c	2.14±0.15a
T1	22.09±0.41a	14.92±0.42a	20.27±0.65a	2.72±0.14a	4.97±0.15b	2.55±0.11a
T2	19.00±0.60b	11.37±0.92b	17.82±0.46b	2.82±0.19a	7.65±0.20a	2.82±0.33a

2.4 镉胁迫下 3 种观赏草叶片镉、铜和锌的累积量

表 5 显示,3 种观赏草 CK 叶片的镉含量极少,仅 0.01 μg · g⁻¹DW,而 T1、T2 处理则含有较高的镉,T1 处理时狼尾草、大油芒和花叶芒分别是 CK 的 1 133、1 267、1 167 倍,T2 处理时分别是 CK 的 2 033、2 700、2 367 倍,各处理间镉含量均达到了显著差异水平($P<0.05$)。这说明了土壤中的镉极易被植物吸收,而镉胁迫下,3 种观赏草均可吸收、运输镉离子,且随镉胁迫浓度的升

高,植株中镉累积量显著上升($P<0.05$)。

由表 6 可知,T1 处理镉胁迫下,3 种观赏草叶片中的铜含量与 CK 无显著差异;T2 处理镉胁迫可促进 3 种观赏草对铜的吸收,叶片中的铜含量与 CK、T1 处理均达到显著性差异水平($P<0.05$)。3 种观赏草叶片中锌含量均以 CK 最高,2 种浓度镉胁迫都会使观赏草锌含量显著降低($P<0.05$)。这表明镉胁迫可抑制 3 种观赏草对锌的吸收和转运,而铜的吸收和转运只受到高浓度的镉胁迫影响。

表 5 3 种园林观赏草叶片镉含量

Table 5 Content of cadmium in three ornamental grasses

μg · g⁻¹DW

处理 Treatment	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.
CK	0.01±0.00c	0.01±0.00c	0.01±0.00c
T1	11.33±1.20b	12.67±1.20b	11.67±1.45b
T2	20.33±0.88a	27.00±1.15a	23.67±2.73a

表 6 镉对 3 种园林观赏草铜和锌吸收的影响

Table 6 Effects of cadmium on copper content and zinc content in three ornamental grasses

μg · g⁻¹DW

处理 Treatment	铜含量 Copper content			锌含量 Zinc content		
	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.	狼尾草 <i>Pennisetum alopecuroides</i> (L.) Spreng.	大油芒 <i>Miscanthus sinensis</i> 'Variegatus'	花叶芒 <i>Spodiopogon sibiricus</i> Trinius.
CK	218.00±3.61b	202.67±2.60b	201.00±5.13b	228.33±3.84a	226.00±4.93a	221.67±8.11a
T1	213.33±4.26b	212.33±4.33b	197.67±5.55b	199.33±4.37b	180.33±8.88b	182.67±4.67b
T2	253.00±4.04a	246.33±4.33a	238.33±3.76a	198.00±3.46b	195.33±4.10b	162.00±7.37b

3 讨论

重金属镉胁迫会抑制大部分植物生长,并降低其生物量^[13],但该试验中,2 种浓度(0.05、0.20 mmol · L⁻¹)的镉胁迫下,狼尾草的生长和生物量变化不大,而大油芒和花叶芒的生长受到了抑制,生物量也有所降低,这表明镉胁迫对大油芒和花叶芒影响较大,而狼尾草对镉胁迫有一定的耐性,能够耐受较高浓度的镉胁迫。

许多植物^[14-16]在镉的胁迫下脯氨酸会迅速累积,脯氨酸在植物细胞内可作为渗透调节剂起作用,保持膜结构的完整性,保护蛋白质分子,增加蛋白质分子间的水合作用,并为植物体从胁迫中恢复提供能量^[17-18]。该试验研究发现随着镉浓度的增加,3 种观赏草叶片内游离脯氨酸含量呈线性递增趋势,在 0.20 mmol · L⁻¹ 浓度下,增幅最大是狼尾草,比 CK 增加了 323.79%,大油芒和花叶芒增幅相差不明显,都小于狼尾草。从

