植物营养与肥料学报 2012,18(6):1499-1506
Plant Nutrition and Fertilizer Science

不同光强下龙葵对镉的吸收积累及生理响应

杜照奎,王 江*
(台州学院生态研究所,浙江临海 317000)

摘要: 采用土培方法探讨了不同光强(自然光和50%遮光)和镉(Cd)不同添加量(0、25、50、75 和 100 mg/kg)复合处理下,龙葵对 Cd 的吸收累积特征,超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性以及叶绿素、丙二醛(MDA)、谷胱甘肽(GSH)和植物螯合肽(PCs)含量等的变化特征。结果表明,自然光条件下龙葵叶绿素 b、叶绿素 a+b 以及地上和地下部 Cd 富集量均显著低于遮光处理;叶和根的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性在自然光条件下随土壤 Cd 添加量的增大先升后降,而在遮光处理下则持续升高;除 Cd 25 mg/kg 处理时根 POD 及叶 CAT 活性在不同光强处理下没有显著差异外,其余 Cd 添加量处理下 SOD、POD、CAT 和 APX 活性在自然光条件下均显著高于遮光处理;自然光条件下龙葵叶和根的 MDA 含量显著高于遮光处理,而叶和根的 GSH 含量和叶中 PCs 含量均显著低于遮光处理。研究结果表明,遮光环境促进了龙葵对 Cd 的富集,并且减轻了 Cd 对龙葵的氧化胁迫。

关键词: 镉;龙葵;光强;抗氧化酶;植物螯合肽
中图分类号: Q949.777.7　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1008-505X(2012)06-1499-08

Cd bio-accumulative characteristics and physiological response of *Solanum nigrum* L. under different light intensities

DU Zhao-kui, WANG Jiang*
(*Institute of Ecology, Taizhou University, Linhai, Zhejiang 317000, China*)

Abstract: Under different light intensities (natural light and 50% shading), bioaccumulation of Cd, activities of antioxidative enzymes (SOD, POD, CAT and APX), and contents of chlorophyll, MDA, GSH and PCs of *Solanum nigrum* L. with different Cd concentration treatments (0, 25, 50, 75 and 100 mg/kg) were investigated. The results show that the contents of chlorophyll b and a+b of leaves of *S. nigrum* L. and Cd accumulations in shoots and roots of *S. nigrum* L. grown under the natural light are significantly lower than those under the shading. With the increase of Cd concentration, the activities of SOD, POD, CAT and APX in leaves and roots of *S. nigrum* L. are decreased after an initial increase under the natural light, while those grown under the shading environment are increased consistently. The root POD activity and leaf CAT activity under the treatment of 25 mg/kg Cd have no significant differences between the natural light and the shading environment, however, in the treatments of the other Cd concentrations, the activities of SOD, POD, CAT and APX of leaves and roots of *S. nigrum* L. grown under the natural light are significantly higher than those under the shading. The MDA contents in leaves and roots of *S. nigrum* L. under the high light are significantly higher than those under the shading environment, while the GSH and PCs contents in leaves and roots of *S. nigrum* L. under the natural light are significantly lower than those under the shading environment. These results indicate that the shading environment promotes the Cd accumulation

收稿日期: 2012-03-28　　**接受日期:** 2012-08-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(31000256);浙江省自然科学基金项目(5100016);浙江省教育厅科研项目(Y201223322);台州学院 2011 年校立项目(2011PY15)资助。
作者简介: 杜照奎(1979—),男,湖北随州人,讲师,博士研究生,主要从事植物生理生态学研究。E-mail: dzk@tzc.edu.cn
*通讯作者 E-mail: wangjiang@tzc.edu.cn

of *S. nigrum* L. and reduces the oxidative stress of Cd to *S. nigrum* L.

Key words: Cd; *Solanum nigrum* L.; light intensity; antioxidative enzyme; phytochelatin

植物修复(phytoremediation)兴起于20世纪80年代,是植物系统与其根际微生物通过吸收、固定或降解等机制来减少土壤中重金属含量的新技术,在面积大且重金属轻度污染或中度污染的土壤修复中成效显著,具备高效、廉价和美观的特点,现已被广泛接受[1-2]。该技术利用植物对土壤中的重金属吸收,通过收获地上部分将富集的重金属固定下来,因而技术核心是筛选或培育出对重金属耐性强的超富集植物[3]。到目前为止,已发现的超积累植物超过400种[4]。

光对植物的作用主要由光照强度、光照时间和光谱成分决定[5-6],它们的时空变化导致了光环境的异质性。通常光照增加可以促进光合作用,有利于植物生物量累积,但很多研究揭示[7-8],在中等强度的光照下植物生物量的累积更多,光照过强反而会抑制生物量的积累。因此,植物的生长与光照强度间存在着较强的关联性,而且,光照强度变化对超富集植物的重金属富集及其耐性特征同样有着重要的影响。Romanowska等[9]研究表明,强光处理可以增强豌豆对铅(Pb)的耐性;而Artetxe等[10]发现低光强处理则会增强浮萍对锌(Zn)和镉(Cd)的耐性。柯世省等[11]发现,与50%的光照强度相比,全光照条件下镉对富集植物紫茉莉(*Mirabilis jalapa*)叶片氧化胁迫程度增强,同时对植株的生长抑制更强。但是李娜等[12]的研究结果显示,光照强度从100%降至50%时,超富集植物伴矿景天(*Sedum pluillbizincic*)地上部Zn和Cd的吸收量并没有受到显著影响。

