

DOI: 10.3969/j.issn.1000-3142.2014.01.017

韦江玲, 潘良浩, 陈元松, 等. 重金属 Cr⁶⁺ 胁迫对茳苳生理生态特征的影响[J]. 广西植物, 2014, 34(1): 89–94Wei JL, Pan LH, Chen YS, et al. Physiological and ecological characteristics of *Cyperus malaccensis* to Cr⁶⁺ stress[J]. *Guihaia*, 2014, 34(1): 89–94

重金属 Cr⁶⁺ 胁迫对茳苳生理生态特征的影响

韦江玲^{1,2,3}, 潘良浩^{1,2}, 陈元松², 范航清^{1,2*}

(1. 广西红树林保护与利用重点实验室, 北海 536000; 2. 广西红树林研究中心, 北海 536000;

3. 广西山口红树林生态自然保护区管理处, 北海 536000)

摘要: 采用盆栽模拟试验, 研究了不同水平重金属 Cr⁶⁺ 对茳苳生理生态的影响, 探索了茳苳对重金属的抗性机理, 充实有关盐沼植物的污染生态学研究。结果表明: (1) Cr⁶⁺ 胁迫对茳苳生物量具抑制作用; (2) 叶绿素含量及叶绿素 a/b 比值显著降低, 并对净光合速率(Pn)、胞间 CO₂ 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)及气孔导度(Gs)产生显著负面影响; (3) 各浓度 Cr⁶⁺ 胁迫对茳苳根系活力表现为抑制效应; (4) 在 Cr⁶⁺ 胁迫下, 茳苳过氧化氢酶(CAT)活性均比对照低(除 50mg/L 外), 超氧化歧化酶(SOD)活性随 Cr⁶⁺ 浓度增加呈降低趋势, 而过氧化物酶(POD)活性则持续上升。丙二醛(MDA)、细胞膜透性和脯氨酸(Pro)随 Cr⁶⁺ 浓度增加显著增加, 表明 Cr⁶⁺ 胁迫对茳苳细胞质膜系统及主要细胞器的结构与功能都具有较强的破坏作用。

关键词: Cr⁶⁺; 茳苳; 胁迫; 生理生态特征

中图分类号: Q945.78 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2014)01-0089-06

Physiological and ecological characteristics of *Cyperus malaccensis* to Cr⁶⁺ stress

WEI Jiang-Ling^{1,2,3}, PAN Liang-Hao^{1,2}, CHEN Yuan-Song¹, FAN Hang-Qing^{1,2*}(1. *Guangxi Key Lab of Mangrove Conservation and Utilization*, Beihai 536000, China; 2. *Guangxi Mangrove Research Center*, Beihai 536000, China; 3. *Shankou Mangrove Ecosystem Nature Reserve Administration*, Beihai 536000, China)

Abstract: This study adopted a simulated experiment method by the means of planting *Cyperus malaccensis* in pots in order to study the different concentrations of Cr⁶⁺ stress effects on the plant eco-physiological characteristics and its resistance to the stress, aiming to obtain the species's toxicity mechanisms as well as its resistance to the metal, so as to provide reference to the pollution ecology of salt marsh plants. The results were as follows: (1) The biomass was inhibited drastically as the stress increased; (2) The contents of chlorophyll and the ratio of chlorophyll a and chlorophyll b reduced obviously, and there were obviously negative effects to net photosynthesis rate(Pn), intercellular CO₂ concentration(Ci), transpiration rate(Tr) and stoma conductivity(Gs); (3) The root vigor was inhibited significantly under Cr⁶⁺ stress; (4) The activity of CAT under Cr⁶⁺ stress were lower than the control group (except the concentrations of 50 mg · L⁻¹), the activity of SOD decreased, but the activity of POD increased all the time. The contents of MDA, proline and cytomembrane permeability increased obviously with the increasing of Cr⁶⁺ concentrations. Therefore, it highlighted that the Cr⁶⁺ stresses could mangle the cytomembrane system, the structures and functions of the major organelles of tea plant.