这项指标可以看出缓解镉胁迫的能力狼尾草大于花叶芒和大油芒。

抗坏血酸(AsA)是植物抗氧化防御系统的重要组成部分^[19],当植株遭受镉胁迫后,体内的抗氧化防御系统被激活,植物表现出 AsA 含量升高的现象,AsA 是抗氧化剂,可清除镉胁迫产生的活性氧,改善了植株生长发育状况^[20]。AsA 积累量是植物抗性强弱的一个指标。用 0.05、0.20 mmol·L⁻¹ 2 个镉浓度处理狼尾草、大油芒和花叶芒 3 种草发现 AsA 含量都有所增加,这与唐秀梅等^[21]对龙葵叶片研究及张菊平等^[22]在 8 个小白菜品种上的研究结果一致。镉胁迫下,狼尾草 2 个浓度含量都与 CK 差异显著,而大油芒和花叶芒只在高浓度时与 CK 差异显著,这表明了狼尾草缓解镉胁迫的能力强于大油芒和花叶芒。

可溶性蛋白质含量随镉浓度的变化而产生的变化趋势有各种不同的研究结果^[23-24],该研究发现低浓度镉胁迫可诱导 3 种观赏草可溶性蛋白质合成量略微升高,高浓度镉胁迫下,可溶性蛋白质含量则表现为显著性下降,类似的研究结果在水稻^[22]、小白菜^[25]等植物中亦得到证实,这种结果可能是由于在低浓度镉胁迫下,植物组织为适应镉胁迫从而诱导蛋白质合成,因此表现出蛋白质含量升高,在高浓度镉胁迫下,合成反应受到抑制,或者高浓度镉使蛋白质变性,可溶性蛋白质含量出现下降的现象。

植物在逆境条件下所产生过多的自由基会引发植物体内膜脂过氧化作用而对植物产生毒害,其产物 MDA 含量常作为反映逆境条件下植物受伤害程度的指标之一^[18]。MDA 含量积累越多的品种,受害越严重,耐镉性越差^[26]。该试验中发现镉胁迫下,狼尾草和花叶芒处理,MDA 积累量与 CK 相比均无显著性差异,而大油芒的 MDA 含量则呈上升趋势,2 个处理均与 CK 间差异达到了显著水平,就 MDA 含量指标来看,狼尾草和花叶芒耐镉性要强于大油芒。

该试验中,2 种镉浓度的胁迫下,3 种观赏草叶片镉含量急剧上升,浓度越大,上升量越大,这说明了 3 种观赏草有非常强吸收、运输镉离子能力。铜和锌是植物生长过程中所需的微量元素,锌影响植物的光合作用、糖代谢途径,促进器官发育,维持氮代谢平衡,铜是多种酶的组成成分,参

与碳素同化、氮素代谢以及多条生理代谢途径^[27],镉胁迫会使植株中一些微量元素的吸收、积累会发生变化^[28],该试验中 2 种浓度的镉胁迫均抑制 3 种观赏草对锌的吸收,浓度越大,抑制程度就越大,这与 PRZEDPELSKAWASOWICZ 等^[29]的研究结果相符。铜在低浓度镉处理时,影响不显著,在高浓度镉处理时,3 种观赏草的铜含量都显著增加,与 ARSLAN 等^[30]的研究结果一致。

综上所述,3 种观赏草镉均可吸收、运输镉离子,对镉胁迫的耐受程度表现为狼尾草>花叶芒>大油芒。另外,镉胁迫还抑制 Zn 的吸收,促进观赏草对铜的吸收;2 种浓度的镉胁迫均显著降低了 3 种观赏草对锌的吸收,但仅高浓度的镉胁迫才能够提高 3 种观赏草对铜的吸收。

