

网络出版时间:2015-03-12 14:17

DOI:10.13207/j.cnki.jnwfufu.2015.04.004

网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20150312.1417.004.html

Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草生长与 抗氧化酶活性的影响

关梦茜,周旭丹,董 然

(吉林农业大学 园艺学院,吉林 长春 130118)

【摘 要】 【目的】对金娃娃萱草(*Hemerocallis hybridus* Stella de Oro)和大花萱草(*Hemerocallis middendorffii*)在 Cu-Cd 复合胁迫条件下的生长及生理特性进行研究,为重金属污染土壤的花卉植物修复提供理论依据。**【方法】**以金娃娃萱草和大花萱草多年生分株苗为材料,进行盆栽试验,以不处理植株为对照,探讨不同 Cu-Cd 复合处理(T1:Cu 100 mg/kg+Cd 0.3 mg/kg,T2:Cu 400 mg/kg+Cd 1 mg/kg,T3:Cu 800 mg/kg+Cd 20 mg/kg,T4:Cu 1 200 mg/kg+Cd 100 mg/kg)和胁迫时间(30,60,90,120 d)下,2 种萱草株高、干质量、叶片光合色素含量、净光合速率、蒸腾速率及抗氧化酶(POD、SOD)活性等生理指标的变化。**【结果】**T1 处理促进了大花萱草的生长,随着 Cu-Cd 胁迫的继续加剧,其植株高度和生物量下降;与对照相比,Cu-Cd 胁迫处理金娃娃萱草植株高度和生物量一直呈下降趋势。与对照相比,大花萱草 T1 处理 SOD 活性有所增加,而后随胁迫强度的增加,SOD 活性逐渐下降;金娃娃萱草 SOD 活性一直呈下降趋势;2 种萱草 POD 活性均随 Cu-Cd 复合含量的增加逐渐上升。金娃娃萱草叶片叶绿素含量随 Cu-Cd 复合含量的增加而降低,而大花萱草叶片叶绿素含量呈先增加后降低趋势;2 种萱草净光合速率和蒸腾速率均呈双峰曲线,峰值出现在 10:00 和 16:00。**【结论】**大花萱草对 Cu-Cd 复合胁迫的耐受性较金娃娃萱草强,更有利于对重金属污染土壤的修复。

【关键词】 萱草;Cu-Cd 复合胁迫;抗氧化酶;土壤修复

【中图分类号】 X171.5

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2015)04-0128-07

Effects of Cu-Cd combined pollution on growth and antioxidant enzyme activity of 2 *Hemerocallis fulva* varieties

GUAN Meng-xi,ZHOU Xu-dan,DONG Ran

(College of Horticulture,Jilin Agricultural University, Changchun,Jilin 130118,China)

Abstract: 【Objective】 The study investigated the growth and physiological characteristics of *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’ and *Hemerocallis middendorffii* under Cu-Cd combined stress to provide theory basis for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. **【Method】** Perennial divided seedlings of *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’ and *Hemerocallis middendorffii* were planted in pots to investigate the changes in plant height,dry weight,leaf,photosynthetic rate and transpiration rate and anti-oxidase activity (POD and SOD) and other physiological indexes under different Cu-Cd combined concentrations (T1:Cu 100 mg/kg+Cd 0.3 mg/kg,T2:Cu 400 mg/kg+Cd 1 mg/kg,T3:Cu 800 mg/kg+Cd 20 mg/kg,and T4:Cu 1 200 mg/kg+Cd 100 mg/kg) and stress times (30,60,90,and 120 d). **【Result】** T1

【收稿日期】 2013-11-28

【基金项目】 吉林省科学技术厅项目“长白山特种经济植物保护及配套关键技术研究”(20100259)

【作者简介】 关梦茜(1990—),女,吉林长春人,硕士,主要从事园林植物资源与种质创新研究。

E-mail:guanmengmeng1990@163.com

【通信作者】 董 然(1966—),女,吉林长春人,教授,博士,主要从事长白山野生植物的引种驯化研究。

E-mail:Dongr999@163.com

promoted the growth of *Hemerocallis middendorffii*, and the height and dry weight decreased as the increase of Cu-Cd stress. The height and dry weight of *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’ decreased continuously. T1 increased SOD activity of *Hemerocallis middendorffii*, and it decreased with the increase of stress. SOD activity of *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’ decreased continuously. POD activities of both varieties increased as the increase of Cu-Cd content. The chlorophyll content of *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’ decreased with the increase of Cu-Cd content, while that of *Hemerocallis middendorffii* firstly increased and then decreased. Photosynthetic rates and transpiration rates of both varieties had the shape of bimodal with peaks at 10: 00 am and 16: 00 pm. 【Conclusion】 *Hemerocallis middendorffii* had better tolerance against Cu-Cd combined stress than *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’, and it was more conducive to remediation of heavy metal polluted soil.

