

镉胁迫下旱柳无性系耐镉性变异及生理变化

徐爱春¹, 陈益泰², 陈庆红¹, 王树凤²

(1. 湖北省农业科学院 果树茶叶研究所, 湖北 武汉 430209; 2. 中国林业科学研究院 亚热带林业研究所, 浙江 富阳 311400)

摘要: 以 10 个旱柳 *Salix matsudana* 无性系为试验材料, 研究了水溶液中镉胁迫时旱柳耐镉性性状的遗传特性、耐镉性强弱及叶片生理性状变化。结果表明: 水溶液中镉质量浓度为 30 ~ 60 mg·L⁻¹ 时, 旱柳地上部镉质量分数、地上部生物量、根系生物量、地上部镉积累量、根系镉积累量和叶绿素质量分数等 6 个性状的耐镉性遗传力较高。在此条件下, 10 个旱柳无性系耐镉性强弱顺序为 13 号 > 8 号 > 16 号 ≈ 18 号 ≈ 9 号 > 2 号 ≈ 4 号 > 10 号 > 3 号 > 5 号。镉胁迫下, 旱柳叶片生理性状变化表现为: 叶绿素和可溶性蛋白质量分数降低、膜透性减少、丙二醛质量分数增加、脯氨酸质量分数变化无一致规律。表 4 参 20

关键词: 植物学; 旱柳; 镉; 耐性; 生理变化

中图分类号: S718.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-5692(2009)05-0674-08

Cd tolerance and leaf physiology changes in ten clones of *Salix matsudana* with Cd stress

XU Ai-chun¹, CHEN Yi-tai², CHEN Qing-hong¹, WANG Shu-feng²

(1. Institute of Fruit and Tea, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430209, Hubei, China; 2. Research Institute of Subtropical Forestry, The Chinese Academy of Forestry, Fuyang 311400, Zhejiang, China)

Abstract: It is serious for Cd contamination in environment in currently, there is large potential of phytoremediation of Cd contamination. For provide excellent phytoremediation material, this study focused on willow Cd tolerant heritability, ability of Cd tolerance, and changes in leaf physiological characteristics with Cd stress by hydroponics. Ten clones (No.2, No.3, No.4, No.5, No.8, No.9, No.10, No.13, No.16, and No.18) of *Salix matsudana* were used as the experimental material. Results indicated that when Cd concentration was 30 - 60 mg·L⁻¹, the content, mass, and amount of accumulation in aboveground organs, the mass and amount of accumulation in roots, and chlorophyll all had stronger heritability. For the 10 clones, Cd tolerance was in the order of: No.13 > No.8 > No.16 ≈ No.18 ≈ No.9 > No.2 > No.4 > No.10 > No.3 > 5. Leaf physiology changes with Cd stress indicated that chlorophyll and dissolubility protein contents as well as conductance decreased, malondialdehyde (MDA) increased, and proline change followed no pattern. [Ch, 4 tab. 20 ref.]

Key words: botany; *Salix matsudana*; cadmium(Cd); tolerance; physiological change

镉(Cd)是自然界中广泛存在的毒性很强的重金属之一。随着现代工农业生产的发展,“三废”(废气、废水、废渣)的排放,污水灌溉,农药、除草剂和化肥的使用越来越多,环境中镉污染问题日趋严峻^[1-2],从而使人们生存的安全性受到严重威胁。有关镉污染对植物造成危害的问题,已引起人们的高度重

收稿日期: 2008-10-07; 修回日期: 2009-03-11

基金项目: 国家林业局重点引进国际先进农业科学技术计划(948 计划)项目(2006-04-06)

作者简介: 徐爱春: 助理研究员, 博士, 从事林木遗传育种、果树栽培营养生理学等研究。E-mail: xuaichun666@sina.com。通信作者: 陈益泰: 研究员, 博士, 从事林木遗传育种等研究。E-mail: ytchen6789@sina.com