龙葵(*Solanum nigrum* L.)为茄科茄属一年生或多年生草本植物,有研究发现龙葵为重金属Cd的超富集植物[3,13],由于其生长周期短、生物量较大而成为植物修复机理研究和应用的良好材料。已有的研究主要集中在探讨自然光照条件下龙葵对重金属的吸收[3,14-18]及抗性机理[19-20]。然而,实际修复过程中,坡向和坡度等地形因素以及群落自身演替导致的光环境变化均会对龙葵等超富集植物的生长和生理特性产生影响,但目前关于不同光强下龙葵对Cd的富集及生理响应的相关研究尚未见报道。本文以龙葵为研究对象,在不同光照强度下,研究龙葵对Cd的富集特征及生理响应,旨在为龙葵在修复Cd污染土壤上的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

龙葵种子采集于浙江省临海市山地植被群落。供试土壤为黄壤土,土壤与育苗基质(镇江培蕾有机肥公司)按照体积比1:1混合待用。混合土壤的基本理化特性为:全氮0.73 g/kg、铵态氮6.84 mg/kg、全磷0.21 g/kg、有效磷103.74 mg/kg、总Cd含量0.65 mg/kg。土壤风干后过2 mm筛。

1.2 试验设计

试验采用盆栽,每盆装土(混合后的栽培基质)1.5 kg,分别设置土壤Cd添加量为0、25、50、75和100 mg/kg 5个处理,每个处理6个重复(以纯Cd计),Cd以$CdCl_2$溶液的形式与土壤混合均匀,室温下稳定两周。

龙葵种子用2%的NaClO溶液消毒后,用去离子水冲洗,放入装有石英砂的塑料盆中(20 cm×20 cm×10 cm)培养。种子于2009年11月份播种,放置于室内,定期浇水,在2010年3月份开始陆续发芽。待幼苗长出1片真叶后,选择均匀一致的幼苗,移栽至以上添加重金属Cd的盆钵中,每盆6株。植物移栽7d后将Cd添加量处理的幼苗均分成2组,每组3盆,进行遮光处理。试验设定2个光照强度,即自然光强(natural light)和50%遮光(50% shading),通过覆盖不同层数黑色遮阳网实现,自然光处理不盖遮阳网,晴天正午最大光强范围为1600~2100 μmol/(m^2·s);50%遮光处理覆盖一层遮阳网,光照强度约为自然光照的50%(经台湾泰仕产TES-1332A照度计测定),光处理期间均不补充额外光源。处理期间每天17:00用称重法补充水分,保持土壤含水量控制在最大田间持水量的70%左右。2010年9月底,龙葵处于完全成熟阶段,开始进行生理指标和生物量的测定。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 生物量及重金属含量的测定 将植物体和土壤一起从盆中取出,小心用自来水洗掉根部泥土,将植物茎、叶和根分开,分别用蒸馏水和去离子水各洗2次,105℃杀青10 min,75℃烘至恒重后称重。烘干样粉碎过筛,用HNO_3-$HClO_4$消化,采用电感

耦合等离子体发射光谱仪(Perkin Elmer, USA)测定 Cd 的含量。

1.3.2 光合色素含量的测定　取叶位一致的成熟叶片 0.2 g,加入 10 mL 浓度为 80% 的丙酮研磨匀浆,转移至具塞试管内暗环境下静置 30 min,4800 × g 离心 3 min,取上清于 470、646 和 663 nm 处测吸光值。叶绿素 a(Chl a)、叶绿素 b(Chl b)和类胡萝卜素(Car)含量参照 Daneshmand[21] 的方法计算。

1.3.3 抗氧化酶活性的测定　称取剪碎、混匀的叶片 0.5 g,加入 0.1 mmol/L 的磷酸缓冲液 10 mL(pH 7.8,内含 0.1 mmol/L EDTA 和 1 % 聚乙烯吡咯烷酮)和少量石英砂用玻璃研钵研磨成匀浆,在 4℃ 12000 ×g 下离心 15 min,上清液为酶粗液,用于测定超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)的活性。SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法,CAT 和 APX 活性采用紫外吸收法, POD 活性采用愈创木酚法[22]测定。

1.3.4 非蛋白巯基(Non-protein thiol, NPT)及丙二醛(MDA)含量的测定　向 0.50 g 新鲜叶片和根中分别加入 5 mL 浓度为 0.02 mol/L 的 EDTA 溶液,4℃下研磨成匀浆,12000 × g 离心 10 min,收集上清液用于 NPT 的测定。NPT 测定方法: 取 0.25 mL 上清液加入到 5 mL 离心管中,加 0.25 mL 浓度为 0.2 mmol/L 的 Tris 缓冲液(pH 8.2)和 0.05 mL 浓度为 0.01 mmol/L 的 5,5 二硫代双(2 - 硝基苯甲酸,DTNB),加入甲醇 3.95 mL, 20℃保温 10 min 后,在 412 nm 处测定吸光值。同时做试剂空白(不含样品)和样品空白。还原型谷胱甘肽(Glutathione, GSH)含量的测定参照 Cao 等的方法[23],植物螯合肽(phytochelatins, PCs)的含量为 NPT 含量与 GSH 含量的差值。MDA 含量参照 Daneshmand[21]的方法测定。

