

网络出版时间:2015-11-11 16:16 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2015.12.025
网络出版地址:http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20151111.1616.050.html

Cd 胁迫对金娃娃萱草生长及生理指标的影响

关梦茜,董 然

(吉林农业大学 园艺学院,吉林 长春 130118)

[摘 要] **【目的】**通过对金娃娃萱草(*Hemerocallis hybridus* ‘*Stella de Oro*’)在重金属 Cd 胁迫条件下的生长及生理特性研究,探讨金娃娃萱草抗重金属 Cd 的能力,为重金属污染土壤的植物修复提供理论依据。**【方法】**以多年生金娃娃萱草分株苗为材料,利用盆栽试验,以土壤中未施入 Cd 为对照,探讨土壤中不同 Cd 含量(0, 3, 1, 20, 100 mg/kg)和胁迫时间(30, 60, 90, 120 d)处理后,金娃娃萱草株高、干质量、叶片光合及抗氧化酶活性等指标的变化。**【结果】**Cd 含量小于 1 mg/kg 时可促进金娃娃萱草生长,Cd 含量大于 1 mg/kg 时,植株高度和生物量呈下降趋势;金娃娃萱草叶片叶绿素 a 和 b、总叶绿素、类胡萝卜素含量随 Cd 含量的增加呈先增后降趋势,转折点出现在 1 mg/kg 处理水平上;与对照相比,金娃娃萱草 POD 活性随 Cd 含量的增加逐渐增大;低 Cd 含量(≤ 1 mg/kg)处理下 SOD 活性有所增加,尔后随含量的增加 SOD 活性下降;金娃娃萱草净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)和气孔导度(G_s)日变化均呈双峰曲线,峰值出现在 10:00 和 16:00,胞间 CO_2 浓度(C_i)则在 10:00 和 16:00 出现谷值。**【结论】**在 Cd(0.3~100 mg/kg)含量胁迫的伤害阈值内金娃娃萱草无死亡现象,其适用于含量 <1 mg/kg 的 Cd 污染土壤的修复。

[关键词] 金娃娃萱草;Cd 胁迫;土壤修复

[中图分类号] S682.1⁺90.1

[文献标志码] A

[文章编号] 1671-9387(2015)12-0174-07

Effects of Cd stress on growth and physiological characteristics of *Hemerocallis hybridus* ‘*Stella de Oro*’

GUAN Meng-xi, DONG Ran

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

Abstract: **【Objective】**The study analyzed the heavy metal resistance of *Hemerocallis hybridus* ‘*Stella de Oro*’ by investigating its growth and physiological characteristics under Cd stress to provide basis for phytoremediation of heavy metal contaminated soils. **【Method】** Perennial *H. hybridus* ‘*Stella de Oro*’ divided seedlings were planted in pot to investigate the effect of Cd concentration (0, 3, 1, 20, 100 mg/kg) and times of stress (30, 60, 90, 120 d) on plant height, dry mass, leaf, photosynthesis and anti-oxidase activity of *H. hybridus* ‘*Stella de Oro*’ plants. **【Result】** Cd concentrations of less than 1 mg/kg stimulated the growth of *H. hybridus* ‘*Stella de Oro*’, while Cd concentrations of greater than 1 mg/kg decreased the height and biomass of plants. Chlorophyll a, chlorophyll b, total chlorophyll, and carotenoids decreased after the initial increase when mass fraction of Cd increased and the turning point was 1 mg/kg. Compared with the CK, POD activity gradually increased with the increase of Cd concentration, while SOD activity was increased slightly followed by decrease when Cd concentration increased. Photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r), and stomatal conductance (G_s) showed bimodal curves with peaks at 10:00 am and 16:00

[收稿日期] 2014-03-02

[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

pm, CO₂ concentration in the intercellular (Ci) at 10:00 am and 16:00 pm when the valley value. 【Conclusion】 Cd (0.3—100 mg/kg) stress within threshold caused no death to *H. hybridus* ‘*Stella de Oro*’, so it was suitable for remediation of soils with less than 1 mg/kg Cd.