视, 这一领域的研究也日趋活跃^[1,3-4]。一直以来, 关于植物对土壤重金属吸收富集能力方面的研究绝大部分限于农作物、经济作物等草本植物或水生植物, 对木本植物, 特别是造林用材树种、观赏绿化树种和经济林树种的研究只有零星分散的工作。木本植物尤其是高大的乔木对重金属污染环境的修复作用有着很大优势, 它们生物产量高, 有巨大的根、茎、叶面积作用于环境, 因此, 研究木本植物对重金属镉的吸收积累能力有着重要意义。柳树 *Salix* 生长快, 根系发达, 易繁殖, 适应性强。柳树发达的根系是一个很好的生物过滤器, 能有效地从土壤和废水中吸收重金属元素, 对受工业金属等污染的土壤起到生物整治的作用。作者用营养液培养法, 研究了 10 个旱柳 *Salix matsudana* 无性系对镉吸收积累能力及镉胁迫下叶片生理性状的变化, 一是为植物修复重金属污染环境提供优良柳树品系; 二是通过研究镉胁迫下旱柳的生理性状变化, 为提高旱柳镉吸收积累量的栽培技术提供理论依据, 为利用木本植物修复与改善重金属污染土壤提供有益的参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验材料来自于杭州湾南岸慈溪新围海涂和上虞海涂九六丘上的旱柳天然群体。2005 年夏季从旱柳天然群体中挑选 22 个单株, 扦插繁殖成无性系。枝条取回后马上扦插到穴盘中, 待扦插苗高 10 cm 左右时移植入花盆, 4 株·盆⁻¹。花盆内直径为 18 cm, 高 18 cm, 装土 2.5 kg·盆⁻¹。旱柳生长期间除草, 浇水, 保持苗木正常生长。待苗木长到高为 50 cm 左右时, 选取长势较好且一致的 10 个无性系进行营养液培养。

1.2 实验方法

1.2.1 溶液培养方法 营养液培养容器为 40 cm × 20 cm × 15 cm 的塑料箱, 桶内放水 10.0 L, 上面盖上有孔的木板, 每孔内放 1 株苗, 苗木用海绵固定。实验用 Hoagland 营养液。营养液成分(mg·L⁻¹)组成为: KNO₃, 606; NH₄H₂PO₄, 115; MgSO₄·7H₂O, 493; Ca(NO₃)₂·4H₂O, 944; MnSO₄·4H₂O, 22.3; ZnSO₄·7H₂O, 8.6; H₃BO₃, 6.2; KI, 0.83; Na₂MoO₄·2H₂O, 0.25; CuSO₄·5H₂O, 0.025; CoCl₂·6H₂O, 0.025; FeSO₄·7H₂O, 27.85; Na₂-EDTA, 37.25。控制营养液 pH 6.5 左右(用氢氧化钠或氯化氢调节)。试验环境光照强度为 9 000 ~ 14 000 lx, 光照 10 h·d⁻¹, 用吹气泵不间断连续吹气, 7 d 更换一次营养液。营养液培养 1 周后实施镉处理, 镉采用 CdCl₂·2.5H₂O 配成不同质量浓度溶液后加入。实验设 3 个处理, $\rho(\text{Cd})$ 分别为 0, 30, 60 mg·L⁻¹。按照裂区设计, 镉质量浓度处理为主处理, 无性系为副处理。每个主处理包含 10 个无性系, 各 2 株苗木。质量浓度处理重复 3 次, 无性系副处理重复 9 次。每个无性系合计 18 株。在镉胁迫 30 d 后, 收集植株根、茎、叶洗净, 烘干, 测定植株茎叶和根系生物量、镉质量分数、净积累量和各项生理指标, 估算主要性状的遗传力(重复力), 并对无性系耐镉性进行综合评价。

1.2.2 测定方法 ①镉质量分数测定。镉处理后, 采集根、茎、叶样品迅速带回室内, 用自来水(3.0 min)—0.1%(体积分数)洗涤剂(1.0 min)—自来水(3.0 min)—自来水(3.0 min)—0.2%(体积分数)氯化氢溶液(0.5 min)—蒸馏水(3.0 min)—蒸馏水(3.0 min)—无离子水(3.0 min)—无离子水(3.0 min)系列漂洗, 105 ℃杀青 20.0 min 后, 80 ℃烘至恒量, 用不锈钢粉碎机粉碎, 过 100 目筛, 放阴凉干燥处保存, 待测。镉的测定用石墨炉原子吸收或火焰原子吸收法^[5], 精密称取干燥树叶粉末 0.5 g(精确到 0.000 1 g)于 100 mL 三角瓶中, 加混酸 $[\varphi(\text{HNO}_3) : \varphi(\text{HClO}_4) = 4 : 1]$ 15 mL, 电炉上加热至冒白烟, 用无离子水定容至 100 mL 容量瓶, 然后用原子吸收法测定镉质量分数。镉积累量=镉质量分数×生物量。②生理指标测定。叶绿素质量分数测定用丙酮提取法, 可溶性蛋白用考马斯亮蓝法^[6], 叶片电导率、丙二醛和脯氨酸的测定依据沈允钢等^[7]方法。

