

镉对龙葵幼苗生长和生理指标的影响

郭 智,王 涛,奥岩松

(上海交通大学农业与生物学院植物科学系,上海 200240)

摘 要 采用营养液培养法研究了镉胁迫条件下龙葵幼苗生长、生理响应及镉积累特性。结果表明,镉胁迫下,龙葵幼苗生长受到一定程度的抑制,并且具有浓度效应和时间效应。镉胁迫还导致龙葵叶片色素含量下降。叶绿素 a、b 和类胡萝卜素平均含量在高浓度镉($150 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理条件下分别较对照降低 55.5%、63.9%和 43.3%。低浓度镉($25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)处理 15 d 内显著促进龙葵幼苗根系活力,平均根系活力较对照上升 10.4%,而高浓度镉处理下,根系活力呈现先升后降的趋势,镉处理 10 d 之后达到峰值;随着镉浓度的升高和胁迫时间的延长,龙葵幼苗叶片相对电导率、丙二醛(MDA)含量和渗透调节物质均呈现显著上升趋势。相对于对照植株,低浓度镉处理下龙葵叶片平均相对电导率、MDA 含量、可溶性糖和脯氨酸含量上升 17.7%、117.7%、5.6%和 95.3%,而高浓度镉处理下上升幅度更大,分别为 39.0%、194.6%、56.3%和 758.0%。从积累部位来看,镉主要积累在龙葵幼苗地上部,镉含量由高到低依次为叶片>茎>根系,高浓度镉胁迫 20 d 之后根茎叶镉含量为 5 d 时的 1.73、1.49 和 1.40 倍,分别为 $1\ 287.25$ 、 $1\ 718.14$ 和 $2\ 385.27 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ 。

关键词 龙葵(*Solanum nigrum* L.) 镉;富集;脯氨酸;可溶性糖

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)04-0755-06

Physiological Responses of *Solanum nigrum* L. Seedlings to Cadmium Stress

GUO Zhi, WANG Tao, AO Yan-song

(School of Agriculture and Biology, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract Physiological responses and cadmium (Cd) accumulation in *Solanum nigrum* L. seedlings under Cd stress were investigated by nutrient solution culture method. The results showed that Cd could affect the growth of *Solanum nigrum* L. seedlings, and had concentration-dependent and time-dependent effects. Cd stress also led to the decrease of leaf pigments contents. Average contents of Chlorophyll a (Chla), Chlorophyll b (Chlb) and carotenoid (Car) decreased 55.5%, 63.9% and 43.3% when *Solanum nigrum* L. seedlings subjected to high concentration of Cd ($150 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$). Furthermore, low Cd ($25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$) improved root activities of *Solanum nigrum* L. seedlings significantly, and increased 10.4% compared to the control plants; Under high concentration of Cd, root activities of *Solanum nigrum* L. seedlings increased firstly and decreased, the submit was found after 10 d of Cd treatment. The relative electic conductivities, malondialdehyde (MDA) contents, soluble sugar contents and proline contents increased with increasing Cd concentration in the solution and along with treatment time; Compared to the control plants, they increased 17.7%, 117.7%, 5.6% and 95.3% under low Cd stress, and increased 39.0%, 194.6%, 56.3% and 758.0% under high Cd stress. Cd mainly accumulated in the shoot of *Solanum nigrum* L. seedlings, and Cd concentration in the plant tissues could be drawn as followed leaf>stem>root, the maximum were detected after 20 d of high Cd stress, $1\ 287.25$, $1\ 718.14$ and $2\ 385.27 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}\text{DW}$ of Cd concentrations in the root, stem and leaf, respectively.