Key words: *Hemerocallis hybridus* ‘*Stella de Oro*’; Cd stress; soil remediation

重金属镉(Cd)具有极高的生物毒性,是影响人体健康的非必需元素。在中国受到重金属污染的土地中, Cd 污染耕地约 1.3 万 hm², 涉及 11 省市的 25 个地区^[1]; 许多地区的粮食、蔬菜、水果中的重金属 Cd、Pb、Cr、As 等含量接近临界值或超标^[2]。日本的“富山事件(骨痛病)”和“水俣事件”就是由重金属 Cd 和甲基汞污染所导致的^[3]。土壤中重金属 Cd 污染正威胁着人类及其生存环境的安全, 因此, 如何治理 Cd 污染土壤一直是倍受关注的热点。目前, 国内外关于 Cd 对经济作物、粮食作物和蔬菜作物生理特性的影响及生态效应等方面已有较多研究^[4-7], 如植物对重金属 Cd 的吸收、运输和响应机理, 均围绕 Cd²⁺ 诱导植物抗氧化系统、Cd²⁺ 跨膜运输和硫代谢等展开讨论, 但以花卉植物为供试材料的研究还较少, 张呈祥等^[8]分析了大花萱草的生长、生理及富集变化, 认为其适用于含量 ≤ 1 mg/kg 的 Cd 污染土壤的修复。金娃娃萱草 (*Hemerocallis hybridus* ‘*Stella de Oro*’) 是在萱草基础上经过人工培育处理的矮生露地宿根草本花卉品种, 具有易繁殖、生物量大、适应性强、观赏价值高、管理粗放等优点, 在园林绿化中应用广泛。本试验利用盆栽法, 研究金娃娃萱草在 Cd 胁迫后株高、根长、干质量、叶片光合及抗氧化酶活性等生理指标的变化, 明确金娃娃萱草应对 Cd 胁迫的适宜浓度和伤害阈值, 以为金娃娃萱草在土壤遭受 Cd 污染地区应用的可行性和生态恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理

2013-05-01, 选择吉林农业大学园林基地多年生金娃娃萱草分株苗为供试材料, 株高 6~7 cm, 分株后选择长势相近的单体苗, 留根 5 cm 左右, 定植于 12 cm(直径) × 21 cm(高) 的黑色塑料花盆中, 正常管理, 促其成活。采用盆土(V(园土): V(草炭): V(珍珠岩)=6:3:1)作为盆栽基质, 每盆装土 2 kg(干质量), 定植 1 株苗, 盆下垫托盘。2013-06-01 对供试花卉进行 Cd 胁迫处理(一次性浇灌 Cd 溶液), 其中 Cd 以 CdCl₂ · 2.5H₂O 形式加入。根据土壤环境质量标准(GB 15618—1995)中的重金

属标准进行梯度划分(土壤重金属 Cd 含量的二级标准为 ≤ 0.3 mg/kg, 三级为 ≤ 1.0 mg/kg), 考虑到实际土壤污染还会有继续增加的可能, 试验中对重金属含量上限作适当延伸, 设置了 4 个不同 Cd 含量(0.3, 1, 20, 100 mg/kg)处理(以纯 Cd 计), 以土壤中不添加 Cd 为对照(CK)。重金属 Cd 根据处理要求稀释成溶液, 采用注射器一次性注入, 在植株根部周围均匀设置 6 点, 注入重金属 Cd 后以薄土覆盖。试验时间总计 120 d, 试验处理分别以 Cd0.3、Cd1、Cd20、Cd100 表示, 每处理 3 次重复, 每重复 6 盆。自处理后, 根据每盆土壤水分状况不定期补水。

1.2 测定项目及方法

1.2.1 株高的测定 2013-07-01 开始测定生长指标, 每隔 30 d 测定 1 次(7 月 1 日、8 月 1 日、9 月 1 日、10 月 1 日), 共测定 4 次, 用卷尺测定不同 Cd 胁迫处理下的植株株高与根长, 每处理随机选取 3 盆植株, 测量后取均值。

1.2.2 地上、地下干质量的测定 2013-07-01 开始测定生物量, 每隔 30 d 测定 1 次(7 月 1 日、8 月 1 日、9 月 1 日、10 月 1 日), 每处理选取 3 盆植株, 先用水冲洗植株, 再用去离子水反复冲洗根、叶, 最后用吸水纸吸干植株表面水分, 分别将植物地上和地下部分离, 置于 80 °C 烘箱中烘干至恒质量, 测定每株苗地上、地下干质量。

1.2.3 光合作用日变化的测定 利用 CIRAS-2 便携式光合仪(PPSystems 公司, 美国)进行光合参数等的测定。2013 年 8 月中旬选择晴朗无云的天气, 在 08:00—18:00 测定植株叶片净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)和胞间 CO₂ 浓度(Ci), 每隔 2 h 测定 1 次。每处理选择长势一致的向阳叶片 3 株, 每叶片测 3 次, 取 9 次重复的平均值。

1.2.4 生理指标的测定 叶片中叶绿素、类胡萝卜素含量的测定采用丙酮研磨法^[9], 在试验处理末期进行测定(120 d); POD 活性测定采用愈创木酚法^[9]; SOD 活性测定采用氯化硝基四氮唑蓝法^[9]; 所有测定均重复 3 次取均值。