1.4　数据分析

富集系数 BCF(bioaccumulation factor) = 地上部重金属含量/土壤中重金属含量[24]

转移系数 TF(translocation factor) = 地上部重金属含量/地下部重金属含量

各处理相关指标数据用平均值 ± 标准误($\bar{x} \pm s\bar{x}$)表示。运用 SPSS 11.5 就光强和 Cd 添加量处理对各测量指标的影响进行双因素方差分析(Two-Way ANOVA),并采用 Duncan 新复极差检验法对相同光强下各指标分别进行多重比较($P < 0.05$),采用独立样本 t 检验对相同 Cd 添加量处理的各指标作差异显著性检验($P < 0.05$)。

2　结果与分析

2.1　不同光强下龙葵生物量对 Cd 的响应

两种光照处理下,龙葵地上部生物量均随 Cd 添加量的增加而减少(图 1),但在 Cd 各处理间没有显著差异(自然光 $F = 1.60$, $P > 0.05$; 50% 遮光 $F = 1.43$, $P > 0.05$)。地下生物量同样随 Cd 添加量的增加而减少,自然光条件下 Cd 的各处理间存在显著差异($F = 3.77$, $P < 0.05$),而遮光处理下 Cd 添加量处理间并没有显著差异($F = 0.84$, $P > 0.05$)。相同 Cd 添加量处理,地上与地下生物量在不同光强度处理间均没有显著差异($P > 0.05$)。

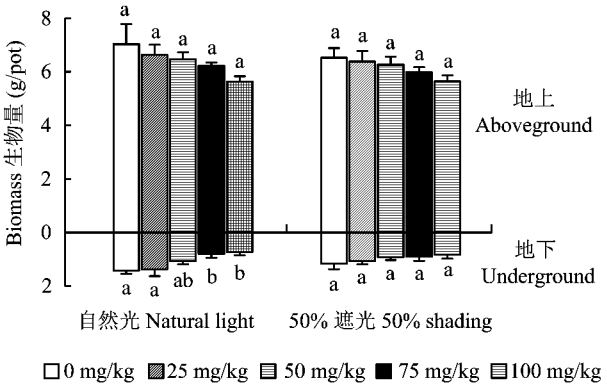

图 1　龙葵地上部和地下部生物量

Fig. 1　The dry biomass of shoots and roots of *S. nigrum* L.

[注(Notes): 柱子上标记不同字母表示同一光强处理在 $P < 0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant among different Cd rate treatments under the same light intensity at the 0.05 level.]

2.2　不同光强下龙葵 Cd 的富集特征

两种光强处理下,随着 Cd 添加量的增加,龙葵地上和地下部 Cd 的富集量均呈现增加趋势,自然光照条件下除 Cd 添加量为 75 和 100 mg/kg 之间差异不显著外,其余均达到显著差异水平(表 1)。相同 Cd 处理下,自然光条件的地上和地下部 Cd 的富集量均显著低于遮光处理($P < 0.05$)。双因素方差分析表明,光强与 Cd 添加量之间的交互作用对地上($F = 13.90$, $P < 0.05$)和地下部($F = 29.26$, $P < 0.05$)Cd 的富集存在显著影响。遮光处理下龙葵的富集系数均显著高于自然光条件($P < 0.05$)。此外,所有处理条件下,龙葵的转移系数均大于 1。

表1 不同光强下龙葵富集Cd的量、富集系数和转移系数

Table 1 Accumulation, BCF and TF of Cd in *S. nigrum* L. under different light intensities

光强 Light intensity	镉添加量 Cd rate (mg/kg)	镉含量 Cd content (mg/kg)		富集系数 BCF	转移系数 TF
		地上部 Shoot	地下部 Root		
自然光 Natural light	0	0.10 ±0.01 d	0.06 ±0.01 d		
	25	18.28 ±0.96 c	8.93 ±0.09 c	0.73 ±0.04 a	2.05 ±0.10 a
	50	37.94 ±3.02 b	18.10 ±0.59 b	0.76 ±0.06 a	2.09 ±0.11 a
	75	56.21 ±1.41 a	28.54 ±1.46 a	0.75 ±0.02 a	1.97 ±0.05 a
	100	58.15 ±1.62 a	28.57 ±1.45 a	0.58 ±0.03 b	2.05 ±0.17 a
50%遮光 50% shading	0	0.09 ±0.01 e	0.04 ±0.01 e		
	25	24.33 ±3.48 d	11.40 ±0.38 d	0.99 ±0.14 a	2.17 ±0.36 a
	50	46.58 ±3.77 c	21.80 ±0.94 c	0.93 ±0.08 a	2.09 ±0.24 a
	75	65.06 ±1.61 b	37.12 ±1.65 b	0.87 ±0.02 a	1.75 ±0.06 a
	100	91.09 ±3.65 a	48.04 ±1.30 a	0.91 ±0.04 a	1.90 ±0.05 a

注(Note): BCF—Bioaccumulation factor; TF—Translocation factor. 同列数字后不同字母表示同一光强处理下在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters indicate in the same light intensity significant differences at the 5% level.