Keywords *Solanum nigrum* L.; cadmium; accumulation; proline; soluble sugar

镉作为一种毒性较强范围较广的重金属污染物,由于长期施用磷肥、金属电镀和塑料工业发展等原因而在农田长时间残留^[1],对人类健康造成潜在的危害^[2]。

针对目前日益严重的镉污染,植物修复是一种绿色廉价、被人们所广泛认可的有效的治理措施,其核心技术在于利用极少数镉超富集植物来去除土壤或水体中的镉以达到修复和治理环境的目的。龙葵(*Solanum nigrum* L.)是新发现的镉超富集植物^[3],对植物修复镉污染土壤实践提供了良好的试材。对于龙葵的镉富集特性、解毒机理以及部分生理代谢机制已有部分报道。魏树和等^[4]认为镉主要富集在龙葵叶片,并

收稿日期:2008-07-10

基金项目:上海市科学技术委员会科技攻关计划(07DZ19604)

作者简介:郭 智(1981—),男,博士研究生,主要从事植物逆境生理生态研究。E-mail:Guozhi703@yahoo.cn

通讯作者:奥岩松 E-mail:Aoys@sju.edu.cn

且在 Cd^{2+} 投加浓度为 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,龙葵茎和叶中 Cd 含量分别为 103.8 和 $124.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。孙瑞莲等^[5]报道龙葵叶片中总镉和水溶性镉含量与其叶片中乙酸和柠檬酸含量呈显著正相关关系。Wang 等^[6]认为土壤镉浓度低于 $12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下龙葵叶片氮代谢水平保持正常状态。然而,对于新型镉超富集植物龙葵而言,其镉吸收、转运以及富集机制和生理响应机制仍尚未完全明确。本试验通过营养液培养法研究了镉胁迫下龙葵幼苗生长、生理特性及其镉吸收积累特性,探讨镉胁迫下超富集植物龙葵的生理响应机制,为今后应用该植物进行重金属污染环境修复提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

龙葵(*Solanum nigrum* L.)种子由北京市医学科学院药用植物研究所提供。

1.2 幼苗培养

挑选饱满的龙葵种子经 0.5% NaClO 消毒 20 min 之后播种于经消毒的沙盘, 15 d 之后选择健壮、生长一致的龙葵幼苗置于盛有 4 L $1/2$ Hoagland 营养液的塑料周转箱(容积为 5 L , $16 \sim 18$ 株·箱⁻¹)中进行预培养 15 d , 营养液中 Fe 盐用 Fe-EDTA 代替, 溶液 pH 6.5 , 营养液连续通气, 每 3 d 更换 1 次。试验于上海交通大学农业与生物学院试验农场温室(RICHEL, 法国)内进行, 温度 $25/18 \text{ }^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $(70 \pm 5)\%$, 自然光照。

1.3 试验设计

龙葵幼苗经预培养之后进行镉处理。镉以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ 的形式加入, 分别设 $0(\text{CK})$ 、 $25(\text{T1})$ 、 $150 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}(\text{T2})$ 3 个处理浓度, 营养液组成与预培养期间相同, 每处理重复 3 次, 每重复 $16 \sim 18$ 株, 处理期间隔 2 d 更换营养液以避免镉的损耗, 分别于处理后 0 、 5 、 10 、 15 、 20 d 取样进行测定。

1.4 测定指标及测定方法

1.4.1 根长测定

常规方法测量植株根系长度(以最长根长计)。

1.4.2 根、茎、叶干物质质量测定

将幼苗从营养液中取出, 根系先用蒸馏水冲洗, 再在 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 乙二胺四乙酸二钠($\text{EDTA}-\text{Na}_2$)溶液中交换 15 min , 以去除根系表面粘附的金属离子, 再用去离子水冲洗干净, 吸水纸吸干表面水分, 将叶片和根系分开, $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min , 然后在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 下烘干至恒重, 测定根、茎、叶干物质质量。

1.4.3 各项生理指标测定

取成熟叶及剪取尚未木质化的侧根及细根进行各项生理指标检测。叶绿素采用丙酮乙醇混合液提取法测定^[7], 根系活力采用氯化三苯基四氮唑(TTC)法^[8]; 细胞膜透性(相对电导率)用 DDS-11A 型电导率仪测定^[9]; 用蒽酮比色法测定可溶性糖^[10], 硫代巴比妥(TBA)酸法测定丙二醛(MDA)含量^[8], 茚三酮比色法测定游离脯氨酸含量^[8]。

1.4.4 镉含量测定

准确称取龙葵根、茎、叶样品 0.5 g , 采用 $\text{HNO}_3-\text{HClO}_4$ 湿灰化-原子吸收法测定 Cd 含量(AA-6800 原子吸收分光光度仪, 日本岛津公司)。