1.3 数据处理

运用 Excel 18.0 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析, 比较各个参数在不同 Cd 胁迫下的差异。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对金娃娃萱草生长及生物量的影响

Cd 胁迫对金娃娃萱草的影响必然会体现在植株的生长上。由表 1 可见,同一胁迫时间内,随着 Cd 含量的增大,金娃娃萱草株高呈先升后降的趋势,Cd 含量在 1 mg/kg 时达到峰值,30 d、60 d、90 d、120 d 的株高分别高出对照 15.50%,25.23%,22.80%和 27.29%;在 100 mg/kg 时株高最低,仅为对照的 84.99%,75.46%,73.87%和 75.23%。随着胁迫时间的延长,株高呈先升高后降低的趋势,这是因为植株在 7(30 d)、8(60 d)、9(90 d)月份处于生长状态,10 月(120 d)之后植株处于衰老状态;

表 1 Cd 胁迫对金娃娃萱草生长的影响

Table 1 Effects of Cd stress on growth of <i>Hemerocallis hybridus</i> ‘ <i>Stella de Oro</i> ’									cm
Cd 含量/ (mg·kg ⁻¹) Cd concentration	30 d		60 d		90 d		120 d		
	株高 Height	根长 Root length	株高 Height	根长 Root length	株高 Height	根长 Root length	株高 Height	根长 Root length	
CK	29.58±1.03 b	18.64±1.19 bc	36.35±1.20 c	25.19±1.00 b	38.99±1.30 c	27.30±1.01 b	24.99±1.08 b	29.62±1.08 b	
0.3	29.95±1.12 b	20.35±1.26 a	43.59±1.10 b	29.85±1.30 a	45.99±1.20 b	34.34±1.20 a	30.29±1.10 a	35.28±1.16 a	
1	33.87±1.05 a	21.87±1.21 a	45.52±1.06 a	30.67±1.27 a	47.88±1.14 a	35.29±1.05 a	31.81±1.04 a	36.06±1.23 a	
20	25.27±1.14 c	17.52±1.20 c	28.79±1.08 d	24.73±1.24 b	29.15±1.16 d	26.23±1.13 b	24.23±1.10 b	27.46±1.19 c	
100	25.14±1.17 c	15.33±1.31 d	27.43±1.21 d	22.18±1.15 c	28.80±1.06 d	25.53±1.07 b	18.80±1.14 c	26.26±1.17 c	

注: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: Different lowercase letters show significant difference at $P<0.05$. The same below.

表 2 Cd 胁迫对金娃娃萱草干质量的影响

Table 2 Effect of Cd stress on dry mass of <i>Hemerocallis hybridus</i> ‘ <i>Stella de Oro</i> ’									g/株
Cd 含量/ (mg·kg ⁻¹) Cd concentration	30 d		60 d		90 d		120 d		
	地上 Aboveground	地下 Underground	地上 Aboveground	地下 Underground	地上 Aboveground	地下 Underground	地上 Aboveground	地下 Underground	
CK	2.43±0.14 c	1.08±0.24 a	3.07±0.19 b	2.92±0.18 a	3.38±0.10 b	3.03±0.18 a	1.94±0.15 b	3.13±0.20 a	
0.3	2.86±0.22 b	1.07±0.22 a	3.47±0.22 a	2.57±0.21 ab	3.77±0.21 a	2.86±0.20 a	2.74±0.17 a	2.90±0.18 a	
1	3.23±0.21 a	0.93±0.18 a	3.66±0.25 a	2.45±0.20 b	3.95±0.15 a	2.73±0.10 a	2.99±0.22 a	2.77±0.29 a	
20	2.15±0.14 c	0.90±0.32 a	2.21±0.23 c	1.63±0.10 c	2.69±0.19 c	1.77±0.17 b	1.27±0.27 c	1.89±0.27 b	
100	2.05±0.17 c	0.71±0.17 b	2.15±0.16 c	1.35±0.32 c	2.46±0.23 c	1.62±0.24 b	1.13±0.31 c	1.70±0.10 b	

2.2 Cd 胁迫对金娃娃萱草叶片叶绿体色素含量的影响

由表 3 可以看出,在 Cd 胁迫下,金娃娃萱草叶片叶绿素 a 和 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量呈先升后降的趋势,大小依次为: Cd1>Cd0.3>CK>Cd20>Cd100。Cd 含量为 1 mg/kg 时各色素含量达最大值,分别比对照增加 55.47%,51.52%,54.60%和 13.33%;随 Cd 含量增加各色素含量呈下降趋势,在 Cd 含量为 100 mg/kg 时降到最低,分别比对照减少了 17.34%,21.21%,18.20%和 22.86%,这与张银龙等^[10]的研究结果一致。叶绿