2.3 不同光强下龙葵光合色素对Cd的响应

两种光强处理下,龙葵叶绿素a、b和总叶绿素含量均随Cd添加量的增加而显著降低,自然光下类胡萝卜素同样显著下降,但是在遮光处理下没有显著变化(表2)。两种光强处理下,叶绿素a/b值则均没有显著变化。自然光条件下叶绿素a在低量

表2 不同光强下Cd对龙葵光合色素含量的影响

Table 2 Effects of Cd on the contents of photosynthetic pigments of *S. nigrum* L. under different light intensities

光强 Light intensity	镉添加量 Cd rate (mg/kg)	光合色素含量 Contents of photosynthetic pigments (mg/g, FW)				
		叶绿素a Chl a	叶绿素b Chl b	总叶绿素 Chl a+b	叶绿素a/b值 Chl a/b	类胡萝卜素 Car
自然光 Natural light	0	2.41 ±0.11 a	1.75 ±0.02 a	4.17 ±0.09 a	1.38 ±0.07 a	0.72 ±0.09 a
	25	2.09 ±0.03 b	1.58 ±0.02 b	3.67 ±0.05 b	1.32 ±0.02 a	0.66 ±0.01 ab
	50	1.85 ±0.04 c	1.35 ±0.03 c	3.21 ±0.02 c	1.37 ±0.01 a	0.56 ±0.01 b
	75	1.51 ±0.05 d	1.11 ±0.01 d	2.62 ±0.04 d	1.36 ±0.02 a	0.40 ±0.01 c
	100	1.05 ±0.03 e	0.84 ±0.03 e	1.89 ±0.03 e	1.42 ±0.06 a	0.32 ±0.02 c
50%遮光 50% shading	0	2.07 ±0.06 a	1.84 ±0.04 a	3.91 ±0.06 a	1.12 ±0.05 a	0.68 ±0.07 a
	25	1.91 ±0.01 b	1.82 ±0.01 a	3.73 ±0.01 b	1.05 ±0.01 a	0.67 ±0.04 a
	50	1.90 ±0.01 b	1.80 ±0.01 a	3.72 ±0.01 b	1.06 ±0.01 a	0.66 ±0.03 a
	75	1.85 ±0.03 bc	1.79 ±0.02 a	3.64 ±0.03 b	1.04 ±0.02 a	0.60 ±0.03 a
	100	1.76 ±0.02 c	1.67 ±0.03 b	3.43 ±0.03 c	1.05 ±0.03 a	0.59 ±0.02 a

注(Note): 同一光强处理下数字后不同字母表示在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters under the same light intensity are significantly different at the 5% level.

Cd(0 和 25 mg/kg)处理时含量明显高于 50% 遮光处理,但是在高量 Cd(75 和 100 mg/kg)处理时则明显低于遮光处理($P<0.05$)。试验结果表明,50% 遮光处理可以缓解 Cd 对龙葵叶绿素 a 的破坏。自然光条件下叶绿素 b 含量在各 Cd 添加量处理中均显著低于遮光处理($P<0.05$),而叶绿素 a/b 值则均显著高于遮光处理($P<0.05$)。自然光条件下类胡萝卜素含量在 Cd 0 和 25 mg/kg 处理时与遮光处理没有显著差异($P>0.05$),但在大于 Cd 50 mg/kg 处理时均显著低于遮光处理($P<0.05$)。双因素方差分析表明,光强与 Cd 添加量之间的交互作用对叶绿素 a($F=45.06$, $P<0.05$)、叶绿素 b($F=41.52$, $P<0.05$)、总叶绿素($F=114.34$, $P<0.05$)和类胡萝卜素($F=4.81$, $P<0.05$)存在显著影响。

2.4　不同光强下龙葵抗氧化酶对 Cd 的响应(图 2)