1.5 数据处理

用 SPSS 11.5 for Windows 统计软件进行单因素方差分析, 用 Sigma Plot 9.0 作图。文中所有数据均为 3 次重复平均值。

2 结果与分析

2.1 镉对龙葵幼苗生长的影响

镉胁迫下, 龙葵幼苗生长受到一定程度的抑制, 并且具有浓度效应和时间效应(表 1)。低浓度镉处理下, 龙葵株高随时间延长逐渐升高, 而高浓度下呈现先增后降的趋势, 相对于对照植株而言, 高、低浓度镉处理下龙葵平均株高分别降低 47.1% 和 31.6% 。根系长度对镉胁迫的反应与株高有所不同, 不论高浓度还是低浓度镉处理均显著抑制龙葵幼苗根系伸长, 但是随着镉处理时间的延长, 低浓度下呈现先升后降的趋势, 而高浓度下则呈现“降-升-降”的变化规律, 高、低浓度镉处理下龙葵平均根系长度较对照分别降低 52.6% 和 41.9% 。从干物质积累来看(表 1), 镉胁迫抑制了龙葵幼苗生长。低浓度镉处理下, 龙葵根、茎、叶干物质质量与对照植株呈现相同的变化规律, 而高浓度下均呈现缓慢的先升后降趋势, 高、低浓度镉处理下, 龙葵根、茎、叶平均干物质质量较对照植株分别降低 55.0% 、 70.4% 、 65.1% 和 24.7% 、 23.0% 、 38.3% 。

2.2 镉对龙葵幼苗叶片叶绿素含量的影响

叶绿素是植物进行光合作用的物质基础, 各种环境胁迫均可导致叶绿素的破坏与降解。同时, 叶绿素含量减少是衡量叶片衰老的重要生理指标^[11]。由表 2 可见, 镉胁迫导致龙葵叶片色素含量下降。低浓度镉处理条件下, 叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量均随时间的延长而上升, 但仍然低于对照植株, 整个处理期间其平均含量较对照组分别下降 24.9% 、 35.7% 和

表 1 镉对龙葵幼苗生长的影响

Table 1 Effect of Cd²⁺ on the growth of *Solanum nigrum* L. seedlings

镉浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	处理时间/d	株高/cm	最长根长/cm	干物质量/mg			冠根比
				根系	茎	叶片	
0	0	11.87±0.43g	12.37±0.66cd	4.83±0.20e	17.43±0.54h	53.37±1.16g	14.65a
	5	16.73±0.54def	27.30±1.42b	22.67±1.20d	40.67±0.88fg	102.33±4.91e	6.31bcd
	10	25.27±1.22b	28.23±0.95b	36.00±1.16b	75.67±2.40e	171.33±7.62c	6.86bcd
	15	34.47±0.70a	32.40±1.03ab	58.53±1.63b	161.57±5.12c	271.27±4.23b	7.39b
	20	37.47±1.11a	33.77±0.79a	113.80±6.21a	301.87±9.05a	486.20±7.57a	6.93bcd
25	0	11.87±0.43g	12.37±0.66cd	4.83±0.20e	17.43±0.54h	53.37±1.16g	14.65a
	5	12.93±0.59efg	15.00±1.08cd	16.67±0.58d	41.00±1.16fg	88.00±2.65ef	7.74bc
	10	17.30±1.07de	16.07±0.36cd	43.33±0.88b	71.00±1.16e	146.67±4.81d	5.02efg
	15	20.67±0.73cd	17.23±0.63c	54.27±0.87b	122.80±4.77d	189.73±4.57c	5.76def
	20	23.30±1.01bc	17.20±0.59c	58.53±1.07b	207.37±2.32b	191.53±3.62c	6.81bcd
150	0	11.87±0.43g	12.37±0.66cd	4.83±0.20e	17.43±0.54h	53.37±1.16g	14.65a
	5	13.53±1.10efg	11.47±0.60d	20.00±0.21d	31.33±0.33gh	77.33±2.96f	5.43bcd
	10	14.00±0.12efg	12.60±0.84cd	22.00±0.58d	43.00±0.58fg	86.33±1.45ef	5.88cde
	15	14.17±1.03efg	15.00±0.77cd	35.83±1.06b	52.40±1.88f	87.90±1.48ef	3.92g
	20	13.03±0.39fg	12.09±0.71cd	23.43±0.13d	32.43±1.07gh	74.00±2.23fg	4.54fg