1.2.3 耐镉性强弱的综合比较方法 先对每一个性状的不同无性系进行排序, 如果某性状与耐性成正比, 则此性状的耐性指数(耐性指数 = 胁迫处理测定值/对照测定值)越大, 则该无性系耐性越强; 如果某性状与耐性成反比, 则耐性指数越大, 则该无性系耐性越弱。最后对每个无性系在各个性状中的排序进行平均, 即得到各无性系的综合耐性强弱排序。

2 结果与分析

2.1 旱柳无性系耐镉性变异

2.1.1 镉胁迫下旱柳耐镉性性状方差分析 镉胁迫下旱柳镉积累能力、生物量及叶绿素无性系及质量分数间差异较大(表 1), 其中植株地上部镉质量分数和根系生物量无性系间变异幅度最大, 达到极显著水平, 镉胁迫浓度及浓度与无性系间的互作效应对耐性性状的影响较大, 除叶绿素外, 其他性状差异均达到极显著水平。遗传力是遗传方差在总方差的比例。遗传力表明某一性状受到遗传控制的程度。它介于 0 与 1 之间, 当等于 1 时表明表型变异完全是由遗传的因素决定的, 当等于 0 时表型变异由环境所造成。本实验中, 镉胁迫下, 旱柳耐镉性性状的遗传力较高, 除根系中镉质量分数外, 其他性状的遗传力均达到 0.6 以上, 表明这几个性状受镉胁迫影响因素较小, 在此条件下植株对镉的耐性具有可重复性。

2.1.2 镉胁迫下旱柳耐镉性指标间的关系 镉胁迫质量浓度越高, 旱柳植株镉积累量越高, 生物量及叶绿素质

量分数下降, 镉胁迫质量浓度的变化首先引起根系中镉积累量的改变, 然后由根系转移到地上部, 表现为镉胁迫质量浓度与根系镉积累量的相关性大于地上部镉积累量。地下部镉积累量与地上部镉积累量正相关关系达到极显著水平, 说明地上部镉积累量随着地下部镉积累量的增多而增多, 即在一定范围内, 地下部镉不断向地上部运输。植株镉净积累量与生物量的相关性不显著, 而植株镉相对质量分数与生物量负相关关系极显著, 表明在非致死浓度范围内, 镉胁迫质量浓度越高, 植株生物量越低, 体内镉相对质量分数就越高(表 2)。

2.1.3 镉胁迫下旱柳无性系耐镉性强弱比较 镉胁迫下, 无性系间差异较大(表 1), 对植物修复重金属污染土壤来说, 植株对镉的吸收积累能力及其生物量是首要考虑的因素, 选出积累能力高, 生物量大且胁迫下变化小的植株对植物修复具有重要意义。耐性指数反映了植株在逆境胁迫下的耐性强弱。本研究利用植株镉相对质量分数、植株生物量、镉积累量及叶绿素这几个指标对镉胁迫下旱柳 10 个无性系进行了耐性分析(表 3), 先对不同无性系每一个性状的耐性指数进行排序, 然后再对各个性状

表 1 镉胁迫下旱柳耐镉性性状方差分析

Table 1 Analysis of variance of character of cadmium tolerance of *Salix matsudana*

性状	项目	变异来源			
		无性系	质量浓度	无性系×质量浓度	误差
地上部镉质量分数	方差	9 500.95	47 242.45	800.959	14.43
	F 值	11.86**	58.98**	55.49**	
	h^2	0.915 6			
根系镉质量分数	方差	727 671.2	10 510 6110.1	344 428.6	6.90
	F 值	2.11	305.16**	49 579.9**	
	h^2	0.526 1			
地上部生物量	方差	82.50	475.54	30.61	0.15
	F 值	2.69	15.53**	197.92**	
	h^2	0.628 2			
根系生物量	方差	13.49	11.72	2.38	0.17
	F 值	5.65**	4.91	13.56**	
	h^2	0.823 0			
地上部镉积累量	方差	11.46	77.56	2.95	0.01
	F 值	3.88*	26.27**	198.79**	
	h^2	0.742 2			
根系镉积累量	方差	302.52	11 558.26	111.81	4.12
	F 值	2.71	103.37**	27.07**	
	h^2	0.630 9			
叶绿素质量分数	方差	1.123	0.85	0.32	0.28
	F 值	3.51*	2.66	1.12	
	h^2	0.715 1			

