

镉对油菜幼苗生长及微量元素含量的影响

张树杰, 李 玲, 张春雷*, 李光明

(中国农业科学院油料作物研究所, 农业部油料作物生物学重点开放实验室, 农业部作物生理生态与栽培重点开放实验室, 武汉 430062)

摘 要:通过营养液培养,重点研究了不同浓度镉(Cd)胁迫下,中双9号冬油菜(*Brassica napus* L.)幼苗体内生理生化及微量元素(Fe、Mn、Zn、Cu)含量的变化特征,目的是进一步阐明Cd胁迫对油菜生长产生毒害的作用机理。结果发现,Cd胁迫显著抑制了油菜幼苗的生长,植株根系和地上部干重随着Cd浓度的升高而显著降低;油菜幼苗叶片中光合色素含量也随着Cd浓度的升高而显著降低;油菜幼苗根系和地上部4种微量元素浓度也随着Cd浓度的升高发生了显著变化;同时,油菜幼苗体内抗氧化酶(SOD、POD和CAT)活性随着Cd浓度的升高表现出先显著升高后显著降低的趋势。这些结果表明,外源Cd胁迫通过降低油菜幼苗光合色素含量、抑制植株光合作用,引起幼苗体内养分代谢紊乱,诱导产生氧化胁迫等抑制了油菜幼苗的生长。研究还发现,中双9号油菜幼苗地上部Cd浓度和Cd富集量显著低于根系,中双9号应该属于低吸收Cd的冬油菜品种。

关键词:镉;油菜;营养液培养;抗氧化酶;微量元素

中图分类号:X503.231 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)05-0836-07

Influences of Cadmium on the Growth and Micro-elements Contents of Oilseed Rape Seedlings

ZHANG Shu-jie, LI Ling, ZHANG Chun-lei*, LI Guang-ming

(Oil Crops Research Institute, CAAS, Key Laboratory of Oil Crop Biology of the Ministry of Agriculture, Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology of Ministry of Agriculture, Wuhan 430062, China)

Abstract: In order to elucidate the mechanisms of cadmium(Cd) stress on plant growth, a hydroponic experiment was conducted to investigate the influences of Cd on the growth, physiological properties and micro-elements contents of oilseed rape (*Brassica napus* L. cv. Zhongshuang 9) seedlings. Present study included 0, 0.1, 0.2, 0.5 and 1.0 mg·L⁻¹ Cd treatments (CK, C1, C2, C3 and C4, respectively) with four replicates. Results showed that, compared with CK, both roots and shoots dry weights of oilseed rape seedlings were significantly decreased with Cd concentrations increasing in hydroponic solution. The photosynthetic pigments contents, compared with CK, were also significantly decreased with Cd concentration increasing. Except the Cu concentrations in roots, the concentrations of micro-elements in both roots and shoots of plants were significantly decreased by Cd addition in hydroponic solution, compared with CK. While, the antioxidant enzymes(SOD, POD and CAT)activities were increased at the lower Cd concentrations and then decreased at the higher Cd concentrations in hydroponic solution. These results indicated that, exogenous Cd stress significantly decreased the growth of oilseed rape seedlings through inducing the photosynthetic pigments degradation, nutrient elements metabolism disturbance and oxidative stress on plants. Meanwhile, the Cd concentrations and accumulations in the shoots of oilseed rape seedlings were significantly lower than those of plant roots, which indicated that Zhongshuang 9 might be a lower capacity cultivar for Cd uptake.