Key words: *Hemerocallis fulva*; Cu-Cd combined stress; anti-oxidation enzyme; soil remediation

近年来,随着矿产资源的大规模开发,过量的重金属进入到土壤、水体和空气中,使环境污染越来越严重^[1]。重金属污染已经成为影响生态系统的主要污染类型^[2-3],且往往是几种重金属的复合作用^[4]。复合作用可改变重金属的生物活性或毒性,已引起人们的广泛重视^[5-6]。Cd 是最常见且危害极大的重金属元素之一,Cu 虽是作物生长的必需元素,但在作物体内积累过多也会产生明显的生物学效应^[7-8]。萱草 (*Hemerocallis* spp.) 又称金针、忘忧草,为百合科 (*Liliaceae*) 萱草属 (*Hemerocallis*) 多年生宿根草本花卉。金娃娃萱草 (*Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’) 和大花萱草 (*Hemerocallis middendorffii*) 是在萱草基础上经过人工培育的多倍体矮生品种^[9],其花色艳丽,管理粗放,适应性强,耐盐碱、易繁殖^[10],为经济适用型花卉。将 Cu、Cd 污染的土地转化为可利用土地,对改善生态环境具有重要意义,但对 Cu-Cd 复合胁迫条件下 2 种萱草的耐受能力表现如何尚未见报道。本研究采用 Cu-Cd 复合胁迫处理,测定 2 种萱草的生长和生理指标,分析其在 Cu-Cd 复合胁迫下的耐受能力,以期利用萱草对复合重金属污染进行植物修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为金娃娃萱草和大花萱草多年生分株苗,取自吉林农业大学园林基地附近苗圃。

1.2 方法

试验在吉林农业大学园林基地温室内进行。2013-05 初起苗,分株后选择长势相近的单体苗(株高 6~7 cm),留根 5 cm 左右,栽植于 12 cm(直径)×21 cm(高)的黑色塑料花盆中,正常管理。供试土壤采用 V(园土):V(草炭):V(珍珠岩)=

6:3:1 的花土,每盆装土 2 kg(干质量),每盆定植 1 株苗,盆下垫托盘。根据土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中的重金属二级标准(Cu 100 mg/kg、Cd 0.3 mg/kg)进行梯度设计,同时考虑到污染有继续加剧的可能,因此在试验中对重金属含量上限作适当调整。用人工方法模拟 Cu、Cd 污染土壤,其中 Cu 和 Cd 分别以 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 形式加入,试验设 4 个处理,T1:Cu 100 mg/kg+ Cd 0.3 mg/kg; T2:Cu 400 mg/kg+ Cd 1 mg/kg; T3:Cu 800 mg/kg+ Cd 20 mg/kg; T4:Cu 1 200 mg/kg+ Cd 100 mg/kg; 以不作处理植株为对照(CK)。待植株缓苗稳定后,于 2013-06-01 将重金属复合溶液一次性注入^[11],与土壤混合均匀。试验期间根据每盆土壤水分状况,不定期浇水,使盆土的持水量保持在 80% 左右,试验时间为 4 个月。

1.3 测定项目及方法

(1)株高和叶片数。于 2013-07-01 开始测定生长指标,每隔 30 d 测定 1 次(07-01、08-01、09-01、10-01),共测定 4 次,每次每处理取 3 盆植株,用卷尺测定不同 Cu-Cd 复合胁迫处理下的株高,并记录每盆叶片数。

(2)生物量。于 2013-07-01 开始测定生物量,每隔 30 d 测定 1 次(07-01、08-01、09-01、10-01),每处理选取 3 盆植株,清洗全株,分别将植物地上部和地下部分离,置于 80 ℃ 烘箱中烘干至恒质量,分别测定每株苗地上、地下干质量。

(3)光合日变化。于 2013-08 月中旬,选择晴朗的天气,利用便携式光合仪(CIRAS-2,PPSSystems,美国),在 08:00—18:00 测定植株叶片净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)。每隔 2 h 测定 1 次,共测定 6 次。每个处理选择长势一致的向阳叶片 3 片,每片

叶片测 3 次,共 9 次重复,结果取平均值。

(4)生理指标。试验结束时,采用丙酮法^[12]测定叶绿素、类胡萝卜素含量。采用氯化硝基四氮唑蓝法^[12]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性;采用愈创木酚法^[12]测定过氧化物酶(POD)活性,均重复测定 3 次,结果取均值。

1.4 数据处理

采用 Excel 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析,对各个参数在不同 Cu-Cd 复合胁迫下的差异进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草生长的影响