Key words: Cr⁶⁺; *Cyperus malaccensis*; stress; physiological and biochemical characteristics

收稿日期: 2013-07-14 修回日期: 2013-11-12

基金项目: 广西红树林保护与利用重点实验室基金(GKLMC-201207); 广西科学院基本业务费(12YJ25HS15, 13YJ22HS10)。

作者简介: 韦江玲(1983-), 女, 壮族, 广西柳州人, 硕士研究生, 主要从事滨海湿地保护与研究, (E-mail)ppweijl@163.cn。

*通讯作者: 范航清, 研究员, 首席科学家, 从事滨海湿地生态学研究, (E-mail)fanhq666@126.com。

随着流域和港口经济的高速发展,滨海盐沼湿地已成为重金属污染物的主要富集地之一并日益受到关注(何洁等,2013)。Cr⁶⁺是一种生物致畸和致突变的重要环境污染物(张乐乐等,2011),它易溶于水,并通过盐沼、水生等植物最终到达食物链的顶端,从而对人体健康造成伤害(Wang *et al.*,2006)。Cr⁶⁺对植物的生理毒害前人已做过大量研究(柳玲等,2010;郑爱珍,2007;石贵玉等,2005)。目前对盐沼植物在污染重金属方面的研究,主要集中在互花米草(*Spartina alterniflora*)(胡恭任等,2008),芦苇(*Phragmites australis*)(董志成等,2007)和翅碱蓬(*Suaeda heteroptera*)(朱鸣鹤等,2006)等植物上,而对我国盐沼湿地草本植物茳芏(*Cyperus malaccensis*)的研究则鲜有报道。仅有林来官(1994)对其分类地位、形态特征、种间区别、分布与经济价值等方面的描述及潘良浩等(2012)对茳芏及沉积物有机碳、全氮、全磷分布特征与季节动态的研究。

“珊瑚礁→海草→红树林→盐沼→滨海植被”是形成广西北部湾海陆过渡带的关键生态系统,原生盐沼植物是未来生态保护和恢复的重要选择,然而至今中国东南沿海有关原生盐沼植物的研究极少,广西近乎空白。本文研究 Cr⁶⁺ 胁迫下茳芏生理生态响应及抗性机理,从生理学角度揭示 Cr⁶⁺ 污染对茳芏的生理毒性,探索原生盐沼植物的重金属抗性机制,为进一步补充盐沼湿地污染生态学的研究提供资料,为河口湿地保护及盐沼植物的应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试植物为广西原生盐沼植物茳芏新萌发的幼苗(高度<5 cm,带有根状茎),采于广西钦州茅尾海湿地(108°28′~108°37′ E;21°46′~21°54′ N)。供试土壤为未种过植物的沙土,来源于钦州茅尾海湿地光滩。沙土经自然风干、捣碎、剔除杂物后过3 mm筛处理后、采用常规分析方法测定土壤基本性质(鲁如坤,2000)。经测定:pH 6.88,有机质含量 8.43 g·kg⁻¹,速效磷 2.71 mg·kg⁻¹,速效钾 39.48 mg·kg⁻¹,铬含量 1.54 mg·kg⁻¹。具有重金属本底值较小的特点,符合试验要求。

1.2 盆栽试验

于塑料盆(底径 24.5 cm,高度 29 cm)中装等量

1.5 kg 土壤,土壤表面距盆上边缘距离 6 cm。每盆种幼苗 5 株,每 2 d 浇灌 200 mL、盐度为 10 海水以保持土壤盐度及水分,直到幼苗正常成活。一个月后选取生长较为一致的茳芏进行 Cr⁶⁺ 胁迫试验。铬源为分析纯 K₂CrO₄,溶液中 Cr⁶⁺ 的最终浓度为 0.5、5、10、50、100、200 和 500 mg·L⁻¹,以不加 Cr⁶⁺ 为零对照。每 5 d 每盆浇灌初始处理时相同重金属浓度的溶液 250 mL,其余时间浇灌盐度为 10 的等量海水,以不流出培养容器为限。浇灌 60 d 后测定茳芏的生理指标。各处理组设置 3 个重复,最终结果取 3 次重复测定的平均值。

1.3 测试项目及方法

茳芏受害症状观察:间隔 7 d 观察、记载茳芏生长状况。萌苗率=(新萌苗株数/50)×100%,死亡率=[死亡数/(50+新萌苗数)]×100%,其中 50 为在初始重金属浇灌试验时每个处理组总的株数。

生长指标测定:叶面积采用 AM-300 叶面积仪扫描测量;生物量以整盆所有植株为对象,洗净擦干计鲜重,后置于烘箱中 105 °C 杀青 15 min,60 °C 烘干至恒重后测干重。抗性系数=对照组干重/各浓度胁迫干重。

光合生理指标测定:叶绿素含量采用分光光度法测定(mg·g⁻¹)(张治安等,2004);用英国 PP Systems 公司生产的 TPS-1 便携式光合测定系统测定净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、细胞间隙 CO₂ 浓度(Ci)和气孔导度(Gs)。

根系活力测定:采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法(μg·g⁻¹·h⁻¹)(侯福林,2010)。