注 表中数据为平均值±标准误差,不同小写字母表示 0.05 水平显著差异性($P<0.05$),下同。

表 2 镉胁迫对龙葵幼苗叶片色素含量的影响

Table 2 Effect of Cd²⁺ on photosynthetic pigments in the leaves of

Solanum nigrum L. seedlings

镉浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$	处理时间/d	叶绿素 a/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$	叶绿素 b/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$	类胡萝卜素/ $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}$	叶绿素 a/b
0	5	1.25±0.019b	0.53±0.022b	0.37±0.015abc	2.38b
	10	1.29±0.061b	0.56±0.016b	0.41±0.004ab	2.32b
	15	1.47±0.051a	0.63±0.018a	0.42±0.021ab	2.35b
	20	1.52±0.018a	0.66±0.017a	0.44±0.005a	2.34b
25	5	0.93±0.052cd	0.28±0.009de	0.29±0.014def	3.32a
	10	0.98±0.039cd	0.34±0.013cd	0.29±0.006def	2.89ab
	15	1.00±0.030c	0.38±0.012c	0.35±0.018bcd	2.87ab
	20	1.24±0.033b	0.53±0.007b	0.37±0.007abc	2.35b
150	5	0.81±0.015d	0.28±0.005de	0.30±0.007cde	2.88ab
	10	0.62±0.008e	0.23±0.010ef	0.22±0.030efg	2.68ab
	15	0.55±0.016e	0.18±0.006f	0.22±0.022fg	3.00ab
	20	0.48±0.004e	0.17±0.003f	0.19±0.002g	2.75ab

20.7%,而高浓度镉处理下均随时间延长而下降,整个处理期间分别较对照组降低 55.5%、63.9%和 43.3%。

2.3 镉对龙葵幼苗根系活力的影响

根系活力是反映植物根系吸收能力和合成代谢强弱的一个生理指标。由图 1 可以看出,低浓度镉处理 15 d 内显著促进龙葵幼苗根系活力,相对于对照植株而言,平均根系活力上升 10.36%,高浓度镉处理下,随着处理时间的延长,根系活力呈现先升后降

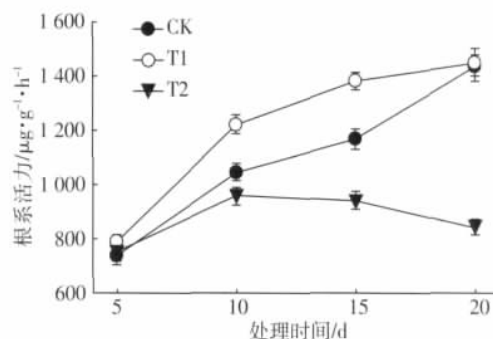


图 1 镉胁迫对龙葵幼苗根系活力的影响

Figure 1 Change of root activity in *Solanum nigrum* L. seedlings subjected to different Cd²⁺ concentrations

的趋势,镉处理 10 d 之后达到峰值,高浓度镉处理下,龙葵幼苗根系活力在整个处理期间较对照植株下降 20.4%。

2.4 镉对龙葵幼苗叶片膜透性的影响

质膜透性可以作为评价植物对污染物响应的指标之一,细胞外渗液的电导率与污染物浓度呈正相关^[2]。由图 2 可以看出,随着镉浓度的升高和胁迫时间的延长,龙葵幼苗叶片相对电导率和丙二醛(MDA)含量均呈现显著上升趋势。与镉处理 5 d 之后相比,低浓度镉和高浓度镉处理 20 d 之后叶片相对电导率分别上升 34.8%和 49.6%,MDA 含量分别上升 65.1%和 59.4%。相对于对照植株,低浓度镉处理下龙葵叶片平均相对电导率和平均 MDA 含量上升 17.7%和