4 个 Cu-Cd 复合胁迫处理下,金娃娃萱草的株

高和叶片数大多显著低于对照($P<0.05$)(表 1),其中 T1 处理下降幅度最小,T4 处理降幅最大。T1 处理大花萱草的株高和叶片数略有提高,其中 30,60,90 和 120 d 株高分别比对照增加了 5.62%,11.16%,9.13%和 20.65%,显示 Cu 100 mg/kg+ Cd 0.3 mg/kg 复合胁迫处理有促进大花萱草地上部分生长的作用;T4 处理大花萱草的株高显著低于对照($P<0.05$),30,60,90 和 120 d 时株高仅为对照组的 78.32%,80.95%,82.51%和 75.99%,表明较高含量的 Cu-Cd 复合胁迫对大花萱草的生长有一定的伤害。

Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草干质量的影响结果见表 2。

表 1 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草生长的影响

Table 1 Effects of Cu-Cd combined stress on growth of *Hemerocallis hybridus*

Stella de Oro and *Hemerocallis middendorffii*

品种 Cultivar	处理 Treatment	30 d		60 d		90 d		120 d	
		株高/cm Height	叶片数 Leaf No.	株高/cm Height	叶片数 Leaf No.	株高/cm Height	叶片数 Leaf No.	株高/cm Height	叶片数 Leaf No.
金娃娃萱草 <i>Hemerocallis hybridus</i> Stella de Oro	CK	29.58±1.02 a	14 a	36.35±1.19 a	16 a	38.99±1.22 a	17 a	24.99±1.09 a	11 a
	T1	28.27±1.12 a	13 b	35.25±1.21 a	15 b	37.76±1.32 a	16 b	23.73±1.17 ab	10 b
	T2	26.35±1.07 b	12 c	29.61±1.14 b	13 c	31.60±1.16 b	14 c	22.96±1.11 b	8 c
	T3	25.33±1.15 b	11 d	26.95±1.06 c	12 d	28.17±1.23 c	11 d	20.77±1.19 c	7 d
	T4	22.53±1.21 c	8 e	25.27±1.04 c	8 e	24.47±1.17 d	9 e	20.14±1.08 c	7 d
大花萱草 <i>Hemerocallis middendorffii</i>	CK	42.72±1.03 b	14 b	44.00±1.13 b	15 b	45.56±1.22 b	17 b	37.20±1.03 b	13 b
	T1	45.12±1.28 a	15 a	48.91±1.15 a	16 a	49.72±1.23 a	18 a	44.88±1.12 a	15 a
	T2	40.87±1.17 c	15 a	43.02±1.09 b	15 b	44.92±1.18 b	16 c	35.02±1.09 c	11 c
	T3	36.60±1.08 d	12 c	37.82±1.01 c	13 c	39.01±1.25 c	13 d	30.46±1.21 d	10 d
	T4	33.46±1.11 e	11 d	35.62±1.14 d	12 d	37.59±1.15 c	13 d	28.27±1.13 e	9 e

注:数据为平均值±标准差;同种萱草同列数据后标不同小写字母表示差异达显著水平($P<0.05$)。下表同。
Note: Data are average±standard variation. Different lowercase letters show significant difference at $P<0.05$, the same below.

表 2 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草干质量的影响

Table 2 Effects of Cu-Cd combined stress on dry weights of above-and under-ground parts of *Hemerocallis hybridus*

Stella de Oro and *Hemerocallis middendorffii*

g/株

品种 Cultivar	处理 Treatment	30 d		60 d		90 d		120 d	
		地上干质量 Aboveground dry mass	地下干质量 Underground dry mass	地上干质量 Aboveground dry mass	地下干质量 Underground dry mass	地上干质量 Aboveground dry mass	地下干质量 Underground dry mass	地上干质量 Aboveground dry mass	地下干质量 Underground dry mass
金娃娃萱草 <i>Hemerocallis hybridus</i> Stella de Oro	CK	2.43±0.11 a	1.08±0.12 a	3.07±0.19 a	2.92±0.09 a	3.38±0.19 a	3.03±0.26 a	1.94±0.09 a	3.13±0.19 a
	T1	2.10±0.12 ab	1.05±0.08 a	2.66±0.13 b	1.77±0.17 b	2.97±0.22 b	2.57±0.22 b	1.73±0.19 a	2.80±0.23 ab
	T2	1.74±0.11 bc	0.95±0.09 ab	2.41±0.17 b	1.51±0.13 bc	2.24±0.24 c	2.01±0.20 c	1.23±0.15 b	2.45±0.21 b
	T3	1.50±0.09 c	0.72±0.14 ab	1.82±0.21 c	1.46±0.21 bc	1.42±0.20 d	1.89±0.17 cd	0.91±0.11 bc	1.96±0.18 c
	T4	1.13±0.13 d	0.61±0.13 b	1.59±0.19 c	1.13±0.24 c	1.30±0.18 d	1.60±0.16 d	0.72±0.12 c	1.68±0.15 c
大花萱草 <i>Hemerocallis middendorffii</i>	CK	2.44±0.12 b	2.79±0.20 a	3.70±0.10 a	3.30±0.22 a	3.98±0.13 a	4.11±0.33 a	2.90±0.07 b	4.27±0.39 a
	T1	2.82±0.23 a	2.67±0.21 a	4.04±0.12 a	3.03±0.20 a	4.21±0.29 a	3.89±0.26 a	3.32±0.13 a	3.90±0.26 b
	T2	1.97±0.13 c	1.93±0.18 b	2.52±0.19 b	1.98±0.19 b	3.49±0.25 b	2.13±0.19 b	2.92±0.21 b	2.40±0.29 c
	T3	1.14±0.16 d	0.99±0.16 b	2.39±0.15 b	1.77±0.17 b	3.01±0.21 c	2.06±0.18 b	1.81±0.17 c	2.34±0.19 c
	T4	0.94±0.11 d	0.68±0.14 c	1.55±0.10 c	0.82±0.13 c	2.46±0.19 d	1.16±0.19 c	0.99±0.07 d	1.48±0.15 d