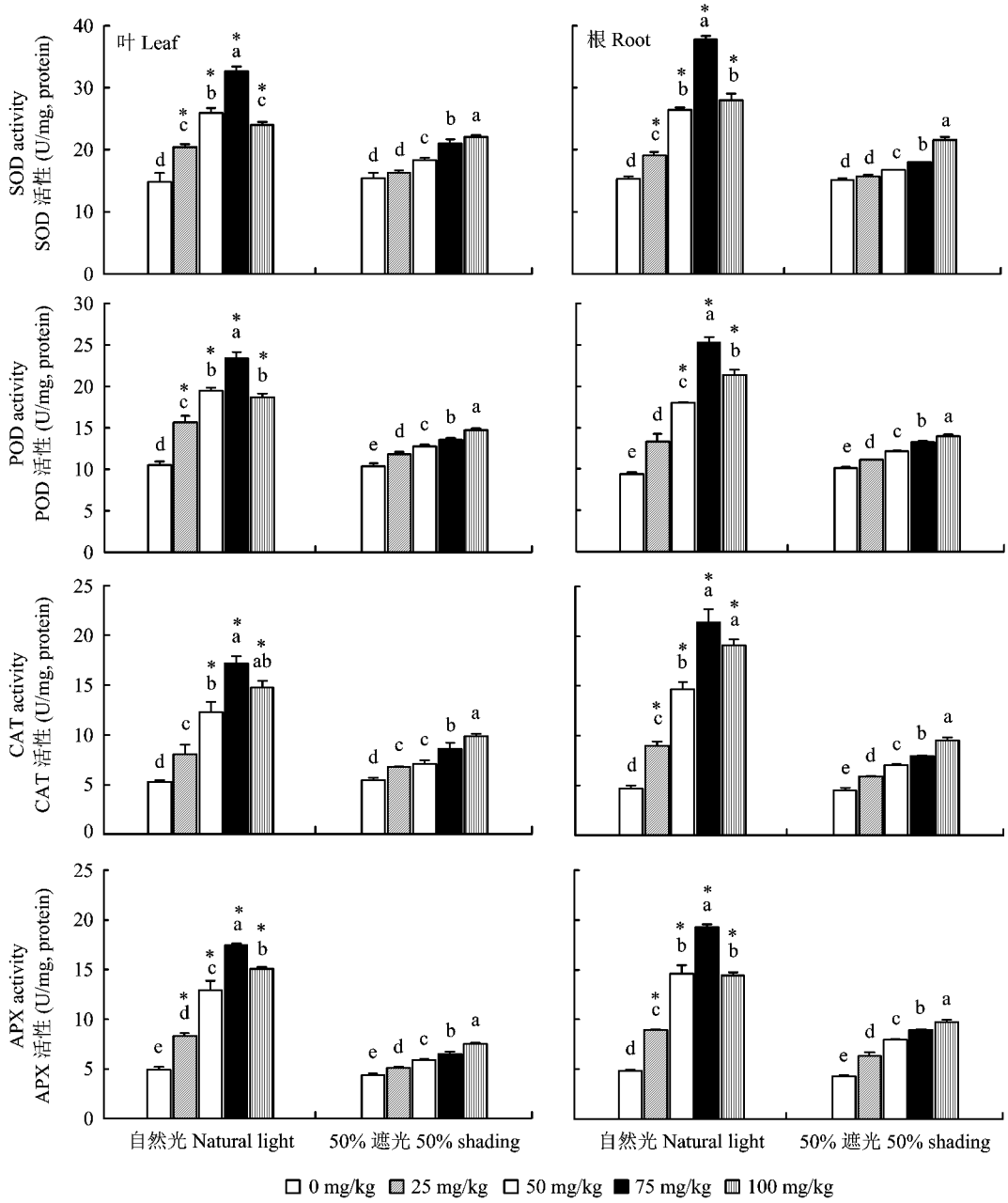

图 2　不同光强下 Cd 对龙葵抗氧化酶活性的影响

Fig. 2　Effects of Cd on antioxidant enzyme activities of *S. nigrum* under different light intensities

[注(Note)：柱子上标记不同字母表示同一光强处理在 $P<0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant among different Cd rate treatments under the same light intensity at the 0.05 level；* 表示相同 Cd 添加量下不同光照处理之间在 $P<0.05$ 水平差异显著 Indicate significant difference between natural light and 50% shading treatments under the same Cd rate at the 0.05 level.]

自然光条件下,随着 Cd 添加量的增加,叶和根的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均呈现先升后降的趋势,且均在 Cd 添加量为 75 mg/kg 时达到最大值;而遮光处理下,随着 Cd 添加量的增加,叶和根的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均呈现持续升高的趋势。除在 Cd 25 mg/kg 处理时,根 POD 及叶 CAT 活性在两种光强处理间没有显著差异外,自然光条件下其 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均显著高于遮光处理。双因素方差分析表明,光强与 Cd 添加量的交互作用对叶和根的 SOD(叶 $F=21.44, P<0.05$;根 $F=107.06, P<0.05$)、POD(叶 $F=33.90, P<0.05$;根 $F=58.80, P<0.05$)、CAT(叶 $F=16.08, P<0.05$;根 $F=43.57, P<0.05$)和 APX(叶 $F=68.27, P<0.05$;根 $F=65.82, P<0.05$)活性均产生显著的影响。

2.5 不同光强下龙葵丙二醛含量对 Cd 的响应

两种光强处理下,龙葵叶和根 MDA 含量均随 Cd 添加量的增加而升高(图3)。在 Cd 添加量大于 50 mg/kg 时,自然光条件下叶中 MDA 含量显著高于遮光处理($P<0.05$),而只有在 Cd 100 mg/kg 处理时,根中 MDA 的含量显著高于遮光处理($P<0.05$)。双因素方差分析结果表明,光强与 Cd 添加量的相互作用对叶 MDA($F=19.54, P<0.05$)和根 MDA($F=10.65, P<0.05$)含量均产生显著影响。

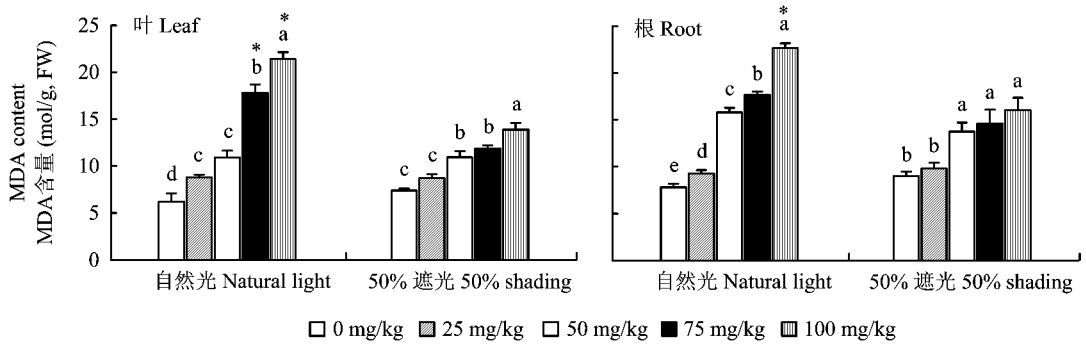

图3 不同光强下 Cd 对龙葵丙二醛含量的影响

Fig. 3 Effects of Cd on MDA contents of *S. nigrum* L. under different light intensities