说明: 无性系自由度为 9, 质量分数自由度为 1, 无性系 × 质量分数自由度为 9; ** 表示 0.01 水平, * 表示 0.05 水平。

表 2 旱柳耐镉性指标间与质量浓度间的相关分析

Table 2 Relativity among Cd tolerance indicators and Cd concentration in *Salix matsudana*

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
x_1	1.000 0							
x_2	0.544 8**	1.000 0						
x_3	0.987 1**	0.532 8**	1.000 0					
x_4	- 0.759 4**	- 0.322 0	- 0.757 4**	1.000 0				
x_5	- 0.506 5**	- 0.249 5	- 0.525 4**	0.780 4**	1.000 0			
x_6	0.285 6	0.891 6**	0.267 1	0.080 0	0.039 9	1.000 0		
x_7	0.964 5**	0.586 4**	0.968 8**	- 0.658 6**	- 0.340 1	0.367 2	1.000 0	
x_8	- 0.584 6**	- 0.511 4**	- 0.596 3**	0.514 5**	0.212 0	- 0.271 3	- 0.603 1**	1.000 0

说明： x_1 为镉胁迫质量浓度， x_2 为旱柳地上部镉质量分数， x_3 为地下部镉质量分数， x_4 为地上部生物量， x_5 为地下部生物量， x_6 为地上部镉积累量， x_7 为地下部镉积累量， x_8 为叶绿素质量分数；** 表示 0.01 水平。

进行综合排序，最后得出水培条件下，镉胁迫质量浓度在 30 ~ 60 mg·L⁻¹ 范围内，旱柳 10 个无性系耐镉性强弱顺序为 13 号>8 号>16 号≈18 号≈9 号>2 号≈4 号>10 号>3 号>5 号。

表 3 镉胁迫下旱柳无性系耐镉性差异

Table 3 Diversity of Cd tolerance among clones of *Salix matsudana* under cadmium stress

项目	无性系耐性指数与排序									
	2 号	3 号	4 号	5 号	8 号	9 号	10 号	13 号	16 号	18 号
地上部镉质量分数	185.48	162.09	91.92	109.39	220.17	187.80	177.61	235.36	232.59	206.37
	6	8	10	9	3	5	7	1	2	4
地下部镉质量分数	4 669.42	3 848.39	4 753.11	4 276.92	4 663.43	4 863.92	5 182.20	5 050.22	4 399.56	4 060.01
	5	10	4	8	6	3	1	2	7	9
地上部生物量	0.59	0.66	0.57	0.54	0.71	0.65	0.57	1.05	0.66	0.81
	6	4	7	8	3	5	7	1	4	2
地下部生物量	0.71	0.84	0.77	0.74	0.89	0.89	0.78	1.09	0.82	1.07
	9	4	7	8	3	3	6	1	5	2
地上部镉积累量	3.40	3.31	2.10	1.95	4.96	2.77	3.02	7.48	4.60	5.25
	5	6	9	10	3	8	7	1	4	2
地下部镉积累量	49.31	41.46	59.60	43.39	58.80	51.04	48.74	68.01	50.70	62.83
	7	10	3	9	4	5	8	1	6	2
叶绿素	0.84	0.79	0.92	0.85	1.07	0.67	0.54	0.74	0.66	0.81
	4	6	2	3	1	8	10	7	9	5
综合排序	4	6	4	7	2	3	5	1	3	3

说明：各项目上行数字为耐性指数，下行为排序。

2.2 镉胁迫下旱柳叶片生理特性的变化

镉胁迫影响了旱柳叶片各生理特性的变化(表 4)。与对照相比，镉胁迫下旱柳大部分无性系叶片

质膜透性减少, 变化幅度相差较大, 镉质量浓度为 $30 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 10 号无性系电导率减小得最多, 为 48.48%, 4 号无性系减小得最少, 为 3.06%; 在镉质量浓度为 $60 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 18 号无性系电导率减少得最多, 为 40.13%, 13 号无性系减小得最少, 为 14.55%。