素 a/b 随 Cd 含量的增加逐渐升高,但各处理间差异均不显著,表明 Cd 胁迫对金娃娃萱草叶绿素 b 的影响略大于叶绿素 a。

且重金属 Cd 胁迫时间过长,加速了金娃娃萱草的衰老。在高含量 Cd 胁迫下,金娃娃植株叶片与对照相比均出现萎蔫变黄迹象,但都未死亡,说明金娃娃萱草对 Cd 胁迫有一定的耐受性。金娃娃萱草的根长随 Cd 含量的增大呈先上升后下降的趋势(表 1),在 1 mg/kg 时达到最大值,与株高变化一致。

由表 2 可见,金娃娃萱草地上部干质量在 Cd 含量为 1 mg/kg 时达最大,大于 1 mg/kg 时地上部干质量降低,呈先升后降趋势;与对照相比,地下部干质量随 Cd 含量增大逐渐降低,且在 Cd 含量为 100 mg/kg 时明显低于其他处理。说明 Cd 污染对金娃娃萱草地下部(根部)的影响远大于对地上部。

素 a/b 随 Cd 含量的增加逐渐升高,但各处理间差异均不显著,表明 Cd 胁迫对金娃娃萱草叶绿素 b 的影响略大于叶绿素 a。

2.3 Cd 胁迫对金娃娃萱草光合指标的影响

由图 1 可知,在 Cd 胁迫下金娃娃萱草的净光合速率(P_n)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(G_s)的日变化趋势大致相似,呈现“双峰”曲线,上午 10:00 和下午 16:00 为 2 次高峰出现的时间,谷值出现在下午 14:00 左右,表现出植物典型的“午休”现象。金娃娃萱草的净光合速率第 1 峰值明显高于第 2 峰值,这是由于对午前光照强度较为敏感,随光照强度

的增强,不同 Cd 含量处理的植株叶片净光合速率均逐渐增加。同一天内不同 Cd 含量胁迫下金娃娃萱草平均净光合速率的大小依次为: Cd0.3>Cd1>CK>Cd20>Cd100。蒸腾速率日均值在 Cd 为 0.3

和 1 mg/kg 时略高于对照, Cd 含量为 20 和 100 mg/kg 时蒸腾速率均显著下降。气孔导度日均值在各处理间的变化与净光合速率和蒸腾速率变化相似。

表 3 Cd 胁迫对金娃娃萱草叶片叶绿体色素含量的影响

Table 3 Effects of Cd stress on leaf chloroplast pigment content of *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’

Cd 含量/ (mg · kg ⁻¹) Cd concentration	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/b	类胡萝卜素/ (mg · g ⁻¹) Carotenoids
CK	0.813±0.02 bc	0.231±0.03 c	1.044±0.03 bc	3.519±0.03 a	0.210±0.02 b
0.3	0.953±0.01 b	0.269±0.05 b	1.222±0.02 b	3.543±0.07 a	0.230±0.08 a
1	1.264±0.03 a	0.350±0.01 a	1.614±0.07 a	3.611±0.05 a	0.238±0.04 a
20	0.732±0.02 c	0.200±0.02 d	0.932±0.01 c	3.660±0.02 a	0.180±0.03 c
100	0.672±0.04 c	0.182±0.06 d	0.854±0.04 c	3.692±0.03 a	0.162±0.01 c

不同 Cd 胁迫处理金娃娃萱草的胞间 CO₂ 浓度(Ci)在一天中的变化均呈现近“W 形”,表现出早晚高、中午又回升的变化趋势。第 1 个低谷值出现在 10:00 左右,第 2 个低谷值出现在 16:00 左右。中