抗性生理指标测定:CAT 活性用分光光度法,以 1 min OD₂₄₀ 值减少 0.1 为 1 个酶活力单位(μg·g⁻¹·min⁻¹ FW)(王晶英,2003)。SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)比色法,以抑制 NBT 光氧化还原的 50% 为 1 个酶活性单位(U·g⁻¹ FW)(熊庆娥,2003)。POD 活性采用愈创木酚氧化法测定,以 1 min OD₄₇₀ 值增加 0.01 为 1 个酶活性单位(U·g⁻¹ FW)(高俊凤,2006)。细胞膜透性采用 DDS-11A 电导仪测定,以相对电导率(%)表示(熊庆娥,2003)。丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定(μmol·mg⁻¹·min⁻¹ FW)(赵世杰等,1994)。脯氨酸(Pro)含量采用磺基水杨酸浸提法测定(μg·g⁻¹ DW)(高俊凤,2006)。

1.4 统计分析

数据运用 Excel 和 SPSS17.0 统计软件处理。

采用 LSD 进行显著性检验 ($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 Cr⁶⁺胁迫对茛苳生长的影响

在 Cr⁶⁺胁迫下,各浓度组茛苳均出现不同程度的受害症状:根部最先受到伤害,主根变短变小颜色变黑;叶片卷曲并失绿,茎叶出现棕黑色斑点。在低浓度(0.5, 5 mg · L⁻¹)胁迫下,茛苳幼苗率比对照低,其余浓度组幼苗率均比对照高;低浓度 Cr⁶⁺处理对茛苳死亡率无影响,但随着 Cr⁶⁺浓度的逐步增大,死亡率逐步增高(表 1)。在 0.5~10 mg · L⁻¹浓度胁迫下,茛苳株高与对照无显著差异,而高浓度则受到极显著抑制,浓度与株高之间的相关系数为 $r = -0.933^{**}$;除 0.5 mg · L⁻¹外,茛苳叶面积均受到抑制($r = -0.866^{**}$);茛苳总鲜重和总干重均比对照低且差异显著($r_{\text{鲜重}} = -0.921^{**}$, $r_{\text{干重}} = -0.807^{*}$);抗性系数从 0.90(5 mg · L⁻¹)降到 0.47(500 mg · L⁻¹)(表 2)。总体来说, Cr⁶⁺胁迫对茛苳的生长是抑制的。

表 1 不同浓度 Cr⁶⁺对茛苳幼苗和死亡的影响

Table 1 Effects of different Cr⁶⁺ concentrations on the sprouting rate and mortality rate of *C. malaccensis*

浓度 Concentration (mg · L ⁻¹)	0 (CK)	0.5	5	10	50	100	200	500
总株数 Total (plant)	50	50	50	50	50	50	50	50
新幼苗数 Sprouting (plant)	20	17	18	27	21	23	21	22
幼苗率(%) Sprouting rate	40	34	36	54	42	46	42	44
死亡数 Mortality (plant)	—	—	—	2	3	5	8	14
死亡率(%) Mortality rate	—	—	—	2.60	4.22	6.84	11.27	19.44

2.2 Cr⁶⁺胁迫对茛苳光合生理指标的影响

2.2.1 Cr⁶⁺胁迫对叶绿素含量的影响 从表 3 可知, Cr⁶⁺胁迫下,茛苳叶绿素 a、b 和 a+b 含量都随浓

表 3 Cr⁶⁺胁迫对茛苳叶绿素的影响

Table 3 Effects of stress Cr⁶⁺ on chlorophyll content in *C. malaccensis* leaves

浓度 Concentration (mg · L ⁻¹)	叶绿素 a Chl a (mg · g ⁻¹)	降幅 Declining rate contrast to CK (%)	叶绿素 b Chl b (mg · g ⁻¹)	降幅 Declining rate contrast to CK (%)	叶绿素 a+b Chl a+Chl b (mg · g ⁻¹)	降幅 Declining rate contrast to CK (%)	叶绿素 a/b Chl a/Chl b
0 (CK)	1.22a	—	0.4a	—	1.62a	—	3.05a
0.5	1.09b	10.66	0.38a	5.00	1.47b	9.26	2.87b
5	1.02bc	16.39	0.35b	12.50	1.37c	15.43	2.91b
10	1.00bc	18.03	0.35b	12.50	1.35c	16.67	2.86b
50	0.97c	20.49	0.34b	15.00	1.31d	19.14	2.85b
100	0.95c	22.13	0.33b	17.50	1.28d	20.99	2.88b
200	0.85d	30.33	0.34b	15.00	1.19e	26.54	2.50c
500	0.72e	40.98	0.31c	22.50	1.03f	36.42	2.32c