[注(Note):柱子上标记不同字母表示同一光强处理在 $P<0.05$ 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant among different Cd rate treatments under the same light intensity at the 0.05 level; * 表示相同 Cd 添加量下不同光照处理之间在 $P<0.05$ 水平差异显著 Indicate significant difference between natural light and 50% shading treatments under the same Cd rate at the 0.05 level.]

2.6 不同光强下龙葵非蛋白巯基化合物对 Cd 的响应

除了在自然光条件下,Cd 100 mg/kg 处理的叶中还原型谷胱甘肽(GSH)含量比 Cd 75 mg/kg 处理略有降低,以及遮光处理下,根中植物螯合肽(PCs)含量在 Cd 25 mg/kg 处理与对照相比没有显著差异外,叶和根中非蛋白巯基(NPT)、GSH 和 PCs 含量在两种光强处理下,均随 Cd 添加量的增加而增加(表3)。相同 Cd 添加量处理下,叶和根中的 NPT、GSH 及叶中 PCs 含量在自然光条件下均显著低于遮光处理($P<0.05$),但根中 PCs 含量在不同光强处理间则无显著差异($P>0.05$)。双因素方差分析结果表明,光强与 Cd 添加量的交互作用对叶和根的 NPT 含量(叶 $F=155.59, P<0.05$;根 $F=107.82, P<0.05$)、GSH 含量(叶 $F=122.95, P<0.05$;根 $F=209.19, P<0.05$)以及叶的 PCs 含量($F=7.89, P<0.05$)产生了显著影响。

3 讨论

魏树和等[13]和 Sun 等[3]的研究表明,龙葵是一种 Cd 的超富集植物。本研究虽然发现两种光强处理下的龙葵对 Cd 的转移系数均大于1,但其 Cd 富集量未达到 100 mg/kg 的 Cd 超富集含量标准,而且其富集系数基本小于1。这可能由于本试验所选材料采自山地植物群落,并未来自 Cd 污染区域,因此其对 Cd 的富集能力还未通过对污染环境的适应而充分发挥出来。秦建桥等[25]研究同样发现五节芒矿区种群积累的 Cd 总量远高于非矿区种群。因此,本研究与以前研究结果的不一致主要是由于所获取植物的生长环境不同而造成的。

生物量是金属胁迫对植物的重要表现特征[19],本研究发现在自然光和遮光处理下,龙葵的地上生物量在不同 Cd 添加量处理间均没有呈现显著差异。根生物量在遮光处理下同样没有呈现出显著差

表 3　不同光强下 Cd 对龙葵非蛋白巯基、谷胱甘肽和植物螯合肽含量的影响

Table 3　Effects of Cd on non-protein thiol, GSH and phytochelatins of *S. nigrum* L. under different light intensities

光照 Light intensity	镉添加量 Cd rate (mg/kg)	非蛋白巯基 Non-protein thiol (μmol/g, FW)		还原型谷胱甘肽 Glutathione, (μmol/g, FW)		植物螯合肽 Phytochelatins (μmol/g, FW)	
		叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root	叶 Leaf	根 Root
自然光 Natural light	0	0.13 ±0.02 d	0.12 ±0.01 d	0.10 ±0.01 d	0.10 ±0.01 d	0.03 ±0.02 d	0.02 ±0.01 c
	25	0.16 ±0.01 c	0.16 ±0.02 c	0.12 ±0.01 c	0.13 ±0.01 c	0.04 ±0.01 cd	0.04 ±0.01 c
	50	0.22 ±0.01 b	0.22 ±0.01 b	0.17 ±0.01 b	0.14 ±0.01 b	0.05 ±0.01 bc	0.08 ±0.01 b
	75	0.28 ±0.01 a	0.31 ±0.03 a	0.22 ±0.01 a	0.16 ±0.01 a	0.07 ±0.01 ab	0.14 ±0.01 a
	100	0.29 ±0.01 a	0.32 ±0.01 a	0.21 ±0.02 a	0.18 ±0.01 a	0.08 ±0.01 a	0.16 ±0.01 a
50%遮光 50% shading	0	0.12 ±0.01 e	0.13 ±0.01 e	0.10 ±0.01 e	0.10 ±0.01 e	0.03 ±0.01 d	0.03 ±0.01 c
	25	0.23 ±0.01 d	0.23 ±0.01 d	0.17 ±0.01 d	0.20 ±0.01 d	0.07 ±0.01 c	0.03 ±0.01 c
	50	0.32 ±0.01 c	0.38 ±0.01 c	0.23 ±0.01 c	0.32 ±0.02 c	0.09 ±0.01 b	0.07 ±0.01 bc
	75	0.44 ±0.02 b	0.50 ±0.01 b	0.33 ±0.01 b	0.40 ±0.01 b	0.11 ±0.01 ab	0.10 ±0.01 b
	100	0.55 ±0.04 a	0.69 ±0.01 a	0.43 ±0.02 a	0.54 ±0.14 a	0.12 ±0.01 a	0.15 ±0.05 a

注(Note): 数值后不同字母表示同一光强处理下在 $P<0.05$ 水平差异显著 Values followed by different letters under the same light intensity are significantly different at the 5% level.