午胞间 CO₂ 浓度升高是由非气孔因素限制所致,但金娃娃萱草中午胞间 CO₂ 浓度未超过早晚值,说明金娃娃萱草中午利用 CO₂ 的能力要高于早晚。

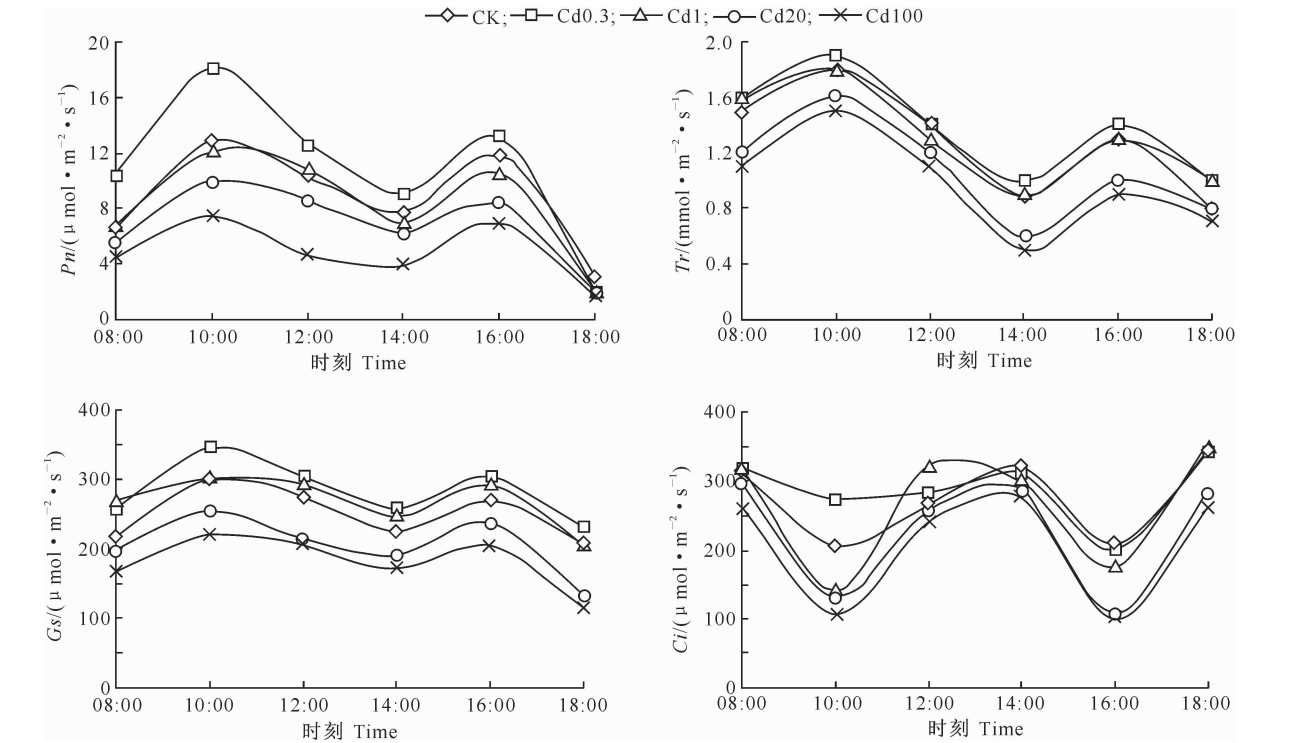


图 1 Cd 胁迫下金娃娃萱草光合特征的日变化

Fig. 1 Diurnal variation of photosynthetic characteristics of *Hemerocallis hybridus* ‘Stella de Oro’ under Cd stress

2.4 Cd 胁迫对金娃娃萱草抗氧化酶活性的影响

抗氧化酶活性的变化,既可显示出植物逆境胁迫的强弱,也可反映植物自身的抗逆潜力。由图 2 可知, Cd 胁迫对金娃娃萱草叶片 POD 活性有显著影响,且随胁迫含量的增加而呈显著上升的趋势,其中在 Cd100 处理下 POD 活性与对照相比增加幅度最大。在不同 Cd 胁迫条件下,金娃娃萱草叶片的

POD 活性均显著高于对照,表现为 Cd100>Cd20>Cd1>Cd0.3>CK,其中 Cd20 和 Cd100 处理增幅较大,分别比对照增加 1.62~2.03 倍和 2.08~2.86 倍,这同孔德政等^[11]和潘秋红等^[12]的研究结果相似。由图 2 还可知,金娃娃萱草叶片 SOD 活性随 Cd 含量的增加呈先升后降趋势,表现为 Cd1>Cd0.3>CK>Cd20>Cd100, Cd1 处理为对照的