Keywords: cadmium; *Brassica napus*; hydroponics; antipoxidative enzyme; micro-element

镉(Cd)是一种稀有分散元素,在地壳中含量较少,平均为0.1~0.2 mg·kg⁻¹[1]。但是,由于采矿冶炼和

农业污水灌溉、农药化肥施用,导致大量的Cd进入了土壤,使土壤Cd污染日益严重[2]。有研究表明,早在20世纪90年代初,中国Cd污染耕地已达1.3×10⁴ hm²,而且还有继续显著增加的趋势[3]。土壤中过量的Cd迁移性很强,极易被植物吸收而对植物产生严重的生理毒害作用,引起植物生长的抑制甚至死亡[2,4-5]。一般认为,Cd对植物的生理毒害主要表现在以下几

收稿日期:2010-11-16

基金项目:科技部科技支撑计划(2009BADA8B01,2006BAD21B03)

作者简介:张树杰(1972—),男,陕西甘泉人,博士,助理研究员,主要从事作物栽培生理研究。E-mail:sjzhang1972@126.com

* 通讯作者:张春雷 E-mail:clzhang@vip.sina.com

个方面:一是破坏叶绿体结构、降低叶绿素含量,使植物光合作用受阻^[6-7];二是抑制气孔开放,影响水分代谢^[8];三是诱使植物体内氮和糖的代谢紊乱^[9];四是促使细胞产生活性氧,引起膜脂过氧化^[10]等。

油菜是我国第一大油料作物,也是重要的经济作物。2000年以来,我国油菜种植面积和油菜籽总产分别达到700万 hm^2 和1100万t,成为继水稻、小麦、玉米和大豆之后的第五大农作物^[11]。因此,明确Cd对油菜生长的影响及其机理,探讨缓解Cd胁迫的途径具有十分重要的意义。以往研究Cd胁迫对油菜生长影响的报道虽然很多,但其中多数是以Cd胁迫对油菜生长的直接影响,以及油菜对Cd的吸收、富集等问题作为主要的研究内容^[2-4],对Cd胁迫下油菜吸收和利用微量元素的研究却相对较少。本实验采用营养液培养的方法,重点研究不同浓度Cd胁迫下,中双9号冬油菜(*Brassica napus* L.)幼苗生理生化及微量元素(Fe、Mn、Zn、Cu)含量变化特征,力图进一步阐明Cd胁迫对油菜生长产生危害的作用机理,为探讨缓解Cd胁迫途径提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 供试材料

供试油菜为长江流域广泛种植的双低冬油菜品种中双9号(*Brassica napus* L.),由中国农业科学院油料作物研究所提供。Cd源为分析纯氯化镉($\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$)。

1.2 实验设计

实验于2009年10月在中国农业科学院油料作物研究所网室内进行。将经过挑选的油菜种子用1%的次氯酸钠溶液消毒10 min,去离子水冲洗干净,播种于沙池中。培养箱(长、宽、高分别为30、20、10 cm)容积6.0 L,内装营养液5.5 L,待幼苗生长到3 cm高时将生长一致的良好壮苗移植到营养液中,每箱2株。第1~6 d为1/4营养液,第7~12 d为1/2营养液,第13 d后为全营养液,每3 d更换1次营养液。营养液化学组成成分如下^[12]: KNO_3 2.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ 1.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 1.0 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, MgSO_4 0.5 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, KH_2PO_4 0.25 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, H_3BO_3 12.5 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, MnCl_2 2.25 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, Fe-EDTA 10 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, ZnSO_4 0.5 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$ 0.025 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, CuSO_4 0.075 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。待幼苗生长至5片真叶时进行Cd胁迫处理,共设5个处理:CK(空白对照)、C1(0.1 $\text{mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$)、C2(0.2 $\text{mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$)、C3(0.5 $\text{mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$)和C4(1.0 mg

$\text{Cd} \cdot \text{L}^{-1}$),其他成分同前。每个处理重复4次,每日更换1次Cd和营养液。实验期间每日定时用通气泵通气,用1.0 $\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HNO_3 或KOH调节营养液pH值至 5.8 ± 0.1 。

1.3 采样

在Cd处理7 d后开始采样。首先用去离子水仔细冲洗植株多次,以去除表面附着的Cd及其他离子。每个培养箱中的1株植物作为鲜样,液氮冷冻后在-20℃冰箱中保存,用于生理生化指标的测定;另1株植物分为根系和地上两部分,105℃杀青0.5 h,80℃烘干至恒重后称干重,干燥保存用于Cd及微量元素含量的测定。