由表 2 可知,金娃娃萱草地上干质量随 Cu-Cd 胁迫的加重而下降;大花萱草地上干质量随 Cu-Cd

胁迫的加重呈先升后降的趋势,表现为 T1>CK> T2>T3>T4,与同一胁迫条件下株高的变化趋势

基本一致。金娃娃萱草和大花萱草地下部分干质量均随 Cu-Cd 胁迫的加重呈现下降趋势,其中 30,60,90 和 120 d 时 T4 处理金娃娃萱草地下部分干质量分别较对照降低了 43.52%,61.30%,47.19%和 46.33%,大花萱草分别较对照降低了 75.63%,75.15%,71.78%和 45.20%。

2.2 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草光合色素含量的影响

叶绿素含量的高低能反映光合作用水平的强弱^[13],重金属胁迫会使植物叶片叶绿素含量降低^[14-15]。由表 3 可见,在 Cu-Cd 复合胁迫 4 个处理中,金娃娃萱草叶片叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+

b 及类胡萝卜素含量均低于对照;而大花萱草叶片上述 4 个指标含量与对照相比均呈先升后降趋势,其中 T1 处理叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素 a+b 及类胡萝卜素质量分别较对照增加 6.56%,3.97%,5.93%和 1.00%;而 T4 处理分别较对照降低了 49.59%,54.38%,50.71%和 18.32%。2 种萱草叶绿素 a/b 值随胁迫的加剧而增大。2 种萱草叶绿素含量的变化趋势与株高、地上干质量等指标相似。表明在 Cu-Cd 复合胁迫条件下,较高含量的 Cu、Cd 对金娃娃萱草和大花萱草叶片叶绿素的破坏程度较大。

表 3 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草叶片光合色素含量的影响
Table 3 Effects of Cu-Cd combined stress on chlorophyll contents in leaves of *Hemerocallis hybridus* Stella de Oro and *Hemerocallis middendorffii*

品种 Cultivar	处理 Treatment	叶绿素 a/ (mg · g ⁻¹) Chl a	叶绿素 b/ (mg · g ⁻¹) Chl b	叶绿素 a+b/ (mg · g ⁻¹) Chl a+b	叶绿素 a/b Chl a/Chl b	类胡萝卜素/ (mg · g ⁻¹) Carotenoids
金娃娃 <i>Hemerocallis hybridus</i> Stella de Oro	CK	0.813±0.02 a	0.231±0.01 b	1.044±0.05 a	3.519±0.13 a	0.210±0.01 a
	T1	0.793±0.05 a	0.223±0.02 a	1.016±0.08 a	3.556±0.09 b	0.200±0.01 a
	T2	0.742±0.04 a	0.209±0.01 c	0.951±0.03 a	3.550±0.11 a	0.192±0.02 a
	T3	0.727±0.03 a	0.202±0.02 cd	0.929±0.04 a	3.599±0.08 a	0.173±0.01 b
	T4	0.694±0.02 a	0.189±0.02 d	0.882±0.02 a	3.691±0.09 a	0.150±0.02 c
大花萱草 <i>Hemerocallis middendorffii</i>	CK	1.357±0.03 a	0.428±0.01 a	1.785±0.03 a	3.171±0.12 b	0.200±0.03 a
	T1	1.446±0.06 a	0.445±0.01 a	1.891±0.04 a	3.249±0.14 b	0.202±0.03 a
	T2	1.149±0.02 b	0.324±0.20 b	1.473±0.06 b	3.546±0.07 a	0.191±0.01 ab
	T3	0.846±0.04 c	0.237±0.01 c	1.083±0.04 c	3.570±0.12 a	0.178±0.02 bc
	T4	0.729±0.04 c	0.203±0.01 d	0.932±0.02 c	3.591±0.09 a	0.165±0.01 c