表 4 镉胁迫下旱柳生理特性的变化

Table 4 Changes of cadmium on physiological indicators of *Salix matsudana*

无性系	镉质量浓度/ $(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$	电导率		丙二醛		叶绿素总量		脯氨酸		可溶性蛋白	
		测定值/%	增加率/%	测定值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	增加率/%	测定值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	增加率/%	测定值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	增加率/%	测定值/ $(\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1})$	增加率/%
2	对照	38.5		0.28		3.6		33.5		18.4	
	30	33.9	- 13.5	0.35	22.1	2.8	- 26.6	21.2	- 58.1	17.3	- 6.1
	60	31.4	- 22.6	0.59	53.4	3.2	- 14.6	18.5	- 80.9	18.3	4.9
3	对照	40.7		0.27		4.3		26.0		18.3	
	30	35.8	- 13.6	0.36	26.1	3.3	- 31.3	8.9	- 190.7	18.4	1.0
	60	48.7	16.4	0.35	23.5	3.5	- 23.3	8.2	- 218.7	17.8	- 3.6
4	对照	43.8		0.36		3.5		6.2		18.8	
	30	42.5	- 3.0	0.47	22.9	3.6	2.7	6.4	2.5	18.4	- 2.1
	60	33.4	- 31.1	0.53	31.3	2.8	- 23.6	9.1	31.9	17.5	- 5.3
5	对照	58.9		0.73		3.9		6.3		19.1	
	30	44.0	- 33.8	0.53	- 37.7	3.5	- 13.2	11.7	46.4	18.1	- 5.2
	60	48.1	- 22.4	0.60	- 21.7	3.2	- 22.5	8.3	23.8	16.6	- 9.0
8	对照	58.9		0.22		2.3		10.6		18.4	
	30	46.2	- 27.4	0.38	43.1	2.5	7.5	10.3	- 3.1	18.2	- 0.9
	60	44.3	- 32.9	0.49	55.7	2.5	5.3	7.0	- 51.8	18.4	1.2
9	对照	46.9		0.22		3.2		6.3		18.6	
	30	43.1	- 8.8	0.31	28.2	2.0	- 56.5	8.8	28.6	18.4	-1.2
	60	39.1	- 19.9	0.32	30.0	2.2	- 44.7	8.0	21.6	18.4	- 0.3
10	对照	58.8		0.27		4.1		10.5		18.6	
	30	39.6	- 48.4	0.45	40.9	2.6	- 60.5	9.1	- 14.7	16.8	- 10.8
	60	48.7	- 20.7	0.44	38.9	1.8	- 120.3	11.7	10.7	17.8	6.0
13	对照	37.8		0.44		4.3		8.0		18.5	
	30	26.3	- 43.7	0.46	4.5	3.8	- 10.1	8.6	6.4	15.8	- 17.1
	60	33.0	- 14.5	0.46	4.3	2.4	- 76.9	7.6	- 6.2	16.1	1.9
16	对照	54.3		0.26		3.8		4.7		18.2	
	30	54.4	0.2	0.53	50.5	2.7	- 38.6	6.1	23.1	16.8	- 8.4
	60	58.4	7.0	0.55	52.6	2.2	- 69.7	9.7	51.7	16.1	- 4.6
18	对照	63.9		0.47		2.5		8.4		18.4	
	30	48.3	- 32.3	0.56	15.8	2.0	- 25.9	7.2	- 16.3	16.0	- 14.7
	60	45.6	- 40.1	0.53	10.7	2.1	- 19.6	7.0	- 20.3	15.2	- 5.3

镉胁迫下, 对大部分无性系来说, 旱柳叶片丙二醛(MDA)质量分数增加。镉胁迫质量浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 8 号无性系增加量最多, 增加了 55.69%, 18 号无性系增加量最少, 增加了 10.78%。

镉胁迫影响了旱柳叶片叶绿素的合成, 大部分无性系叶绿素质量分数下降, 无性系间差异较大, 镉质量浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 10 号无性系减少最多, 为 120.32%, 2 号无性系减少的最少, 为 14.59%。

镉胁迫下旱柳各无性系叶片脯氨酸的变化无一致规律。镉胁迫降低了大部分旱柳无性系叶片可溶性蛋白的合成, 无性系间差异较大, 胁迫质量浓度为 $60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 5 号无性系减少得最多, 为 9.03%, 9 号无性系减少得最少, 为 0.33%。