1.4 光合色素含量测定

光合色素含量的测定参照Zhang等的方法进行^[6]。取鲜叶0.2 g放置于研钵中,加入少量碳酸钙粉末及2~3 mL 95%乙醇研磨匀浆。然后将匀浆液过滤到25 mL棕色容量瓶中,冲洗研钵和滤纸多次,最后用95%乙醇定容。叶绿素提取液在分光光度计上分别测定645、649 nm和460 nm波长吸光值,计算色素含量。为了防止叶绿素见光分解,所有过程均在4℃、暗光条件下进行。

1.5 抗氧化酶活性测定

SOD活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法,以抑制光化还原的50%为一个酶活性单位;POD活性采用愈创木酚法,以每分钟内A470变化0.01为一个酶活性单位;CAT采用过氧化氢法,以每分钟内A240变化0.01为一个酶活性单位^[6]。

1.6 镉及微量元素含量测定

将植株干样用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (V/V, 4:1)消解后用ICP-OES(Optima 7000 DV, Pekin Elmer)测定植株体内Cd及4种微量元素(Fe、Mn、Zn、Cu)含量^[6,13]。

1.7 统计分析

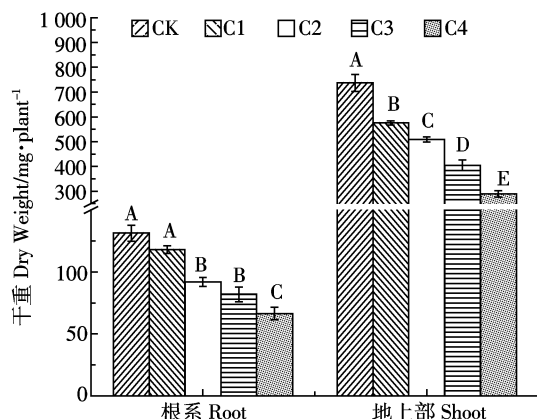
所有数据均为4个重复的平均值 $\pm$ 标准误,用SPSS16.0软件进行ANOVA统计分析,Duncan's多重比较和t检验,差异显著性定义为 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 。

2 结果与分析

2.1 对生物量的影响

从图1可以看出,随着营养液中Cd浓度的增加,油菜幼苗根系($F=27.828, P < 0.000$)和地上部($F=72.362, P < 0.000$)干重显著降低。与空白对照(CK)相比,C1、C2、C3、C4处理分别使中双9号冬油菜幼苗根系和地上部干重降低10.1%、29.9%、37.5%、49.4%

和21.9%、30.1%、45.1%、60.8%。统计分析结果显示,外源Cd浓度与植株根系($R^2=0.722, F=46.802, P<0.000$)和地上部($R^2=0.819, F=81.718, P<0.000$)生物量之间存在着极显著线性相关关系。这个结果表明,Cd胁迫对冬油菜幼苗生长有明显的抑制作用,而且对地上部的抑制作用显著大于对根系的抑制作用。



注:图中误差线代表标准误($n=4$),不同大写字母表示处理间差异显著性(Duncan 检验, $P<0.01$)。下同。

Note: Error bar represent standard error ($n=4$). Different capital letter denoted statistically difference between treatment groups according to Duncan's test ($P<0.01$). The same below.

图1 油菜幼苗植株干重

Figure 1 Dry weights of winter oilseed rape seedlings

2.2 对植株体内Cd浓度及富集量的影响

图2为中双9号冬油菜幼苗根系及地上部Cd浓度(a)和Cd富集量(b)。可以看出,随着外源Cd浓度的增加,中双9号冬油菜幼苗根系中Cd浓度($F=118.611, P<0.000$)及Cd富集量($F=60.599, P<0.000$)显著增加,而地上部Cd浓度($F=66.111, P<0.000$)及Cd富集量($F=31.263, P<0.000$)则表现为先显著升高然后显著降低的趋势,两者的峰值均出现在C3处理($0.5 \text{ mg Cd} \cdot \text{L}^{-1}$)。同时,无论外源Cd浓度高或低,油菜幼苗地上部Cd浓度及Cd富集量均显著低于根系(图2)。