2.3 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草光合指标的影响

由图 1 和图 2 可以看出,在 Cu-Cd 复合胁迫条件下,2 种萱草的净光合速率、蒸腾速率日变化趋势相似,均呈“双峰”曲线,第 1 峰值出现在 10:00,谷值出现在 14:00(光合午休现象),第 2 峰值出现在 16:00。由于对午前不断增大的光照强度比较敏感,2 种萱草的净光合速率和蒸腾速率均随光照强度的

增大而增加,因此第 1 峰值明显高于第 2 峰值。随着 Cu-Cd 复合胁迫程度的加剧,2 种萱草的净光合速率和蒸腾速率均下降,但大花萱草 T1 处理与对照接近;与大花萱草相比,金娃娃萱草净光合速率、蒸腾速率下降较快。2 种萱草不同处理同一时间的净光合速率和蒸腾速率的大小依次为:CK>T1>T2>T3>T4。

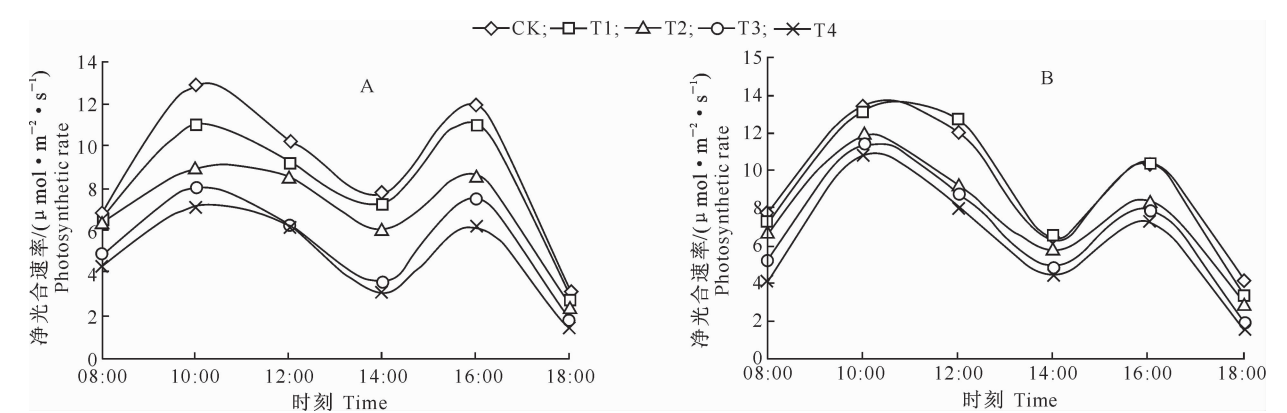


图 1 Cu-Cd 复合胁迫对金娃娃萱草(A)和大花萱草(B)叶片净光合速率的影响
Fig.1 Effects of Cu-Cd combined stress on photosynthetic rates of *Hemerocallis hybridus* Stella de Oro (A)and *Hemerocallis middendorffii* (B)

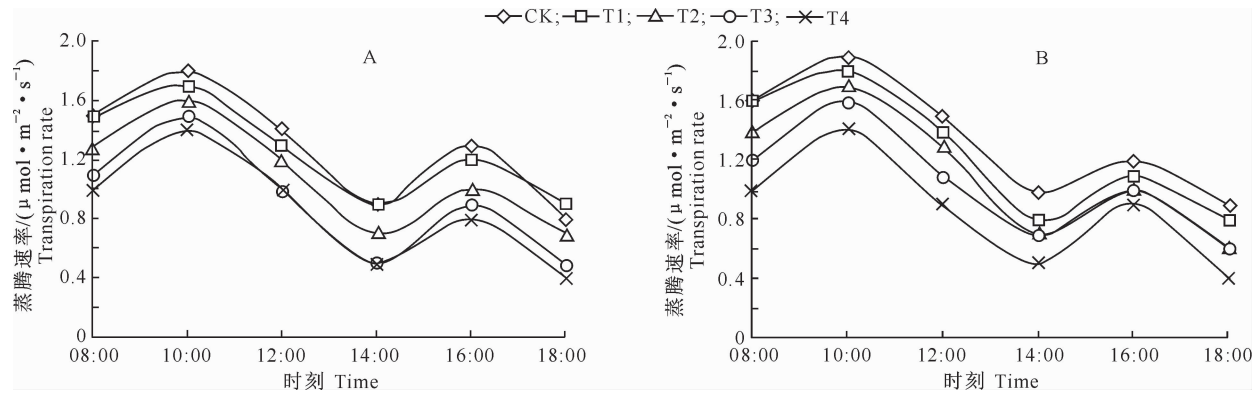


图 2 Cu-Cd 复合胁迫对金娃娃萱草(A)和大花萱草(B)叶片蒸腾速率的影响

Fig. 2 Effects of Cu-Cd combined stress on transpiration rates of *Hemerocallis hybridus* Stella de Oro (A) and *Hemerocallis middendorffii* (B)