参考文献

- [1] 蔺晓晖,段爱国,何彩云,等. 镉胁迫对 107 杨幼苗光合作用和干物质分配的影响[J]. 林业科学研究,2012,25(5):651-656.
- [2] 李君,葛跃,王明新,等. 镉对蓖麻耐性生理及营养元素吸收转运的影响[J]. 环境科学学报,2016(8):3081-3087.
- [3] 陈良,隆小华,郑晓涛,等. 镉胁迫下两种菊芋幼苗的光合作用特征及镉吸收转运差异的研究[J]. 草业学报,2011,20(6):60-67.
- [4] AZIZIAN A, AMIN S, MAFTOUN M, et al. Response of lettuce to Cd-enriched water and irrigation frequencies[J]. African Journal of Environmental Science & Technology, 2011(10):884-893.
- [5] HE J, LI H, LUO J, et al. A transcriptomic network underlies microstructural and physiological responses to cadmium in *Populus×canescens*[J]. Plant Physiology, 2013, 162(1):424-439.
- [6] 王瑜,袁庆华,苗丽宏. 不同狼尾草幼苗对镉胁迫的响应[J]. 草地学报,2015,23(1):130-136.
- [7] 刘俊祥,孙振元,勾萍,等. 镉胁迫下多年生黑麦草的光合生理响应[J]. 草业学报,2012,21(3):191-197.
- [8] 武菊英. 观赏草及其在园林景观中的应用[M]. 北京:中国林业出版社,2008.
- [9] 陈超,袁小环,杨学军,等. 观赏草的研究概况和园林应用[J]. 中国农学通报,2015,31(19):135-143.
- [10] 钟珍梅,何波澜,黄勤楼,等. 狼尾草对沼液中镉的响应及富集效果研究[J]. 安全与环境学报,2016(1):245-249.
- [11] 林大仪. 土壤学实验指导[M]. 北京:中国林业出版社,2004.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京:高等教育出版社,2000.
- [13] 刘鑫,张世熔,朱荣,等. 镉铜胁迫下紫苏的生长响应和富集特征研究[J]. 农业环境科学学报,2009,28(11):2264-2269.

- [14] DINAKAR N, NAGAJYOTHI P C, SURESH S, et al. Phytotoxicity of cadmium on protein, proline and antioxidant enzyme activities in growing *Arachis hypogaea* L. seedlings[J]. 环境科学学报(英文版), 2008, 20(2): 199-206.
- [15] 何俊瑜, 任艳芳, 王阳阳, 等. 不同耐性水稻幼苗根系对镉胁迫的形态及生理响应[J]. 生态学报, 2011, 31(2): 522-528.
- [16] 李清飞, 仇荣亮. 麻疯树对镉胁迫的生理耐性及富集特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(1): 42-47.
- [17] 覃光球, 严重玲, 韦莉莉. 秋茄幼苗叶片单宁、可溶性糖和脯氨酸含量对 Cd 胁迫的响应[J]. 生态学报, 2006, 26(10): 3366-3371.
- [18] 郭智, 原海燕, 奥岩松. 镉胁迫对龙葵幼苗光合特性和营养元素吸收的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(3): 824-829.
- [19] 张琳, 崔红米, 王建军, 等. 镉胁迫对不结球白菜 VC 合成 L-半乳糖途径基因表达及抗氧化系统的影响[J]. 植物生理学报, 2015(7): 1099-1108.
- [20] 张佩, 周琴, 孙小芳, 等. 抗坏血酸对镉胁迫下油菜幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6): 2362-2366.
- [21] 唐秀梅, 龚春风, 刘鹏, 等. 镉胁迫下龙葵叶中三种抗氧化酶的活性和抗坏血酸含量的变化[J]. 植物生理学报, 2008, 44(6): 1135-1136.
- [22] 张菊平, 焦新菊, 崔文朋, 等. 不同品种小白菜对镉胁迫的生理性差异[J]. 北方园艺, 2013(8): 9-12.
- [23] 韩艳萍, 刘宛, 李艳芝, 等. 镉胁迫对拟南芥幼苗形态生理和错配修复相关基因表达的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(6): 1246-1252.
- [24] 刘宛, 郑乐, 李培军, 等. 镉胁迫对大麦幼苗基因组 DNA 多态性影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 19-24.
- [25] 张伟锋, 陈平. 镉对水稻幼苗叶片几种元素含量的影响[J]. 农业与技术, 2004, 24(5): 65-67.
- [26] 梅丽娜, 袁庆华, 姚拓, 等. 镉胁迫对四个苜蓿品种生理特性的影响[J]. 中国草地学报, 2010, 32(3): 21-27.
- [27] 李虹颖, 苏彦华. 镉对籽粒苋耐性生理及营养元素吸收积累的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(2): 308-313.
- [28] 程旺大, 姚海根, 张国平, 等. 镉胁迫对水稻生长和营养代谢的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(3): 528-537.
- [29] PRZEDPELSKAWASOWICZ E, POLATAJKO A, WIERZBICKA M. The influence of cadmium stress on the content of mineral nutrients and metal-binding proteins in *Arabidopsis halleri* [J]. Water, Air & Soil Pollution, 2012, 223(8): 5445-5458.
- [30] ARSLAN H, GÜLER YÜZ G, AKPINAR A, et al. Responses of ruderal *Verbascum olympicum* Boiss. (Scrophulariaceae) growing under cadmium stress[J]. Clean-Soil, Air, Water, 2014, 42(6): 824-835.