表 2 不同浓度 Cr⁶⁺对茛苳生长的影响

Table 2 Effects of different Cr⁶⁺ concentrations on seedling growth of *C. malaccensis*

浓度 Concentration (mg · L ⁻¹)	株高 Height (cm)	叶面积 Leaf area (mm ²)	鲜重 Total fresh weight (g/pot)	干重 Total dry weight (g/pot)	抗性系数 Resistance index
0(CK)	150.40a	3 699.60b	254.29a	83.19a	—
0.5	153.70a	3 764.40a	235.24c	73.17b	0.88
5	150.77a	3 526.40c	244.69b	70.78c	0.90
10	153.30a	3 475.80d	204.18d	61.84d	0.71
50	125.29b	2 882.60e	190.11e	64.74e	0.81
100	121.29b	2 795.19f	183.95f	59.26f	0.69
200	112.47c	2 627.60g	144.56g	55.83g	0.60
500	82.96d	2 090.40h	95.58h	47.13h	0.47

注:表中不同英文字母表明两者的差异显著水平($P < 0.05$)。下同。

Note: Different letters indicate significantly differences at $P < 0.05$ level respectively. The same below.

度的增加而持续下降,与 Cr⁶⁺处理组的相关系数分别为 $r_{\text{chl a}} = -0.866^{**}$ 、 $r_{\text{chl b}} = -0.716^{*}$ 、 $r_{\text{chl a+chl b}} = -0.849^{**}$ 。呈现显著或极显著负相关。叶绿素 a+b 在高浓度(200, 500 mg · L⁻¹)胁迫下降幅分别达 36.13%、57.28%,叶绿素 a 降幅比叶绿素 b 快,说明 Cr⁶⁺胁迫对叶绿素 a 的抑制作用大于对叶绿素 b 的抑制作用。叶绿素 a/b 值均比对照低。

2.2.2 Cr⁶⁺胁迫对茛苳光合作用的影响 从表 4 可知,茛苳净光合速率(Pn)随 Cr⁶⁺浓度的增加显著下降趋势($r = 0.888^{**}$),但低浓度(0.5, 5 mg · L⁻¹)胁迫下 Pn 比对照高,Pn 在高浓度 200 mg · L⁻¹和 500 mg · L⁻¹下分别比对照减少 42.70%和 65.25%。茛苳气孔导度(Gs)、胞间 CO₂浓度(Ci)和蒸腾速率(Tr)也随 Cr⁶⁺浓度的增加而趋于下降($r_{\text{Gs}} = 0.895^{**}$, $r_{\text{Tr}} = 0.918^{**}$, $r_{\text{Ci}} = 0.841^{*}$)。但 Ci 在低浓度(0.5, 5 mg · L⁻¹)比对照高。光合作用呈现出浓度越高受抑制作用越强的趋势。

2.3 Cr⁶⁺处理对茛苳根系活力的影响

图 1 显示, Cr⁶⁺胁迫下,茛苳根系活力均比对照低并与对照存在显著差异, Cr⁶⁺浓度 < 200 mg · L⁻¹

表 4 Cr⁶⁺胁迫对荳芡光合作用的影响Table 4 Effects of Cr⁶⁺ stress on photosynthesis in *C. malaccensis* leaves

浓度 Concentration (mg·L ⁻¹)	净光合速率 Net photosyn- thetic rate Pn (μmol CO ₂ · m ⁻² · s ⁻¹)	气孔导度 Stomatal conductivity Gs (mmol · m ⁻² · s ⁻¹)	蒸腾速率 Transpira- tion rate Tr (mmol HO ₂ · m ⁻² · s ⁻¹)	胞间 CO ₂ 浓度 Intercellular CO ₂ concen- tration Ci (mg·L ⁻¹)
0(CK)	7.54c	95.90a	1.94a	224.70b
0.5	9.74a	92.10a	1.93a	243.70a
5	8.49b	81.30b	1.87b	232.40ab
10	7.49c	74.50c	1.73c	208.00c
50	6.58d	70.00d	1.60d	190.80d
100	5.53e	65.00e	1.48e	178.90e
200	4.32f	53.34f	1.23f	161.60f
500	2.62g	37.30g	0.97g	145.90g