2.4 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草抗氧化酶活性的影响

POD 和 SOD 是植物适应各种逆境胁迫的重要酶类^[16]。POD 是植物体内最常见的氧化还原酶,能催化有毒物质的氧化分解,是对环境因子十分敏感的一类酶^[17];SOD 作为清除植物体内超氧阴离子自由基的主要酶系之一,其活性易受环境中诱导因子的影响^[18]。由表 4 可见,2 种萱草各处理叶片的 POD 活性大多显著高于对照($P<0.05$),呈现随胁

迫的加剧而逐渐增大的趋势。随 Cu、Cd 胁迫程度的加剧,金娃娃萱草 SOD 活性逐渐降低,表现为 $CK>T1>T2>T3>T4$;而大花萱草 SOD 活性则呈先升后降的变化趋势,其中 T1 处理组 SOD 活性最高,表现为 $T1>CK>T2>T3>T4$ 。以上结果说明,Cu-Cd 复合胁迫并未对金娃娃萱草、大花萱草叶片的保护酶系统造成伤害,且对 SOD 和 POD 活性有一定的刺激作用,这在一定程度上反映了金娃娃萱草、大花萱草对 Cu-Cd 复合胁迫的耐受性。

表 4 Cu-Cd 复合胁迫对 2 种萱草抗氧化酶活性的影响

Table 4 Effects of Cu-Cd combined stress on POD and SOD activities in leaves of <i>Hemerocallis hybridus</i> Stella de Oro and <i>Hemerocallis middendorffii</i>						U/g	
品种 Cultivar	处理 Treatment	POD 活性 POD activity					
		30 d	60 d	90 d	120 d		
金娃娃 <i>Hemerocallis hybridus</i> Stella de Oro	CK	375.00±4.12 d	387.50±5.06 d	412.50±4.72 e	362.50±3.06 e		
	T1	392.50±4.57 d	637.50±4.71 c	850.00±6.55 d	742.50±4.88 d		
	T2	440.00±3.92 c	700.00±4.85 b	880.00±5.07 c	777.50±3.45 c		
	T3	507.00±5.04 b	857.50±3.84 b	1 325.00±4.39 b	802.50±6.52 b		
	T4	487.00±3.09 a	712.50±5.33 a	927.50±3.72 a	612.50±7.17 a		
大花萱草 <i>Hemerocallis middendorffii</i>	CK	295.00±4.42 e	340.00±3.56 e	350.00±3.62 e	325.00±5.17 e		
	T1	455.00±3.18 d	527.50±3.44 d	600.00±3.47 d	472.50±3.72 d		
	T2	590.00±3.82 c	637.50±4.13 c	720.00±3.24 c	500.00±3.49 c		
	T3	740.00±4.87 b	845.00±3.92 b	862.50±4.02 b	662.50±4.47 b		
	T4	1 290.00±6.13 a	1 357.00±3.37 a	1 430.00±5.17 a	785.00±5.16 a		
品种 Cultivar	处理 Treatment	SOD 活性 SOD activity					
		30 d	60 d	90 d	120 d		
金娃娃 <i>Hemerocallis hybridus</i> Stella de Oro	CK	309.44±3.17 a	344.09±2.51 a	340.15±3.02 a	302.90±3.05 a		
	T1	278.76±3.02 b	282.74±3.43 b	313.52±1.08 b	283.04±2.15 a		
	T2	272.86±2.52 b	279.47±1.82 b	296.04±2.43 b	233.99±1.47 a		
	T3	136.87±2.67 c	210.27±1.59 c	260.01±4.09 c	145.28±2.37 a		
	T4	122.42±1.32 c	185.96±2.47 d	240.00±2.55 d	102.60±1.88 a		
大花萱草 <i>Hemerocallis middendorffii</i>	CK	346.13±2.73 b	380.18±3.32 b	388.87±1.48 b	270.28±3.48 c		
	T1	441.07±3.42 a	911.31±1.95 a	962.05±1.36 a	339.26±3.34 a		
	T2	269.34±1.89 c	340.42±2.53 c	349.35±3.22 c	300.78±2.62 b		
	T3	229.25±3.32 d	266.67±3.07 d	288.50±2.68 d	283.45±1.66 bc		
	T4	191.28±1.97 e	265.54±1.63 d	271.18±1.62 d	211.35±1.45 d		