2.3 光合色素含量

总的来说,添加Cd后,中双9号冬油菜幼苗叶片中光合色素含量显著降低(表1)。与对照(CK)相比,叶绿素a(Chl a, $F=17.885, P<0.000$)、叶绿素b(Chl b, $F=5.568, P=0.013$)含量由于Cd的添加显著降低,因而叶绿素总量(Chl a+Chl b)含量也因Cd的添加而显著降低($F=23.327, P<0.000$)。同时,随着Cd浓度的增加,叶绿素a含量降低的幅度要远大于叶绿素

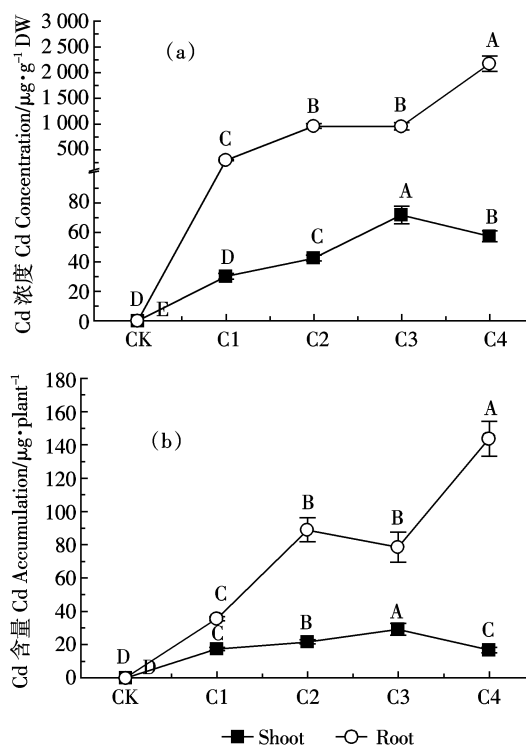


图2 不同Cd胁迫下油菜幼苗体内Cd浓度(a)和含量(b)

Figure 2 Cadmium concentrations(a) and accumulations(b) in winter oilseed rape seedlings

b。类胡萝卜素含量也呈现出相同的趋势,与对照相比,添加Cd显著降低了中双9号冬油菜幼苗叶片中类胡萝卜素的含量($F=16.074, P<0.000$),但其降低幅度远远小于叶绿素a和叶绿素总量降低的幅度。

2.4 对微量元素浓度的影响

与对照相比,在Cd胁迫下,中双9号冬油菜幼苗体内4种微量金属元素(Fe、Mn、Zn和Cu)浓度有显著差异,虽然这种差异因元素种类和植株部位的不同而变化很大,但却存在一个共同特点,那就是根系中这些元素的浓度显著高于地上部(图3)。

在植株根系中(图3a),与对照相比,随着外源Cd浓度的升高,Fe浓度表现为先显著升高后显著降低的趋势($F=14.198, P<0.000$),在C2处理时达到最高,在C3和C4处理时又显著低于CK;Mn浓度表现为先显著降低后显著升高($F=17.672, P<0.000$),在C3时达到最低值,在C4处理时与CK接近;Zn浓度总体上一直表现为显著降低的趋势($F=73.359, P<0.000$),虽然在C2处理时较C1处理显著升高,但仍然显著低于CK;Cu浓度在所有添加Cd处理中均显著高于对照CK($F=44.597, P<0.000$),其中在C2处理时最高。

表1 油菜幼苗光合色素($\pm$ SE)含量Table 1 Photosynthetic pigments contents($\pm$ SE) of winter oilseed rape seedlings