3 讨论与结论

3.1 旱柳无性系耐镉性的差异

镉胁迫影响了植物正常的生长, 本实验中溶液培养镉胁迫下旱柳生长及镉积累量无性系间差异达到极显著水平。用来修复重金属污染土壤的植物, 其生物量及镉吸收积累量大小是非常重要的, 选择生物量大, 积累量高的植物是主要的任务。植物对重金属的耐性受多种因素的影响, 而耐性的可遗传性是大家所关注的。本研究结果表明, 在水培条件下, 镉胁迫质量浓度为 $30 \sim 60 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 旱柳地上部分和地下部分镉质量分数、镉积累量、植株生物量及叶绿素的遗传力估算值较高, 表现出较好的可遗传性。

某一性状的耐性指数是表征某一性状对逆境胁迫的适应能力, 当某一性状与耐性呈正相关关系时, 耐性指数越高, 其耐性就越强; 当某性状与耐性呈负相关关系时, 耐性指数越高, 其耐性就越弱。本实验利用地上和地下镉相对质量分数、植株生物量、地上和地下镉积累量、叶片叶绿素总量 7 个性状的综合耐性指数, 对镉胁迫下 10 个旱柳无性系进行了耐镉性差异分析, 分析结果表明 10 个旱柳无性系耐镉性的顺序为 13 号 > 8 号 > 16 号 $\approx$ 18 号 $\approx$ 9 号 > 2 号 $\approx$ 4 号 > 10 号 > 3 号 > 5 号。

3.2 镉胁迫下旱柳生理特性变化

环境受镉污染后, 影响植物的正常生长发育, 一些生理生化活性也发生改变。镉在植物体内积累到一定程度, 就会产生毒害症状, 表现出生长受到抑制、植株矮小、失绿、生物量下降等症状。薛建永等^[8]采用土壤盆栽的方法, 对能源柳无性系扦插幼苗的耐镉性进行了研究, 分析结果表明低质量分数处理($\leq 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)促进苗木生长, 随着土壤中镉质量分数的增加, 生长量下降。这与董林林等^[9]对野胡萝卜 *Daucus carota* 和野生高粱 *Sorghum bicolor* 的研究结果一致。本研究结果显示, 镉胁迫抑制了旱柳植株的生长, 降低了叶片叶绿素的合成速度, 叶绿素质量分数下降。根据叶绿体分离提取法^[10]推断, 进入叶绿体的镉等重金属元素主要是以蛋白质结合态存在, 它们可与蛋白质的-SH 基(或其他侧链)结合, 或取代其中的 Fe^{2+} 和 Zn^{2+} 等, 直接破坏叶绿体的结构, 或使叶绿体酶活性发生变化, 进而影响叶绿体的合成。本试验的结果与陶毅明等^[11]和张小兰等^[12]的结果一致。

一些研究表明^[13-15], 植物在重金属胁迫下, 叶片膜脂质过氧化作用加剧, 膜透性增加, 丙二醛质量分数增高, 因此把膜透性和丙二醛质量分数变化作为膜脂质过氧化作用的指标。本研究发现, 水培条件镉胁迫下, 旱柳大部分无性系叶片电导率下降, 丙二醛质量分数增加, 此结果表明细胞膜透性的大小不是引起丙二醛质量分数变化的唯一原因, 这可能与膜上的自由基清除系统以及柳树的重金属胁迫下的适应性有关, 其原理有待于进一步研究。

在逆境胁迫条件下, 渗透调节是植物提高自身耐性的一个重要途径, 植物体内的渗透调节物质主要是一些有机物如脯氨酸和可溶性蛋白等, 这些渗透调节物质质量分数的增加在一定程度上也反映了植物的耐性强弱。在逆境条件下, 许多植物体内大量积累脯氨酸, 植物脯氨酸质量分数的增加是植物对逆境胁迫的一种生理生化反应, 可能具有双重意义: 其一是细胞结构和功能遭受伤害的反应, 这一点已经被许多研究所证实; 其二是植物在逆境下的适应表现, 即为防护反应, 可作为鉴定植物相对抗性的指标。这时脯氨酸具有多种生理功能, 如作为细胞质渗透调节物质, 稳定生物大分子结构, 降低细胞酸度以及作为能量库调节细胞氧化还原势等。镉胁迫下植物通过提高体内可溶性蛋白质、脯氨酸