异,而在自然光条件下则呈现出下降的趋势。因此,该研究结果表明,龙葵根比地上部对光处理的反应更为敏感。

镉中毒的常见症状是植物叶片出现坏死斑点和发黄[26],本试验中自然光条件下高量镉处理的植株叶片上出现了大量暗褐色的坏死斑点; 而在遮光处理下,高量镉处理的植株叶片只有零星的黄色斑点,因此强光加重了龙葵的镉毒害症状。研究结果显示在相同 Cd 胁迫强度下,遮光处理龙葵叶片叶绿素 a+b和叶绿素 b 的含量均显著高于自然光条件,而叶绿素 a/b 值则显著低于自然光条件。叶绿素a+b 和叶绿素 b 均增加,叶绿素 a/b 值降低,是植物利用弱光能力强的判断指标[27]。因此说明 Cd 胁迫下龙葵对光仍然具有较强的适应能力。

在本研究中,自然光条件下龙葵对 Cd 的富集量相比遮光处理明显降低,这可能是其自我保护机制之一。因为,在自然光下 MDA 含量较遮光处理明显增加,表明自然光下龙葵受到 Cd 胁迫较遮光处理严重,减少 Cd 的吸收则可以减轻植物体内受到的氧化胁迫。自然光下龙葵受到胁迫严重的原因可能是由于龙葵为阴性植物,光饱和点低,自然光容易造成光抑制,产生较多的自由基。自然光下龙葵叶和根内 SOD、POD、CAT 和 APX 的活性则随土壤 Cd 添加量的增加而先升后降,表明酶系统已经无法消除过多的自由基,过强的氧化胁迫导致龙葵的酶系统崩溃。植物除了通过抗氧化酶系统(SOD、CAT、POD 和 APX 等)清除自由基外,还可以通过非酶抗氧化物质(GSH、抗坏血酸等)消除或减少重金属带来的氧化伤害[28]。GSH 和 PCs 是植物体内重要的非酶抗氧化物质,它们可以与重金属结合,使其失去活性[29]。本研究结果表明,相同 Cd 胁迫强度下遮光处理龙葵叶和根中的 GSH 和 PCs 含量均显著高于自然光条件。GSH 和 PCs 的含量增加可能是龙葵在遮光处理下受到氧化胁迫较轻的主要原因。但是,遮光处理对 GSH 和 PCs 含量增加的生理机制仍然没有相关的研究报道,是今后研究中需要确定的龙葵的重要耐性机制。

本研究结果表明,光强对龙葵的生长和对 Cd 的富集影响较大,因而在龙葵修复 Cd 污染土壤时,应考虑与其他高大植物间种,以使其获得必要的遮光条件,将有可能是未来重金属污染土壤植物修复工程的一个重要技术手段。

参 考 文 献:

[1] Fellet G, Marchiol L, Perosa D *et al*. The application of phytoremediation technology in a soil contaminated by pyrite cinders[J]. Ecol. Eng., 2007, 31: 207-214.

[2] Doty S L. Enhancing phytoremediation through the use of transgenics and endophytes[J]. New Phytol., 2008, 179: 318-333.

[3] Sun Y, Zhou Q, Diao C. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. Bioresour. Technol., 2008, 99(5): 1103-1110.

[4] Gendre D, Czernic P, Conéjéro G *et al*. *Tcysl3*, a member of the *ysl* gene family from the hyper-accumulator *Thlaspi caerulescens*, encodes a nicotianamine-Ni/Fe transporter[J]. Plant J., 2007, 49(1): 1-15.

[5] Li H, Tang C, Xu Z *et al*. Effects of different light sources on the growth of non-heading Chinese cabbage (*Brassica campestris* L.) [J]. J. Agr. Sci., 2012, 4(4): 262-273.

[6] Hallik L, Niinemets Ü, Kull O. Photosynthetic acclimation to light in woody and herbaceous species: A comparison of leaf structure, pigment content and chlorophyll fluorescence characteristics measured in the field [J]. Plant Biol., 2012, 14(1): 88-99.

[7] Gardiner E S, Hodges J D. Growth and biomass distribution of cherrybark oak (*Quercus pagoda* raf.) seedlings as influenced by light availability[J]. For. Ecol. Manag., 1998, 108: 127-134.

[8] Poorter L. Growth response of 15 rainforest tree species to a light gradient: The relative importance of morphological and physiological traits[J]. Funct. Ecol., 1999, 13: 396-410.

[9] Romanowska E, Wróblewska B, Drozak A *et al*. High light intensity protects photosynthetic apparatus of pea plants against exposure to lead[J]. Plant Physiol. Biochem., 2006, 44: 387-394.

[10] Artetxe U, Garcia-Plazaola J I, Hernandez A *et al*. Low light grown duckweed plants are more protected against the toxicity induced by Zn and Cd[J]. Plant Physiol. Biochem., 2002, 40: 859-863.