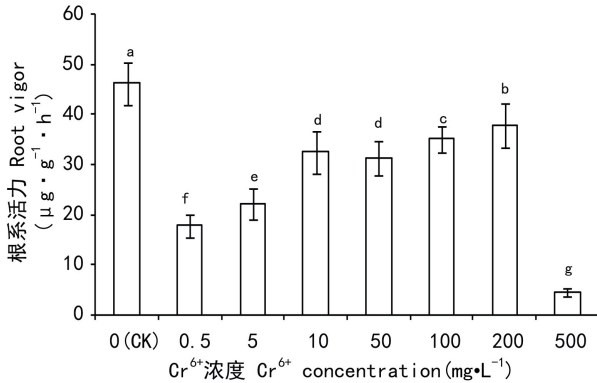


图 1 不同浓度 Cr⁶⁺ 处理对荳芡根系活力的影响
Fig. 1 Effects of different concentrations of Cr⁶⁺
on root vigor of *Cyperus malaccensis*

时,荳芡根系活力有缓慢上升趋势,但在 500 mg·L⁻¹胁迫下根系活力急速下降,仅 4.49 μg·g⁻¹·h⁻¹,降幅达 90.29%,其与浓度之间相关性不显著($r = 0.585$)。

2.4 Cr⁶⁺ 处理对荳芡抗性生理指标的影响

2.4.1 Cr⁶⁺ 胁迫对 CAT、POD 和 SOD 活性的影响

图 2 显示,在 50 mg·L⁻¹胁迫下,荳芡 CAT 活性比对照高,其他浓度组荳芡 CAT 活性均比对照低。高浓度 200 mg·L⁻¹ 和 500 mg·L⁻¹ 胁迫下荳芡 CAT 活性降幅分别为 7.66% 和 41.56%。表明高浓度 Cr⁶⁺ 对荳芡 CAT 活性产生明显负效应。Cr⁶⁺ 处理下荳芡 POD 活性均比对照高且与对照存在显著差异。低浓度(0.5, 5 mg·L⁻¹)对荳芡体内 POD 活性的促进作用最大,增幅分别为 89.58% 和 86.36%。表明荳芡能够通过提高体内 POD 活性来启动自身的保护酶机制以应对外界带来的伤害。SOD 活性随着 Cr⁶⁺ 浓度的增加而降低,且与对照存在显著差

异(除 0.5 mg·L⁻¹组外),高浓度 200 mg·L⁻¹ 和 500 mg·L⁻¹ 胁迫下,荳芡 SOD 降幅分别为 39.42% 和 60.07%。Cr⁶⁺ 浓度与荳芡 CAT、POD 和 SOD 活性的相关性系数分别为 $r_{\text{CAT}} = 0.756^*$, $r_{\text{POD}} = 0.558$, $r_{\text{SOD}} = 0.962^{**}$, Cr⁶⁺ 浓度与荳芡 CAT 活性存在显著相关,与 SOD 活性之间存在极显著相关,与 POD 活性不相关。

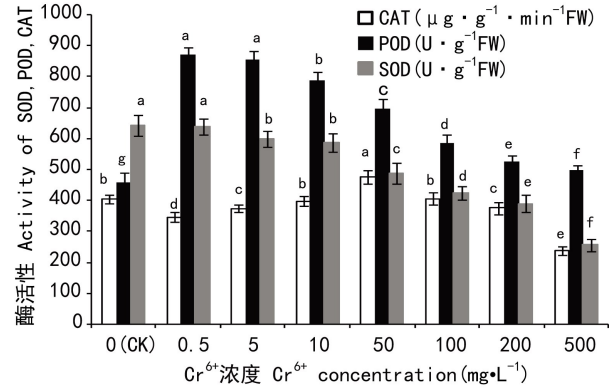


图 2 不同浓度 Cr⁶⁺ 处理对荳芡 CAT、POD 和 SOD 的影响
Fig. 2 Effects of different concentrations of Cr⁶⁺
on CAT, POD and SOD of *C. malaccensis*

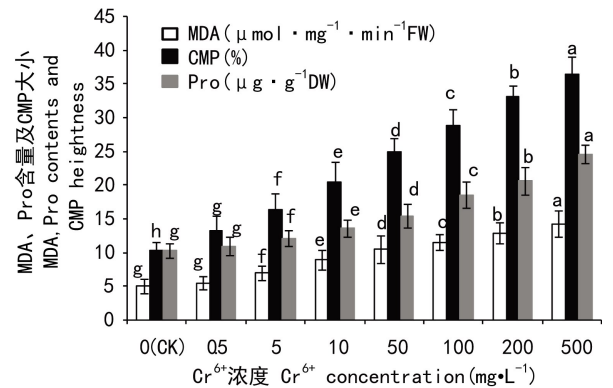


图 3 不同浓度 Cr⁶⁺ 处理对荳芡丙二醛、质膜透性和游离脯氨酸的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of Cr⁶⁺
on MDA, CMP and Pro of *C. malaccensis*