1.54~2.83 倍,随胁迫时间延长,金娃娃萱草叶片的 POD 活性和 SOD 活性均呈现先升后降趋势。

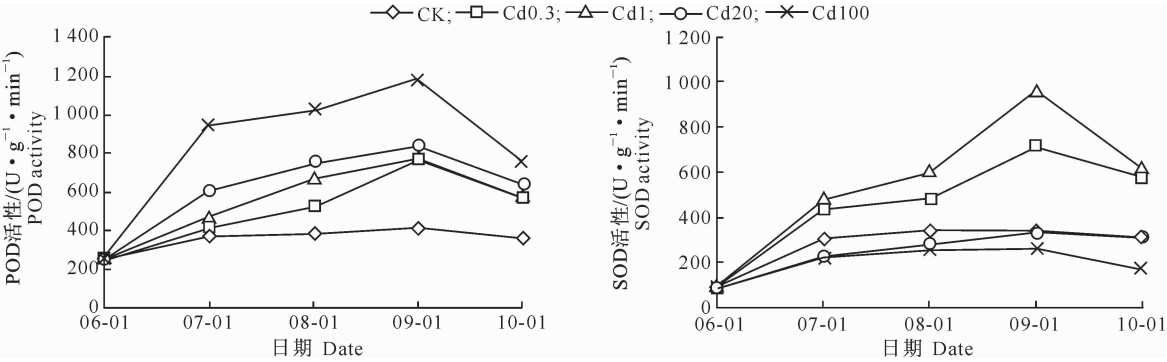


图 2 Cd 胁迫对金娃娃萱草叶片 POD 和 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of Cd stress on leaf POD and SOD activities of *Hemerocallis hybridus* 'Stella de Oro'

3 讨论

本研究结果显示,作为有毒重金属,当外源 Cd 加入后,不同水平的 Cd 胁迫使金娃娃萱草生长和生理代谢受到了不同程度的影响。柯文山等^[13]认为生物量是反映植物生长发育的重要指标。植物生物量的变化是植物适应重金属污染环境的外部表征之一,富集植物和超积累植物则要求具有较高的生物量。本研究中,在低含量 Cd(<1 mg/kg)胁迫下,金娃娃萱草处于良好生长状态,外观形态较好,株高和地上生物量均增大,与对照相比生长更好,这与郭平等^[14]对向日葵(*Helianthus annuus* L.)幼苗的研究结果相似,说明 0~1 mg/kg Cd 为金娃娃萱草栽植的适宜胁迫含量。随着 Cd(20~100 mg/kg)含量的增加,其生长形态和生物量指标逐渐呈下降趋势,说明在此条件下,金娃娃萱草的生长和生理代谢已受到严重影响。这是由于植物在低含量 Cd 胁迫下通过自身反应来加速生理生化活动,产生应激保护作用,体内产生大量代谢产物,与重金属缔合来解毒,因此导致生物量增加^[15]。当土壤中的重金属含量达到一定值后,会使植株体内的生理过程紊乱,光合作用降低,吸收受到抑制,造成植株生长物质与能量减少,使植株生物量下降^[14]。于方明等^[16]研究锥南芥时也发现,重金属 Cd 胁迫会抑制多数植物生长,并降低植物生物量。

光合速率是反映不同环境下光合机构运转状况的一个灵敏指标^[17]。许多研究表明,重金属胁迫会抑制植物的光合作用,且抑制程度与胁迫程度呈正相关;另外,光合作用的降低也与植物种类、发育时期及重金属的种类有关^[18]。随着 Cd 胁迫含量的增加,金娃娃萱草净光合速率、蒸腾速率、气孔导度和胞间 CO₂ 浓度呈先升高后下降的趋势,转折点出现

在 Cd 含量为 0.3 mg/kg 时。净光合速率降低会导致植物吸碳、释氧量降低,而蒸腾速率降低会导致降温 and 增湿的生态效益降低。净光合速率降低也是金娃娃萱草生物量降低的原因之一。

过氧化物酶(POD)可催化有毒物质氧化分解^[19],而超氧化物歧化酶(SOD)则是植物体内清除超氧阴离子自由基的主要酶系之一,这 2 种酶是对环境因子十分敏感的酶^[20]。Cd 胁迫金娃娃萱草时,以 POD 和 SOD 为代表的抗氧化物酶可以在一定程度上抵御重金属 Cd 造成的氧化胁迫:POD 活性随胁迫含量的增加而增大;SOD 则在低含量胁迫时活性增大,高含量胁迫时活性减小,说明 SOD 对膜系统的抗性保护能力有限,高含量(>1 mg/kg) Cd 胁迫打破了抗氧化酶与活性氧的平衡体系,并使酶蛋白自身受到抑制^[21]。这表明金娃娃萱草对 Cd (0~1 mg/kg)胁迫具有一定的耐受能力。

叶绿素含量在一定程度上既可反映植物叶片光合作用的水平,也可表征植物组织、器官的衰老状况^[22]。本试验中,金娃娃萱草的叶绿体色素含量随 Cd 含量的增加总体表现出先增大后减小的趋势。在 Cd 胁迫下金娃娃萱草叶绿素含量下降的原因可能是,重金属 Cd 离子与叶绿素生物合成途径的几种酶(原叶绿素酯还原酶、6-氨基乙酰丙酸合成酶和胆色素原脱氨酶)肽链中富含-SH(硫氢键)的部分结合,会抑制酶活性从而阻碍叶绿素的合成;也可能是重金属 Cd 胁迫条件下其活性氧自由基的作用,主要是强反应性的·OH 所致^[21]。当 Cd 含量为 20~100 mg/kg 时,试验中 SOD 活性几乎与叶绿素含量的下降同步,也间接证明了重金属 Cd 胁迫下活性氧的伤害机理;与此同时,POD 活性呈持续上升趋势,抗氧化酶系统平衡被打破,说明 POD 在 Cd 胁迫下持续发挥活性氧清除作用^[23]。