Physiological Response and Copper and Zinc Absorption Characteristics of Three Ornamental Grasses Under Cadmium Stress

ZHAO Liqing^{1,2}, PENG Xiangyong², JI Ruiqing³

(1. School of Agroforestry & Medicine, The Open University of China, Beijing 100039; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091; 3. Engineering Research Center of Chinese Ministry of Education for Edible and Medicinal Fungi, Jilin Agricultural University, Changchun, Jilin 130118)

Abstract: *Pennisetum alopecuroides*, *Spodiopogon sibiricus* and *Miscanthus sinensis* were used as materials, potted cultivation method was used to study the variation of growth height, biomass, physiological indexes and the content of cadmium, copper and zinc of three ornamental grass, which were treated by two different concentrations of cadmium (0.05, 0.20 mmol · L⁻¹). By these studies, the theoretical basis was provided for selecting the suitable ornamental grass for city afforestation, especially in soil with cadmium pollution. The results showed that the growth height and biomass of three grass were changed with the cadmium stress, *Miscanthus sinensis* under the cadmium stress with high concentration had difference with CK ($P < 0.05$). The growth height of *Spodiopogon sibiricus* was sensitive to cadmium stress which had difference with CK ($P < 0.05$) under low or high concentration. The growth height and biomass of *Pennisetum alopecuroides* did not been changed and had no difference. The free proline content of three ornamental grass and the ascorbic acid content of *alopecuroides* that were induced by low or high concentration cadmium had difference with CK ($P <$

0.05), and the ascorbic acid content of *Miscanthus sinensis* and *Spodiopogon sibiricus* was increased under the cadmium stress with high cadmium concentration. The soluble protein content of three ornamental grass did not been changed with low concentration cadmium, but was decreased with high concentration cadmium and had difference with CK ($P < 0.05$). The malonaldehyde content of *Spodiopogon sibiricus* was increased with the increasing of the concentration of cadmium and had difference with CK ($P < 0.05$), but other two grass did not been changed. In conclusion, the tolerance of three ornamental grass to cadmium stress was *Pennisetum alopecuroides* $>$ *Miscanthus sinensis* $>$ *Spodiopogon sibiricus*. In addition, three ornamental grass had better capacity to accumulate cadmium, the cadmium content of three ornamental grass was increased significantly under the cadmium stress with two different cadmium concentrations. In three ornamental grass, the zinc absorption level was lower than CK significantly under the cadmium stress with two different cadmium concentrations, and the copper absorption level of three ornamental grass was increased only under the cadmium stress with high cadmium concentration.

Keywords: ornamental grass; cadmium stress; physiological index; copper; zinc; absorption characteristic

欢迎订阅 2018 年《北方果树》

《北方果树》为辽宁省一级期刊。系辽宁省果树科学研究所、沈阳农业大学园艺学院和省果树学会主办的综合性果树(含西、甜瓜和草莓)技术期刊。主要栏目有专题论述、试验研究、生产经验、调查(考察)报告、生产建议、典型介绍、百果园、工作论坛、来稿摘登、报刊摘引与会讯等。技术范围包括落叶果树(含经济林)、西甜瓜和草莓等新品种的选育、引进;品种特性与配套栽培技术;土壤管理与肥料的科学施用;病虫害的发生规律与防治技术;植物生长调节剂及其应用;组织培养与脱毒技术;果品贮藏与加工;产业化经营与集约化栽培;果园机械与果园管理机械化等。读者对象为果树科技人员、农林院校师生、各级果业主管部门与技术行政部门领导与业务干部、广大果树生产者和产品经销者等。

国内外公开发行。刊号:ISSN 1001—5698, CN 21—1218/S;双月刊,单月 10 日出版,大 16 开本,64 页,彩色 4 封;每期定价 5.00 元,全年 6 期 30.00 元;邮发代号:8—213,全国各地邮局(所)均办理订阅,编辑部随时可订,款到发刊,免费邮寄,需挂号邮寄,每册另加 3.00 元,年加 18.00 元。欢迎以乡(镇)、村统一订阅(20 册以上免收挂号费)。

编辑部地址:辽宁省营口市熊岳镇铁东街《北方果树》编辑部

邮 编:115009

联系电话:0417—7039636(广告部), 0417—7033159(编辑部), 0417—7032701(发行部)

电子信箱:bjbbfgs@126.com

QQ:1731762658