2.4.2 Cr⁶⁺ 胁迫对丙二醛(MDA)含量、细胞膜透性和游离脯氨酸(Pro)的影响 丙二醛(MDA)是反映植物膜脂过氧化程度最为直接的指标,而相对电导率是反映植物透性的指标,间接地反映植物膜脂过氧化程度。图 3 显示,荳芡 MDA 随 Cr⁶⁺ 浓度的升高显著上升,呈极显著正相关关系($r = 0.805^*$)。与对照比较,在最高浓度 500 mg·L⁻¹ 时,MDA 含量增幅达 185.74%。相对电导率(CMP)也随 Cr⁶⁺ 浓

度的升高增加($r=0.868^{**}$), 与对照比较, 在最高浓度 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, CMP 增幅高达 255.66%, MDA 和 CMP 的显著增高说明 Cr⁶⁺ 胁迫下破坏了苳苳叶片的细胞膜结构。随着 Cr⁶⁺ 浓度的增加, 苳苳游离脯氨酸(Pro)含量也呈直线上升趋势, 在浓度 $500 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, Pro 比对照增加了 140.76%。其相关系数 $r=0.912^{**}$, 呈极显著正相关。

3 结论与讨论

植物生长情况是重金属对植物毒性的评价标准之一。本研究表明, 随 Cr⁶⁺ 胁迫浓度的增加, 苳苳形态受害程度加深, 基本受害症状为: 根系变小变黑, 叶片卷曲失绿, 茎叶出现棕黑色斑点。苳苳出现的毒害症状同水花生在 Cr³⁺、Cr⁶⁺ 胁迫下出现的症状(周红卫等, 2002)较相似。叶片黄化的原因可能是过量 Cr⁶⁺ 直接或间接与叶片内的铁(Fe)相互作用, 导致植物对铁吸收减少, 影响叶绿素原因所致。根部变黑的原因可能是过量 Cr⁶⁺ 被植株吸收后滞留在根部而使其变黑(郑爱珍, 2007), 其具体原因有待深入研究。苳苳即使是在低浓度($0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫下, 鲜、干重均比对照低, 浓度越高, 生物量约小, 这与柳玲等(2010)对芹菜在低浓度 Cr⁶⁺ 胁迫下生物量增加的结果相反。表明植物对 Cr⁶⁺ 胁迫的生长反应存在种间差异。

生态效应是湿地植物选择与应用的重要依据。本试验 Cr⁶⁺ 胁迫下对苳苳净光合速率和蒸腾速率均降低。净光合速率的降低导致吸碳、释氧量降低, 因此苳苳胞间 CO₂ 浓度(Ci)降低。叶片失水使保卫细胞膨压降低(蔡海霞等, 2011), 引起气孔关闭, 气孔导度(Gs)下降。在光合作用的过程中, 叶绿素 b 主要进行光能的收集, 叶绿素 a 主要进行光能的转化, 叶绿素 a/b 值越高, 则植物对光能的利用效率越高(Huff, 1982)。苳苳光能利用效率随 Cr⁶⁺ 的增高而降低, 其原因是 Cr⁶⁺ 胁迫下光合合成单位及膜结合电子传递进程被破坏, 导致 PSI 和 PSII 电子传递速率降低(Biehler *et al.*, 1996)。表明叶绿素含量和光能利用效率降低等非气孔因素是苳苳净光合速率降低的主要原因。重金属胁迫下叶绿素含量受抑制的报道目前已有不少(Chatterjee *et al.*, 2000; Pankovi *et al.*, 2000)。叶绿素减少的原因之一是重金属离子被植物吸收后, 植物细胞内的重金属离子作用于叶绿素合成途径的 δ -氨基乙酰丙酸合

成酶、原叶绿素酯还原酶和胆色素原脱氢酶的肽链中富含-SH 的部分, 改变其正常构型, 抑制了酶的活性及阻碍了叶绿素的合成(张呈祥等, 2013)。重金属胁迫作用于植物细胞上的主要部位是膜系统(张金彪, 2007), 因此重金属能使叶绿体被膜消失, 造成叶绿体不可逆损伤, 导致叶绿素含量降低。