3 讨论与结论

Cu 对植物而言是一种必需元素,适量的外源 Cu 能促进植物体内的酶促生理反应,诱导植物细胞有丝分裂,但过量 Cu 会抑制植物叶片蛋白质的合成,对植物的生长和正常代谢产生不利影响^[19-21]。王友保等^[22]研究表明,Cu、As 复合污染的交互作用会影响大豆种子的萌发与幼苗生长。

本研究结果显示,在 Cu 100 mg/kg + Cd 0.3 mg/kg 复合胁迫条件下,大花萱草的株高、叶片数、地上部分干质量、叶片叶绿素 a 和 b 含量以及 SOD、POD 活性等指标均高于 CK,表明较低含量的 Cu-Cd 复合胁迫可以刺激其植株生长,这与郭平等^[23]对向日葵(*Helianthus annuus*)幼苗的研究结果相似,其机制有待进一步研究。在 Cu-Cd 复合胁迫条件下,金娃娃萱草的株高、叶片数、地上部分和地下部分干质量均降低,叶绿素 a 和 b 的含量也低于对照,说明在 Cu-Cd 复合胁迫下,金娃娃萱草的生长和生理代谢过程受到严重影响。本试验中,随 Cu-Cd 复合胁迫的加剧,2 种萱草的净光合速率和蒸腾速率均下降,蒸腾速率降低会导致降温、增湿的生态效益降低,净光合速率降低会导致生物量下降。

由以上分析可知,Cu-Cd 复合胁迫会抑制金娃娃萱草的生长生理及光合作用和蒸腾作用,破坏植物体内环境的稳定性。试验结果发现,金娃娃萱草和大花萱草在 Cu-Cd 复合胁迫过程中未出现死亡现象,但过大浓度会影响其长势,说明金娃娃萱草和大花萱草对低浓度 Cu-Cd 复合胁迫有较强的耐受性,甚至低浓度 Cu-Cd 复合胁迫可以促进其生长,这为重金属污染地花卉品种的选择提供了理论依据。2 种萱草对 Cu-Cd 复合胁迫的耐受极限有待进一步研究。

[参考文献]

[1] 李其林,何九江,刘光德,等. 菜地土壤和蔬菜中几种重金属的分布特征 [J]. 矿物学报,2004,24(4):373-377.
Li Q L, He J J, Liu G D, et al. Study on the distribution rules of heavy metals in soils and vegetables on vegetable farms [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2004, 24(4): 373-377. (in Chinese)

[2] Teutsch N, Erel Y, Hallcz L, et al. Distribution of natural and anthropogenic lead in mediterranean soils [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2001, 65(17): 2853-2864.

[3] Klumpp G, Furlan C M, Domingos M, et al. Response of stress indicators and growth parameters of *Tibouchina pulchra* Cogn. exposed to air and soil pollution near the industrial complex of Cubatão, Brazil [J]. Science of the Total Environment, 2000,

246(1): 79-91.

[4] 王 丹,魏 威,梁东丽,等. 土壤铜、铬(VI)复合污染重金属形态转化及其对生物有效性的影响 [J]. 环境科学, 2011, 32(10): 3113-3120.
Wang D, Wei W, Liang D L, et al. Transformation of copper and chromium in co-contaminated soil and its influence on bio-availability for pakchoi [J]. Environmental Science, 2011, 32(10): 3113-3120. (in Chinese)

[5] Arora M, Kiran B, Rani S, et al. Heavy metal accumulation in vegetables irrigated with water from different sources [J]. Food Chemistry, 2008, 111(4): 811-815.

[6] Nan Z R, Li J J, Zhang J M, et al. Cadmium and Zinc interactions and their transfer in soil-crop system under actual field conditions [J]. Science of the Total Environment, 2002, 285(1/2/3): 187-195.

[7] 黄宝圣. 镉的生物毒性及其防治策略 [J]. 生物学通报, 2005, 40(11): 26-28.
Huang B S. The biological toxicity of cadmium and its control strategy [J]. Bulletin of Biology, 2005, 40(11): 26-28. (in Chinese)

[8] 储 玲,晋 松,吴学峰,等. 铜污染对天蓝苜蓿幼苗生长及活性氧代谢的影响 [J]. 生态学杂志, 2006, 25(12): 1481-1485.
Chu L, Jin S, Wu X F, et al. Effects of Cu pollution on *Medicago lupulina* L. seedlings growth and active oxygen metabolism [J]. Chinese Journal of Ecology, 2006, 25(12): 1481-1485. (in Chinese)

[9] 杨永花. 金娃娃萱草组织培养技术研究 [J]. 甘肃农业科技, 2003(12): 33-35.
Yang Y H. Study on tissue culture technique of *Hemerocallis middendorffii* [J]. Gansu Agricultural Science and Technology, 2003(12): 33-35. (in Chinese)