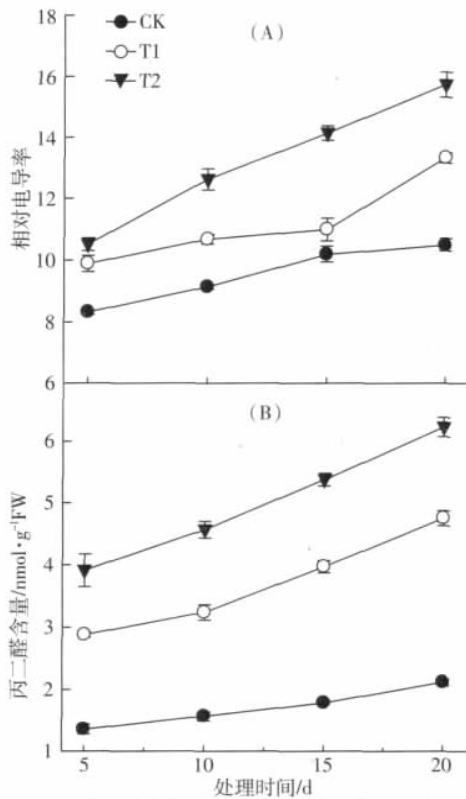


图2 镉对龙葵幼苗叶片质膜透性的影响

Figure 2 Effect of Cd^{2+} on relative electric conductivities(A) and the MDA contents(B) in the leaves of *Solanum nigrum* L.

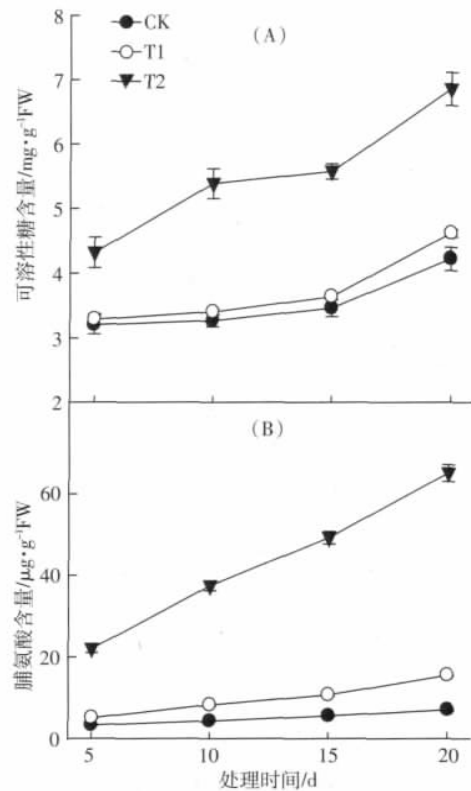


图3 镉胁迫对龙葵幼苗叶片渗透调节的影响

Figure 3 Changes of soluble sugar(A) and proline(B) contents in the leaves of *Solanum nigrum* L. subjected to different Cd^{2+} concentrations

117.7%，而高浓度镉处理下上升幅度更大，分别为39.0%和194.6%。

2.5 镉对龙葵幼苗叶片渗透调节的影响

脯氨酸和可溶性糖是植物重要的渗透调节物质。本试验中，镉胁迫显著影响龙葵叶片脯氨酸和可溶性糖含量。由图3可以看出，高、低浓度镉处理条件下，龙葵叶片可溶性糖和脯氨酸含量均随镉处理时间的延长逐渐升高。相对于镉处理5 d植株而言，镉处理20 d后低浓度镉处理龙葵叶片可溶性糖和脯氨酸含量上升40.3%和205.4%，高浓度下上升58.7%和195.6%。相对于对照植株而言，低浓度下，平均可溶性糖和平均脯氨酸含量上升了5.6%和95.3%，高浓度下上升幅度分别达56.3%和758.0%。

2.6 龙葵幼苗地上部和根系对镉的富集效应

从积累部位来看(图4A、B、C)，镉主要积累在龙葵幼苗地上部，镉含量由高到低依次为叶片>茎>根系。随着溶液中镉浓度的升高和胁迫时间的延长，龙葵根、茎和叶片中镉含量均逐渐升高，高浓度镉胁迫20 d之后各部位镉含量分别为5 d时的1.73、1.49和1.40倍，分别为1287.25、1718.14和2385.27 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{DW}$ ，