本试验中, 在 Cr⁶⁺ 胁迫下苳苳根系活力比对照低, 原因是在 Cr⁶⁺ 与琥珀酸脱氢酶结合降低了根系呼吸作用(Bernal *et al.*, 1994)。抗性生理研究表明, 植物在重金属逆境伤害的初始部位是细胞膜, 关于膜伤害机制的研究, 其中自由基损害学说的应用较为广泛(谭万能, 2006)。CAT、SOD 和 POD 等组成了一个有效的活性氧清除系统。正常生长条件下, SOD、POD 和 CAT 及其他保护物质能够维持自由基在植物体内产生和清除的动态平衡, 从而排除了自由基对植物细胞膜结构潜在伤害的可能性。本研究中, 适当浓度 Cr⁶⁺ ($50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)对苳苳 CAT 活性有刺激作用, SOD 活性随 Cr⁶⁺ 浓度的升高呈现逐渐下降趋势, 两者在高浓度含量下都受到抑制, 因为重金属离子在机体内积累量加大使植物细胞内产生的活性氧自由基超过保护酶系统的清除能力时, 则诱导对植物细胞的过氧化损伤(谢翔宇等, 2013)。植物在逆境中, 细胞原生质膜中的不饱和脂肪酸会发生过氧化作用产生 MDA, 因而 MDA 含量可反映膜脂过氧化作用的强弱, 质膜透性可表示膜伤害或变性程度(郑爱珍, 2007)。苳苳在遭受 Cr⁶⁺ 胁迫后, MDA 含量、CMP 均显著增加, 显示膜脂过氧化水平升高, 膜结构受损伤程度加深, 而苳苳体内过氧化物的增多会增加 POD 底物浓度, 导致 POD 酶活性上升, 说明 Cr⁶⁺ 胁迫对苳苳有明显的毒害作用。植物体内的脯氨酸(Pro)含量是反应植物受逆境胁迫的重要指标(赵福庚等, 2002)。本实验中, Cr⁶⁺ 胁迫使苳苳 Pro 持续积累, 表明苳苳对 Cr⁶⁺ 具有一定的适应和抵御能力, 但这种能力是有限度的, 不足以弥补膜脂过氧化作用所引起的伤害。

参考文献:

- 王晶英. 2003. 植物生理生化实验技术与原理[M]. 哈尔滨: 东北林业大学出版社: 82—83
- 张治安, 张美善, 蔚荣海. 2004. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社: 65—67
- 林来官. 1994. 福建植物志(第六卷)[M]. 福建: 科学技术出版社: 316
- 侯福林. 2010. 植物生理学实验教程[M]. 北京: 科学出版社, 2: 49—51