质量分数来提高植物对镉胁迫的适应,体内可溶性蛋白质和脯氨酸质量分数的提高,可以增加细胞渗透势和功能蛋白的数量,有助于维持细胞正常代谢,提高植物抗逆性。也有研究表明,低质量浓度的镉($\leq 20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)胁迫,使小麦 *Triticum aestivum* 幼苗的脯氨酸质量分数增加较小,高质量浓度的镉(50或 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),则使脯氨酸质量分数增加^[16]。本试验中,水培条件镉胁迫下旱柳各无性系脯氨酸变化不一致,既有增加也有下降。洪仁远等^[17]和李元等^[18]报道镉能诱导植物可溶性蛋白质量分数增加是植物抵抗镉毒害的一种解毒机制。植物体内可溶性蛋白质的质量分数与其抗逆性的形成有关,可溶性蛋白有着很高的持水性,对作物起着有效的保护作用。但是在污染条件下,植物体内的可溶性蛋白质的合成受阻。另外,植物体内某些蛋白的活性的降低是污染物的胁迫作用超过了生物体的适应能力,是生物体产生中毒反应的前兆^[19]。本研究中发现,镉胁迫下,旱柳叶片可溶性蛋白质量分数下降,与张小兰等^[12]和陈国祥等^[20]的研究结果一致。

参考文献:

- [1] 郭笃发. 环境中铅和镉的来源及其对人和动物的危害[J]. 环境工程学报, 1994, 2 (3): 71 - 76.
GUO Dufa. Environmental sources of Pb and Cd and their toxicity to man and animals [J]. *Chin J Environ Eng*, 1994, 2 (3): 71 - 76.
- [2] 鲁如坤, 熊礼明, 时正元. 关于土壤—作物生态系统中镉的研究[J]. 土壤, 1992, 24 (3): 129 - 132, 137 - 141.
LU Rukun, XIONG Liming, SHI Zhengyuan. Study on Cd in ecosystem of soil-crop[J]. *Soils*, 1992, 24 (3): 129 - 132, 137 - 141.
- [3] 杨居荣, 贺建群, 黄翌, 等. 农作物耐镉性的种内和种间差异(I)种间差异[J]. 应用生态学报, 1994, 5 (2): 192 - 196.
YANG Jurong, HE Jianqun, HUANG Yi, et al. Inter-and intraspecific difference of crops in cadmium tolerance I, interspecific difference [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1994, 5 (2): 192 - 196.
- [4] 张太平, 段昌群, 胡斌, 等. 玉米在重金属污染条件下的生态分化与品种退化[J]. 应用生态学报, 1999, 10 (6): 743 - 747.
ZHANG Taiping, DUAN Changqun, HU Bin, et al. Ecological differentiation and variety degeneration of maize under heavy metal contamination [J]. *Chin J Appl Ecol*, 1999, 10 (6): 743 - 747.
- [5] 王喜全, 鞠兴华. 原子吸收光度法测定树叶中的重金属[J]. 环境监测管理与技术, 1998, 10 (3): 28 - 29.
WANG Xiquan, JU Xinghua. Determination of heavy metals in leaves by atomic absorption spectrophotometer [J]. *Adm Tech Environ Monit*, 1998, 10 (3): 28 - 29.
- [6] 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: 184 - 185.
- [7] 沈允钢. 现代植物生理学试验指南[M]. 北京: 科学出版社出版, 1999.
- [8] 薛建永, 张文辉, 刘新成. 不同能源柳无性系土壤镉污染的抗性研究[J]. 植物研究, 2008, 28 (4): 491 - 496.
XUE Jianyong, ZHANG Wenhui, LIU Xincheng. The tolerance of different energy willow's clones to soil Cd contamination [J]. *Bull Bot Res*, 2008, 28 (4): 491 - 496.
- [9] 董林林, 赵先贵, 巢世军, 等. 镉污染土壤的植物吸收与修复研究[J]. 农业系统科学与综合研究, 2008, 24 (3): 292 - 295.
DONG Linlin, ZHAO Xiangui, HAO Shijun, et al. Study of plants absorbing and phytoremediation of Cd polluted soil. [J]. *Sys Sci Compr Stud Agric*, 2008, 24 (3): 292 - 295.
- [10] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 1990: 78 - 83.
- [11] 陶毅明, 陈燕珍, 梁士楚. 镉胁迫下红树植物木榄幼苗的生理生化特性[J]. 生态学杂志, 2008, 27 (5): 762 - 766.
TAO Yiming, CHEN Yanzhen, LIANG Shichu. Physiological and biochemical properties of *Bruguiera gymnorrhiza* seedlings under Cd stress [J]. *China J Ecol*, 2008, 27 (5): 762 - 766.
- [12] 张小兰, 施国新, 徐楠, 等. Hg, Cd对轮藻部分生理生化指标的影响[J]. 南京师大学报: 自然科学版, 2002, 25 (1): 38 - 43.
ZHANG Xiaolan, SHI Guoxin, XU Nan, et al. Effects of mercury and cadmium on some of physiological indicators of *Chara* [J]. *J Nanjing Nor Univ Nat Sci Ed*, 2002, 25 (1): 38 - 43.
- [13] 胡金朝, 施国新, 王学, 等. Cd对槐叶苹的生理影响及外源La, Ca的缓解效应比较[J]. 广西植物, 2005, 25