而低浓度镉胁迫下分别为5 d时的2.21、1.88和1.20倍。相对于低浓度镉处理植株而言，高浓度镉处理下龙葵植株根、茎和叶片平均镉含量上升64.1%、80.5%和84.4%。

3 讨论

1977年新西兰科学家Brooks提出了超富集植物(hyptaccumulator)的概念，用来描述自然界中发现的茎叶中可积累Ni达1000 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ (干重)以上的植物^[13]，后来Baker和Brooks定义了重金属超富集植物^[14]，指出超富集植物是能超量吸收重金属并将其运输到地上部，在地上部能够较普通植物累积100倍以上某种重金属的植物。目前采用较多的正是Baker和Brooks提出的参考值，即把植物叶片或地上部(干重)中含Cd达到100 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，含Co、Cu、Ni、Pb达到1000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，Mn、Zn达到10000 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上的植物定为超富集植物。同时，Baker和Whiting^[15]给出了水培试验证实超富集植物的特征：①植物能耐受极高浓度的金属有效态；②相对于其他基因型或物种，该植物地上部能富集特别高的金属；③地上部/根系金属浓度的

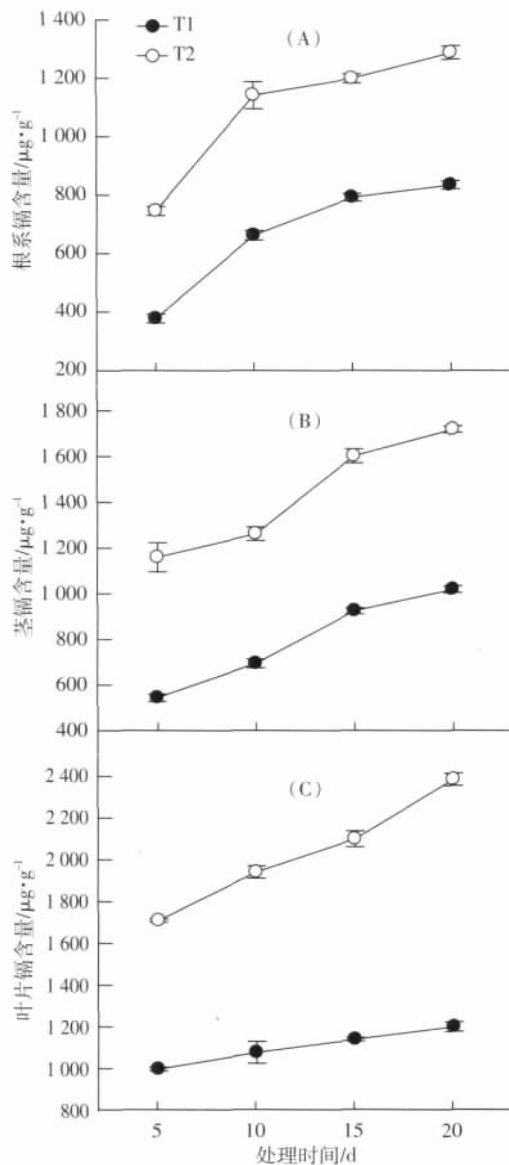


图 4 镉胁迫对龙葵幼苗根、茎、叶镉积累的影响

Figure 4 Cadmium accumulation in the root (A), stem (B) and leaf (C) of *Solanum nigrum* L. subjected to different Cd^{2+} concentrations

比值大于 1。魏树和等^[4]认为镉主要富集在龙葵叶片,并且在 Cd^{2+} 投加浓度为 $25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 土壤条件下,龙葵茎和叶中 Cd 含量分别为 103.8 和 $124.6 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。本试验中,在营养液培养条件下,虽然龙葵根系可以积累高浓度的镉,但是地上部尤其是叶片可以积累更高浓度的镉,与土培试验结果^[4]相一致,进一步确认龙葵为镉超富集植物。

植株冠根比(T/R)反映了物质在冠、根之间的分配比例。镉胁迫不仅影响根系发育及形态结构,还会改变植株器官的生长进程,特别是冠根比(表 1)。本研究中,镉胁迫下龙葵植株冠根比随着镉处理时间的