由以上分析可知,高含量 Cd 胁迫会抑制金娃娃萱草的生长、光合作用和抗氧化酶活性,破坏其内环境的稳定性。金娃娃萱草在 Cd (0.3~100 mg/kg) 胁迫过程中未出现死亡现象,在 Cd (<1 mg/kg) 时生长良好,叶花繁茂;但 Cd 含量过大 (20~100 mg/kg) 会影响其长势,生长发育不正常,观赏价值低;随着胁迫时间延长,在 120 d (4 个月) 后已经处于衰老状态,也说明金娃娃萱草无法在 Cd 含量为 100 mg/kg 的环境下长时间正常生长。由此可以看出,金娃娃萱草适用于 Cd 含量 <1 mg/kg 污染土壤的栽培或生态修复,这一结论对于金娃娃萱草在重金属污染土壤的植物修复和园林中的应用具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 陈怀满. 土壤-植物系统中的重金属污染 [M]. 北京: 科学出版社, 1996.
Chen H M. Pollution of heavy metals in soil-plant system [M]. Beijing: Science Press, 1996. (in Chinese)
- [2] 闫兴凤, 李高平, 王建党, 等. 土壤重金属污染及其治理技术 [J]. 微量元素与健康研究, 2007, 24(1): 52-54.
Yan X F, Li G P, Wang J D, et al. Soil heavy metal pollution and its control technology [J]. Studies of Trace Elements and Health, 2007, 24(1): 52-54. (in Chinese)
- [3] 刘培桐. 环境学概论 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
Liu P T. Introduction to environmental science [M]. Beijing: Advanced Education Press, 1995. (in Chinese)
- [4] 魏树和, 周启星, 王 新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征 [J]. 环境科学, 2005, 26(3): 167-171.
Wei S H, Zhou Q X, Wang X. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L and its accumulating characteristics [J]. Environmental Science, 2005, 26(3): 167-171. (in Chinese)
- [5] 朱光旭, 黄道友, 朱奇宏, 等. 苎麻镉耐受性及其修复镉污染土壤潜力研究 [J]. 农业现代化研究, 2009, 30(6): 752-755.
Zhu G X, Huang D Y, Zhu Q H, et al. Tolerance and phytoremediation potential of Ramie for cadmium contaminated soil [J]. Research of Agricultural Modernization, 2009, 30(6): 752-755. (in Chinese)
- [6] 张金彪, 黄维南, 柯玉琴. 草莓对镉的吸收积累特性及调控研究 [J]. 园艺学报, 2003, 30(5): 514-518.
Zhang J B, Huang W N, Ke Y Q. Cadmium absorption characteristics of strawberry and regulative measures [J]. Horticulturae Sinica, 2003, 30(5): 514-518. (in Chinese)
- [7] 宋 瑜, 金 樑, 曹宗英, 等. 植物对重金属镉的响应及其耐受机理 [J]. 草业学报, 2008, 17(5): 84-91.
Song Y, Jin L, Cao Z Y, et al. Response and resistance mechanisms of plants to cadmium [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2008, 17(5): 84-91. (in Chinese)
- [8] 张呈祥, 陈为峰, 李 伟. 大花萱草对镉的耐性及积累特性 [J]. 生态学杂志, 2012, 31(6): 1341-1346.
Zhang C X, Chen W F, Li W. Characteristics of cadmium tolerance and enrichment of *Hemerocallis fulva* [J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(6): 1341-1346. (in Chinese)
- [9] 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. Plant physiological and biochemical test principle and technology [M]. Beijing: Advanced Education Press, 2000. (in Chinese)
- [10] 张银龙, 陆亚芳, 王亚超. 大气污染梯度下树木附生苔藓植物生理生化指标的变化 [J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2006, 30(5): 5-9.
Zhang Y L, Lu Y F, Wang Y C. Physiological and biochemical changes in epiphytic bryophytes under different air pollution levels [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2006, 30(5): 5-9. (in Chinese)
- [11] 孔德政, 裴康康, 李永华, 等. 铅、镉和锌胁迫对荷花生理生化的影响 [J]. 河南农业大学学报, 2010, 44(4): 402-407.
Kong D Z, Pei K K, Li Y H, et al. Effect of Cd, Zn and Pb stresses on physiology and biochemistry of lotus [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2010, 44(4): 402-407. (in Chinese)
- [12] 潘秋红, 施国新, 徐勤松, 等. Cu²⁺ 对菱叶片生理指标及超微结构的毒理学效应分析 [J]. 武汉植物学研究, 2009, 27(5): 527-532.
Pan Q H, Shi G X, Xu Q S, et al. Phytotoxicity of Cu²⁺ on physiological indices and ultrastructural responses in leaves of *Trapa bispinosa* Roxb [J]. Journal of Wuhan Botanical Research, 2009, 27(5): 527-532. (in Chinese)
- [13] 柯文山, 熊治延, 谢明吉, 等. 不同来源的海州香薷和野胡萝卜的铜抗性及其铜积累差异 [J]. 环境工程学报, 2007, 1(5): 94-100.
Ke W S, Xiong Z Y, Xie M J, et al. Differences in Cu resistance and accumulation of *Elsholtzia haichouensis* Sun and *Daucus carota* L populations from Cu mine sites and uncontaminated sites [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2007, 1(5): 94-100. (in Chinese)
- [14] 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)
- [15] 戴文娇, 宁 平, 刘晓海, 等. 类芦对铅的耐性及富集能力探讨 [J]. 环境工程学报, 2008, 2(7): 1004-1008.
Dai W J, Ning P, Liu X H, et al. Tolerance and accumulation of *Neyraudia reynaudiana* for Pb [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2008, 2(7): 1004-1008. (in Chinese)
- [16] 于方明, 仇荣亮, 周小勇, 等. 镉对超富集植物园锥南芥氮素代谢的影响研究 [J]. 土壤学报, 2008, 45(3): 498-502.
Yu F M, Qiu R L, Zhou X Y, et al. Effects of cadmium on activities of key nitrogen metabolism enzymes in leaves of *Arabis paniculata* Franch [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(3):