- 高俊凤. 2006. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社
- 鲁如坤. 2000. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社
- 熊庆娥. 2003. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社
- Biehler K, Migge A, Fock HP. 1996. The role of malate dehydrogenase in dissipating excess energy under water stress in two wheat species[J]. *Photosynthetica*, **32**(3): 431—438
- Bernal MP, McGrath SP. 1994. Effects of pH and heavy metal concentrations in solution culture on the proton release, growth and elemental composition of *Alyssum murale* and *Raphanus sativus* L[J]. *Plant & Soil*, **116**(1): 83—92
- Cai HX (蔡海霞), Wu FZ (吴福忠), Yang WQ (杨万勤). 2011. Effects of drought stress on the photosynthesis of *Salix parapsis* and *Hippophae rhamnoides* seedlings(干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **31**(9): 2 430—2 436
- Chatterjee J, Chatterjee C. 2000. Phytotoxicity of cobalt chromium and copper in cauliflower[J]. *Environ Poll*, **109**: 64—74
- Dong ZC(董志成), Pao ZY(鲍征宇), Xie SY(谢淑云), et al. 2007. Resistance and toxic heavy metal uptake and accumulation by *Phragmites australis* in a wetland(湿地芦苇对有毒重金属元素的抗性及其吸收和累积)[J]. *Geol Sci Technol Inf*(地质科技情报), **39**(2): 279—285
- He J(何洁), Gao YT(高钰婷), He X(贺鑫), et al. 2013. The effect of Zn and Cd on growth and antioxidant enzymes activity of *Suaeda heteroptera* Kitagawa(重金属 Zn 和 Cd 对翅碱蓬生长及抗氧化酶系统的影响)[J]. *Acta Sci Circumst*(环境科学学报), **33**(1): 312—320
- Hu GR(胡恭任), Yu RL(于瑞莲). 2008. The study on heavy metal contents and enrichment in *Spartina anglicain* Quanzhou bay(泉州湾互花米草中重金属富集程度分析)[J]. *J Huaqiao Univ; Nat Sci Ed*(华侨大学学报·自然科学版), **9**(2): 250—255
- Huff A. 1982. Peroxidase-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogen peroxide [J]. *Phytochem*, **21**(2): 261—265
- Liu L(柳玲), Lü JY(吕金印), Zhang W(张微). 2010. Effects of Cr^{6+} treatment on Cr accumulation and physiological characteristics of celery (*Apium Graveolens*)(不同浓度 Cr^{6+} 处理下芹菜的铬积累量及生理特性)[J]. *J Nucl Agric Sci*(核农学报), **24**(3): 639—644
- Pan LH(潘良浩), Wei JL(韦江玲), Chen YS(陈元松), et al. 2012. Distribution characteristics and seasonal dynamics of organic carbon, total nitrogen, total phosphorus of *Cyperus malaccensis* and sediments in Maowei Hai bay(茅尾海茳芏及沉积物有机碳、全氮、全磷分布特征与季节动态)[J]. *Wetland Sci*(湿地科学), **10**(4): 467—473
- Pankovi CD, Plesnicar IM, Petrovic AM, et al. 2000. Effects of nitrogen nutrition on photosynthesis in Cd treated sunflower plants [J]. *Ann Bot*, **86**: 841—847
- Shi GY(石贵玉), Chen MM(陈明媚). 2005. Effects of Cr^{6+} and Se on the growth and physiology of rice seedling(铬、硒对水稻幼苗生长和生理的影响)[J]. *Guihaia*(广西植物), **25**(3): 281—284
- Tan WN(谭万能), Li ZA(李志安), Zou B(邹碧). 2006. Molecular mechanisms of plant tolerance to heavy metals(植物对重金属耐性的分子生态机理)[J]. *J Plant Ecol*(植物生态学报), **30**(4): 703—712
- Wang XS, Qin Y. 2006. Removal of Ni(II), Zn(II) and Cr(VI) from aqueous solution by *Alternanthera philoxeroides* biomass [J]. *J Hazard Mat*, **138**: 582—588
- Xie XY(谢翔宇), Weng BS(翁铂森), Zhao SZ(赵素贞). 2013. Effects of arbuscular mycorrhizal inoculation and Cd stress on the growth and antioxidant enzyme system of *Kandelia obovata*(Cd胁迫下接种丛枝菌根真菌对秋茄幼苗生长与抗氧化酶系统的影响)[J]. *J Xiamen Univ; Nat Sci Edi*(厦门大学学报·自然科学版), **52**(2): 244—252
- Zhang LL(张乐乐), Shi GX(施国新), Wang J(王娟), et al. 2011. Toxic of chromium(Cr^{6+}) on the callus of *Alternanthera philoxeroides*(铬对水花生愈伤组织的毒害效应)[J]. *Guihaia*(广西植物), **31**(3): 377—382
- Zhu MH(朱鸣鹤), Ding YS(丁永生), Ding DW(丁德文). 2006. Seasonal variation about accumulation distribution and transference of heavy metals in *Suaeda heteroptera*(翅碱蓬体内重金属在不同生长期的分布与迁移)[J]. *Chin Environ Sci*(中国环境科学), **26**(Suppl): 110—113
- Zhao SJ(赵世杰), Xu CC(许长成), Zou Q(邹琦), et al. 1994. Improvements of method for measurement of malondialdehyde in plant tissues(植物组织中丙二醛测定方法的改进)[J]. *Plant Physiol Comm*(植物生理学通讯), **26**(4): 62—65
- Zhou HW(周红卫), Shi GX(施国新), Xu QS(徐勤松), et al. 2002. Effects of Cr^{6+} and Cr^{3+} on biochemical and physiological characters of *A. philoxeroides*(Cr^{6+} 和 Cr^{3+} 对水花生几种生理生化指标的影响比较)[J]. *Rural Eco-Environ*(农村生态环境), **18**(4): 35—40
- Zheng AZ(郑爱珍). 2007. Effects of heavy metal Cr^{6+} pollution on physiological and biochemical characteristics of pepper (*Capsicum annuum*) seedlings(重金属 Cr^{6+} 污染对辣椒幼苗生理生化特性的影响)[J]. *J Agro-Environ Sci*(农业环境科学学报), **26**(4): 1 343—1 346
- Zhang XX(张呈祥), Chen WF(陈为峰). 2013. Physiological-ecological responses of *Iris germanica* to Cd stress and its accumulation of Cd(德国鸢尾对Cd胁迫的生理生态响应及积累特性)[J]. *Acta Ecol Sin*(生态学报), **33**(7): 2 165—2 172
- Zhang JB(张金彪), Huang WN(黄维南). 2007. Effects of cadmium stress on photosynthetic functions of strawberry(镉胁迫对草莓光合的影响)[J]. *Chin J Appl Ecol*(应用生态学报), **18**(7): 1 673—1 676
- Zhao FG(赵福庚), Liu YL(刘友良), Zhang WH(章文华). 2002. Proline metabolism in the leaves of barley seedlings and its relation to salt tolerance(大麦幼苗叶片脯氨酸代谢及其与耐盐性的关系)[J]. *J Nanjing Agric Univ*(南京农业大学学报), **25**(2): 7—10