延长呈现先降后升的趋势,并且高镉处理下下降幅度较大,说明高浓度镉使龙葵幼苗地上部生长在胁迫初期受到严重抑制,随着时间的延长冠根比有所升高,原因是高镉胁迫使龙葵幼苗地上部生长和根系生长均受到严重抑制,而根系发育受抑制程度更高所致。

叶绿素含量降低导致植物光合效率降低,进而造成干物质质量积累下降。叶绿素含量降低可能是重金属与叶绿体中多种酶的巯基(-SH)结合导致叶绿体的结构和功能受到破坏,致使叶绿素分解^[16],也可能是由于重金属毒害引起细胞内膜结构的破坏导致叶绿素含量的降低^[17]。Woolhouse^[18]认为,随着叶片的衰老,叶绿素 a 含量较叶绿素 b 下降得更快,叶绿素 a/b 值可作为叶片衰老的指标。本研究中,低浓度镉处理下龙葵叶片叶绿素 a/b 值随处理时间的延长逐渐下降,而高浓度镉处理下呈现出“降-升-降”的变化规律,可能是由于胁迫初期叶绿素 a 下降较快,而随着胁迫时间的延长,重金属镉破坏叶绿体结构,使植物叶片叶绿素含量降低,叶绿素 b 降幅更大所引起的^[19]。

细胞膜作为植物调节和控制细胞内外物质运输和交换的重要结构,其透性是评价植物对污染物反应的常用指标之一。环境中的各种逆境胁迫均可导致植物膜透性增加,细胞内物质外渗。本研究中龙葵幼苗叶片相对电导率的增加表明其膜系统已经受到了一定的损伤。MDA 是植物在环境胁迫下膜脂过氧化而产生的一种具有细胞毒性的物质,它的生成是由体内自由基引发而产生的。同时,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,MDA 可与蛋白质、核酸、氨基酸等活性物质交联,形成不溶性的化合物(脂褐素)沉积,干扰细胞的正常生命活动^[20]。本研究中,龙葵幼苗在低镉和高镉胁迫下平均 MDA 含量较对照植株分别上升 117.7%和 194.6%,说明龙葵幼苗在高浓度镉胁迫下受到较严重伤害。

脯氨酸是植物重要的渗透调节物质,主要是由于胁迫刺激了脯氨酸的从头合成,是植物受到胁迫的一种信号,因此其含量的变化可以作为植物对逆境胁迫的一种生理生化指标。许多植物在环境胁迫下脯氨酸迅速积累,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。本研究结果显示,不论高浓度镉处理还是低浓度镉处理,龙葵幼苗叶片脯氨酸含量均显著升高,尤其是高浓度镉处理条件下平均含量较对照植株上升 7 倍多,说明脯氨酸在镉胁迫下能够起到较强的渗透调

节作用,可以作为渗透调节物质保护植株免受伤害。同时,镉胁迫下,植物的含水量降低,水势下降^[21],积累的可溶性糖可以作为渗透调节物质来保护细胞免受伤害,维持正常的生理代谢。试验数据表明,随着镉浓度升高和镉胁迫时间的延长,龙葵幼苗叶片可溶性糖含量逐渐升高,为植株正常生长提供必要的碳水化合物,并且起到一定的渗透调节作用。

4 结论

(1)营养液培养条件下,龙葵幼苗能够超富集镉,镉含量由高到低依次为叶片>茎>根系。

(2)从株高、根长以及叶片色素等生长指标来看,高浓度镉($150 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)抑制龙葵幼苗生长;从根系活力来看,低浓度镉($25 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)对龙葵幼苗生长具有促进作用。胁迫后期龙葵幼苗叶片相对电导率和MDA含量升高,尤其是高浓度镉,说明此时龙葵幼苗已经受到较严重伤害。

(3)龙葵幼苗叶片脯氨酸和可溶性糖在高浓度镉胁迫下起到较强的渗透调节作用。

参考文献:

- [1] Raskin I, Ensley B D, eds. Phytoremediation of toxic metals using plants to clean up the environment[C]. New York: John Wiley & Sons Inc, 2000.
- [2] Gupta U C, Gupta S C. Trace element toxicity relationships to crop production and livestock and human health implications for management[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1998, 29: 1491-1522.
- [3] 魏树和,周启星,王新,等.一种新发现的镉超积累植物龙葵(*Solanum nigrum* L.)[J].科学通报,2004,49(24):2568-2573.
WEI Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin, et al. A newly discovered cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(24): 2568-2573.
- [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 Shu-he, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Cadmium-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and its accumulating characteristics[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(3): 167-171.
- [5] 孙瑞莲,周启星,王新.镉超积累植物龙葵叶片中镉的积累与有机酸含量的关系[J].环境科学,2006,27(4):765-769.
SUN Rui-lian, ZHOU Qi-xing, WANG Xin. Relationships between cadmium accumulation and organic acids in leaves of *Solanum nigrum* L. as a cadmium-hyperaccumulator[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(4): 765-769.
- [6] Wang L, Zhou Q X, Ding L L, et al. Effect of cadmium toxicity on nitrogen metabolism in leaves of *Solanum nigrum* L. as a newly found cadmium hyperaccumulator[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154: 818-825.
- [7] 张宪政.作物生理研究法[M].北京:农业出版社,1992:142.
- [8] 李合生,孙群,赵世杰,等.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 He-sheng, SUN Qun, ZHAO Shi-jie, et al. Principle and technology of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [9] 郝建军,刘延吉.植物生理学实验技术[M].沈阳:辽宁科学技术出版社,2001.
HAO Jian-jun, LIU Yan-ji. The experimental technique in plant physiology[M]. Shenyang: Liaoning Science and Technology Press, 2001.
- [10] 邹琦.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业出版社,2000:111-114.
ZOU Qi. The experimental guide of plant physiology[M]. Beijing: Chinese Agricultural Press, 2000: 111-114.
- [11] 严重玲,李瑞智,钟章成.模拟酸雨对绿豆、玉米生理生态特性的影响[J].应用生态学报,1995(6):124-131.
YAN Chong-ling, LI Rui-zhi, ZHONG Zhang-cheng. Effect of simulated acid rain on ecophysiological characteristics of mung bean and maize[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995(6): 124-131.
- [12] 高侠莉,王爱民,袁宗飞,等.污灌对蔬菜的生理生态指标及细胞学影响研究[J].中国环境科学,1997,17(5):443-445.
GAO Xia-li, WANG Ai-min, YUAN Zong-fei, et al. The effect of wastewater on ecology-physiological and cyto-toxicology of vegetables[J]. *China Environmental Science*, 1997, 17(5): 443-445.
- [13] Brooks R R, Lee J, Reeves R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977(7): 49-57.
- [14] Baker A J M, Brooks R R. Terrestrial higher plants which hyperaccumulate metallic elements—a review of their distribution, ecology and phytochemistry[J]. *Biorecovery*, 1989(1): 811-826.
- [15] Baker A J M, Whiting S N. In search of the Holy Grail—a further step in understanding metal hyperaccumulation? [J]. *New Phytologist*, 2002, 155: 1-4.
- [16] 孙铁珩,周启星,李培军.污染生态学[M].北京:科学出版社,2001:152.
SUN Tie-heng, ZHOU Qi-xing, LI Pei-jun. Pollution ecology[M]. Beijing: Science Press, 2001:152.
- [17] Shi G X, Xu Q S, Xie K B, et al. Physiology and ultrastructure of *Azolla imbricate* as affected by Hg^{2+} and Cd^{2+} toxicity[J]. *Acta Botanica Sinica*, 2003, 45(4): 437-444.
- [18] Woolhouse H W. Longevity and senescence in plant[J]. *Science Progress*, 1974, 61: 123-147.
- [19] 郭智,原海燕,奥岩松.龙葵和茄子幼苗对镉胁迫的生理响应[J].生态环境,2008,17(3):1009-1015.
GUO Zhi, YUAN Hai-yan, AO Yan-song. Physiological response of *Solanum nigrum* L and *Solanum melongena* L seedlings to cadmium stress[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(3): 1009-1015.
- [20] Shah K, Kumar R G, Verma A, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161: 1135-1144.
- [21] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, 35(4): 525-545.