498-502. (in Chinese)

[17] 许大全,张玉忠,张荣铤. 植物光合作用的光抑制 [J]. 植物生理学通讯,1992,28(4):237-243.

Xu D Q,Zhang Y Z,Zhang R X. Photoinhibition of photosynthesis in plants [J]. Plant Physiology Communications,1992,28(4):237-243. (in Chinese)

[18] 江行玉,赵可夫. 植物重金属伤害及其抗性机理 [J]. 应用与环境生物学报,2001,7(1):92-99.

Jiang H Y,Zhao K F. Mechanism of heavy metal injury and resistance of plants [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology,2001,7(1):92-99. (in Chinese)

[19] 李冠喜,吴小芹,叶建仁. 杨树根际土自毒物质的积累、毒害及生物修复 [J]. 南京林业大学学报:自然科学版,2013,37(3):71-76.

Li G X,Wu X Q,Ye J R. Accumulation toxic properties and bioremediation of autotoxic substance in poplar rhizosphere soil [J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition,2013,37(3):71-76. (in Chinese)

[20] 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)

[21] Susana M,Liliana B,Roberto A,et al. Unravelling cadmium toxicity and tolerance in plants:Insight into regulatory mechanisms [J]. Environmental and Experimental Botany,2012,83:33-46.

[22] Huff A. Peroxidase-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogen peroxide [J]. Phytochemistry,1982,21:261-265.

[23] Ren M,Brbel L,Sylvia H,et al. Arsenate toxicity:Effects on oxidative stress response molecules and enzymes in red clover plants [J]. Plant Science,2002,163:961-969.

(上接第 173 页)

[21] Fang Y,Meng J,Zhang A,et al. Influence of shriveling on berry composition and antioxidant activity of Cabernet Sauvignon grapes from Shanxi vineyards [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2011,91(4):749-757.

[22] Kennedy J A,Hayasaka Y,Vidal S,et al. Composition of grape skin tannins at different stages of berry development [J]. Journal of Agriculture and Food Chemistry,2001,49:5348-5355.

[23] Ojeda H,Andary C,Kraeva E,et al. Influence of pre-and post-veraison on water deficit,synthesis and concentration of skin phenolic compounds during berry growth of *Vitis vinifera* cv. Shiraz [J]. American Journal of Enology and Viticulture,2002,53:261-267.

[24] Delrot S,Medrano H,Bavaresco L,et al. Methodologies and results in grapevine research [M]. Berlin: Springer Science Business Media,2010:389-390.

[25] Giovanelli G,Brenna O V. Evolution of some phenolic components, carotenoids and chlorophylls during ripening of three Italian grape varieties [J]. European Food Research and Technology,2007,225:145-150.

[26] Amandeep K S,Dennis J G,Lu J,et al. Effects of exogenous abscisic acid on antioxidant capacities,anthocyanins, and flavonol contents of muscadine grape (*Vitis rotundi folia*) skins [J]. Food Chemistry,2010,58(10):6503-6509.