[11] 柯世省, 张崇邦, 王江. 不同光强下镉胁迫对紫茉莉光合作用和抗氧化系统的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(6): 1302-1310.
Ke S S, Zhang C B, Wang J. Effects of cadmium stress on photosynthesis and antioxidant systems in *Mirabilis jalapa* under different light intensities[J]. Acta Sci. Circumst., 2009, 29(6): 1302-1310.

[12] 李娜, 唐明灯, 崔立强, 等. 光照强度对伴矿景天生长和锌镉吸收性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(2): 370-373.
Li N N, Tang M D, Cui L Q *et al*. Effects of light intensity on plant growth and zinc and cadmium uptake by *Sedum plumbizincicola*[J]. Acta Pedol. Sin., 2010, 47(2): 370-373.

[13] 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]. Chin. J. Environ. Sci., 2005, 26(3): 167-171.

[14] Xiao X, Luo S, Zeng G *et al*. Biosorption of cadmium by endophytic fungus (ef) microsphaeropsis sp. Lse10 isolated from cadmium hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. [J]. Bioresour. Technol., 2010, 101(6): 1668-1674.

[15] Wei S, Li Y, Zhou Q *et al*. Effect of fertilizer amendments on phytoremediation of Cd-contaminated soil by a newly discovered hyperaccumulator *Solanum nigrum* L[J]. J. Hazard. Mater., 2010, 176(1-3): 269-273.

[16] Gao Y, Miao C, Mao L *et al*. Improvement of phytoextraction and antioxidative defense in *Solanum nigrum* L. Under cadmium stress by application of cadmium-resistant strain and citric acid [J]. J. Hazard. Mater., 2010, 181(1-3): 771-777.

[17] Xu J, Yin H, Li X. Protective effects of proline against cadmium toxicity in micropropagated hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L. [J]. Plant Cell Rep., 2008, 28(2): 325-333.

[18] Sun Y, Zhou Q, Wang L *et al*. The influence of different growth stages and dosage of edta on Cd uptake and accumulation in Cd-hyperaccumulator (*Solanum nigrum* L.) [J]. Bull. Environ. Contam. Toxicol., 2008, 82(3): 348-353.

[19] Bao T, Sun T, Sun L. Effect of cadmium hyperaccumulation on antioxidative defense and proline accumulation of *Solanum nigrum* L. [J]. Afr. J. Biotechnol., 2011, 10(37): 7198-7206.

[20] Sun R L, Zhou Q X, Sun F H *et al*. Antioxidative defense and proline/phytochelatin accumulation in a newly discovered Cd-hyperaccumulator, *Solanum nigrum* L[J]. Environ. Exp. Bot., 2007, 60(3): 468-476.

[21] Daneshmand F, Arvin M J, Kalantari K M. Effect of acetylsalicylic acid (aspirin) on salt and osmotic stress tolerance in *Solanum bulbocastanum* in vitro: Enzymatic antioxidants[J]. Am.-Eur. J. Agric. Environ. Sci., 2009, 6(1): 92-99.

[22] Srivastava M. Antioxidant responses of hyper-accumulator and sensitive fern species to arsenic[J]. J. Exp. Bot., 2005, 56(415): 1335-1342.

[23] Cao X. Antioxidative responses to arsenic in the arsenic-hyperaccumulator chinese brake fern (*Pteris vittata* L.) [J]. Environ. Poll., 2004, 128(3): 317-325.

[24] Zhang X, Xia H, Li Z *et al*. Potential of four forage grasses in remediation of Cd and Zn contaminated soils[J]. Bioresour. Technol., 2010, 101(6): 2063-2066.

[25] 秦建桥, 夏北成, 赵鹏, 等. 五节芒(*Miscanthus fioridulus*)不同种群对镉积累与转运的差异研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(1): 21-28.
Qin J Q, Xia B C, Zhao P *et al*. Accumulation and translocation of Cd in two *Miscanthus floridulus* populations[J]. J. Agro-Environ. Sci., 2011, 30(1): 21-28.

[26] 丁枫华, 刘术新, 罗丹, 等. 23种常见作物对镉毒害的敏感性差异[J]. 环境科学, 2011, 32(1): 277-283.
Ding F H, Liu S X, Luo D *et al*. Different sensitivity of 23 common crop species to cadmium toxicity[J]. Chin. J. Environ. Sci., 2011, 32(1): 277-283.

[27] 刘悦秋, 孙向阳, 王勇, 等. 遮荫对异株荨麻光合特性和荧光参数的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(8): 3457-3464.
Liu Y Q, Sun X Y, Wang Y *et al*. Effects of shades on the photosynthetic characteristics and chlorophyll fluorescence parameters of *Urtica dioica* [J]. Acta Ecol. Sin., 2007, 27(8): 3457-3464.

[28] Iori V, Pietrini F, Massacci A *et al*. Induction of metal binding compounds and antioxidative defence in callus cultures of two black poplar (*P. Nigra*) clones with different tolerance to cadmium [J]. Plant Cell Tissue Organ Cult., 2011, 108(1): 17-26.

[29] Jozefczak M, Remans T, Vangronsveld J *et al*. Glutathione is a key player in metal-induced oxidative stress defenses[J]. Int. J. Mol. Sci., 2012, 13(3): 3145-3175.