(2): 156 – 160.

HU Jinzhao, SHI Guoxin, WANG Xue, *et al.* Physiological effect of cadmium on *Salvinia natans* and comparison of the detoxication of exogenous lanthanum and calcium against it [J]. *Guihaia*, 2005, **25** (2): 156 – 160.

- [14] 刘鹏, YANG Y S, 徐根娣, 等. 南方 4 种草本植物对铝胁迫生理响应的研究 [J]. 植物生态学报, 2005, **29** (4): 644 – 651.

LIU Peng, YANG Y S, XU Gendi, *et al.* Physiological response of four southern herbaceous plants to aluminum stress [J]. *Acta Phytocol Sin*, 2005, **29** (4): 644 – 651.

- [15] 刘云国, 汤春芳, 曾光明, 等. 镉诱导萝卜幼苗活性氧产生、脂质过氧化和抗氧化酶活性的变化[J]. 广西植物, 2005, **25** (2): 164 – 168.

LIU Yunguo, TANG Chunfang, ZENG Guangming, *et al.* Cadmium-induced superoxide anion generation, lipid peroxidation and changes of antioxidant enzyme activities in radish seedlings [J]. *Guihaia*, 2005, **25** (2): 164 – 168.

- [16] WEIGEL H J, JAGER H J. Subcellular distribution and chemical form of cadmium in bean plant [J]. *Plant Physiol*, 1980, **65**: 480 – 482.

- [17] 洪仁远, 杨广笑, 刘东华, 等. Cd 对小麦幼苗的生长和生理生化反应的影响[J]. 华北农学报, 1991, **6** (3): 70 – 75.

HONG Renyuan, YANG Guangxiao, LIU Donghua, *et al.* Effects of cadmium on the growth and physiological and biochemical reactions of wheat seedlings [J]. *Acta Agric Boreali-Sin*, 1991, **6** (3): 70 – 75.

- [18] 李元, 王焕校, 吴玉树. Cd, Fe 及其复合污染对烟草叶片几项生理指标的影响[J]. 生态学报, 1992, **12** (2): 147 – 154.

LI Yuan, WANG Huanxiao, WU Yushu. Effects of cadmium and iron on the some physiological indicators in leaves of tobacco [J]. *Acta Ecol Sin*, 1992, **12** (2): 147 – 154.

- [19] 刘宛, 李培军, 周启星, 等. 短期菲胁迫对大豆幼苗超氧化物歧化酶活性及丙二醛含量的影响[J]. 应用生态学报, 2003, **14** (4): 581 – 584.

LIU Wan, LI Peijun, ZHOU Qixing, *et al.* Effect of short-term phenanthrene stress on SOD activities and MDA contents in soybean (*Glycine max*) seedlings [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2003, **14** (4): 581 – 584.

- [20] 陈国祥, 施国新. Hg, Cd 对蔬菜越冬芽光合膜光合作用活性及多肽组分的影响[J]. 环境科学学报, 1999, **19** (5): 521 – 525.

CHEN Guoxiang, SHI Guoxin. Effect of mercury and cadmium on photochemical activity and polypeptide compositions of photosynthetic membranes from winter bud of *Brasenia schreberi*[J]. *Acta Sci Circumstant*, 1999, **19** (5): 521 – 525.