[10] 兰丽婷,李 冲,任爽英,等. 萱草新品种组培再生体系的建立 [J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(4): 14-17.
Lan L T, Li C, Ren S Y, et al. Establishment of tissue culture regeneration system of *Hemerocallis* 'Fooled Me' [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(4): 14-17. (in Chinese)

[11] 李永杰. 6 种城市绿化树种苗木对土壤 Cu、Pb 污染的生理响应及耐性评价 [D]. 北京: 北京林业大学, 2010.
Li Y J. Physielegial response and tolerance evaluationon six urba greening seedlings under soil Cu and Pb contamination [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2010. (in Chinese)

[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.
Li H S. The principle and technology of plant physiology and biochemistry experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. (in Chinese)

[13] 袁 敏,铁柏清,唐美珍. 重金属单一污染对龙须草叶绿素含量和抗氧化酶系统的影响 [J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 929-932.
Yuan M, Tie B Q, Tang M Z. Effects of Cd, Pb, Cu, Zn and as single pollution on chlorophyll content and antioxidant en-

- zyme systems of *Eulaliopsis binata* [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(6): 929-932. (in Chinese)
- [14] 铁柏清, 袁 敏, 唐美珍, 等. 重金属单一污染对龙须草生长与生理生化特性的影响 [J]. 中国生态农业学报, 2007, 15(2): 99-103.
- Tie B Q, Yuan M, Tang M Z, et al. Effects of single heavy metal pollution on the growth and physiological and biochemical characteristics of *Eulaliopsis binata* [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2007, 15(2): 99-103. (in Chinese)
- [15] 严重玲, 洪业汤, 付舜珍, 等. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧清除系统的影响 [J]. 生态学报, 1997, 17(5): 488-492.
- Yan Z L, Hong Y T, Fu S Z, et al. Cd, Pb stress on active oxygen scavenging system in leaves of tobacco [J]. Acta Ecologica Sinica, 1997, 17(5): 488-492. (in Chinese)
- [16] 王慧忠, 何翠屏, 赵 楠. 铅对草坪植物生物量与叶绿素水平的影响 [J]. 草业科学, 2003, 20(6): 73-75.
- Wang H Z, He C P, Zhao N. Effect of lead on turfgrass biomass and chlorophyll level [J]. Pratacultural Science, 2003, 20(6): 73-75. (in Chinese)
- [17] 王萍萍, 唐 咏, 孙 东. Cu²⁺ 胁迫对龙葵生理生化特性的影响 [J]. 安徽农业科学, 2007, 35(11): 3153-3155.
- Wang P P, Tang Y, Sun D. Effect of Cu²⁺ stress on physiological and biochemical properties of *Solanum nigrum* L. [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2007, 35(11): 3153-3155. (in Chinese)
- [18] 李锋民, 熊治廷, 胡洪营. 海州香薷对铜的蓄积及铜的毒性效应 [J]. 环境科学, 2003, 24(3): 30-34.
- Li F M, Xiong Z T, Hu H Y. Copper toxicity and accumulation in *Elsholtzia splendens* [J]. Journal of Environmental Science, 2003, 24(3): 30-34. (in Chinese)
- [19] Liu J, Xiong Z T, Li T Y, et al. Bioaccumulation and ecophysiological responses to copper stress in two populations of *Rumex dentatus* L. from Cu contaminated and non-contaminated sites [J]. Environmental and Experimental Botany, 2004, 52(1): 43-51.
- [20] Thomas B K, Judith F P, David R P. Relative effectiveness of calcium and magnesium in the alleviation of rhizotoxicity in wheat induced by copper, zinc, aluminum, sodium and low pH [J]. Plant and Soil, 2004, 259(1/2): 201-208.
- [21] 周长芳, 吴国荣, 施国新, 等. 水花生抗氧化系统在抵御 Cu²⁺ 胁迫中的作用 [J]. 植物学报, 2001, 43(4): 389-394.
- Zhou C F, Wu G R, Shi G X, et al. The role of antioxidant systems in Cu²⁺ stress resistance in *Alternanthera philoxeroides* [J]. Acta Botanica Sinica, 2001, 43(4): 389-394. (in Chinese)
- [22] 王友保, 刘登义, 张 莉, 等. 铜、砷及其复合污染对黄豆(*Glycine max*)影响的初步研究 [J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 117-120.
- Wang Y B, Liu D Y, Zhang L, et al. Effect of Cu and As and their combination pollution on *Glycine max* [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 117-120. (in Chinese)
- [23] 郭 平, 刘 畅, 张海博, 等. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究 [J]. 水土保持学报, 2007, 21(6): 92-95.
- Guo P, Liu C, Zhang H B, et al. Studies on enrichment and tolerance ability to Pb, Cu of sunflower seedlings [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(6): 92-95. (in Chinese)