处理 Treatment	光合色素含量 Photosynthetic Pigments content($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ FW)			
	叶绿素 a Chla	叶绿素 b Chlb	叶绿素总量 Chla + Chlb	类胡萝卜素 Carotenoid
CK	0.81 $\pm$ 0.02 A	0.36 $\pm$ 0.01 a	1.17 $\pm$ 0.03 A	0.17 $\pm$ 0.01 A
C1	0.66 $\pm$ 0.07 B	0.28 $\pm$ 0.01 b	0.94 $\pm$ 0.08 B	0.13 $\pm$ 0.01 B
C2	0.43 $\pm$ 0.02 C	0.22 $\pm$ 0.02 b	0.65 $\pm$ 0.03 C	0.08 $\pm$ 0.01 C
C3	0.44 $\pm$ 0.02 C	0.28 $\pm$ 0.03 b	0.72 $\pm$ 0.02 C	0.13 $\pm$ 0.01 B
C4	0.51 $\pm$ 0.04 C	0.28 $\pm$ 0.03 b	0.79 $\pm$ 0.02 C	0.12 $\pm$ 0.01 B

注:同一列中,不同字母代表处理间差异显著性(Duncan 检验,大写字母代表 $P<0.01$,小写字母代表 $P<0.05$);SE,Chla、Chlb 和 FW 分别表示标准误($n=4$)、叶绿素 a、叶绿素 b 和鲜重。

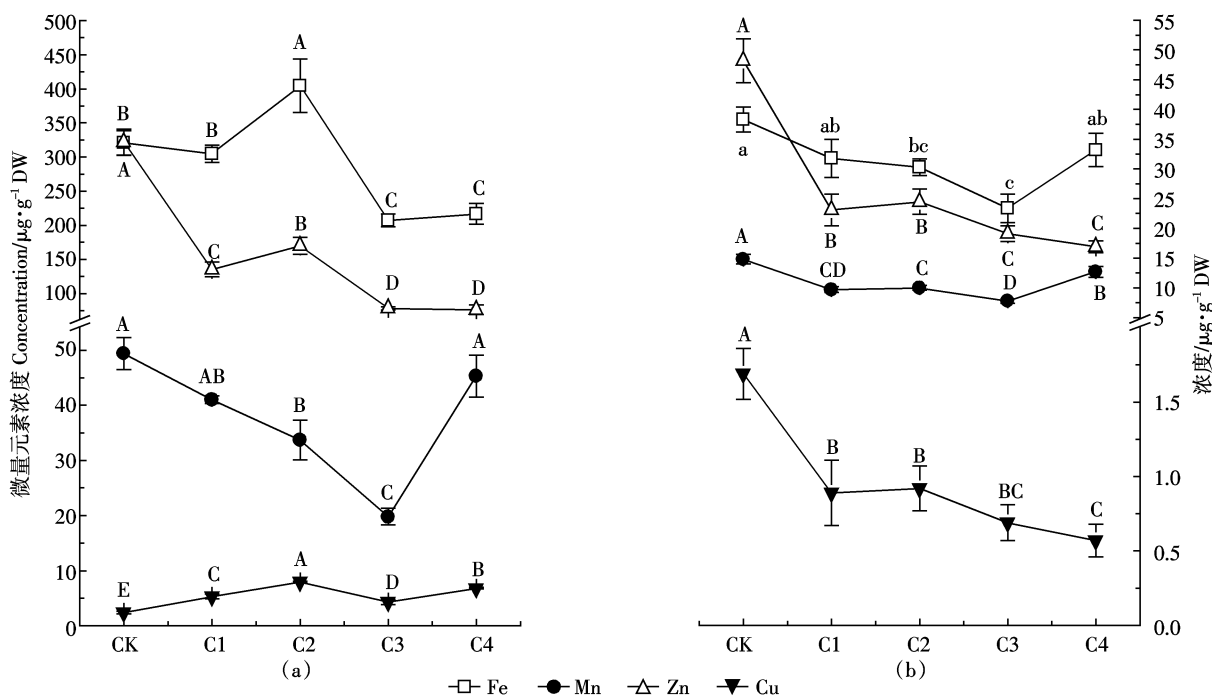
Note:In a column, means with different letter denoted statistically difference between treatment groups according to Duncan's test (capital letter for $P<0.01$ and lowercase letter for $P<0.05$, respectively). SE, Chla and Chlb denoted standard error ($n=4$), chlorophyll a and chlorophyll b, respectively.

在植株地上部(图 3b),与对照相比,随着外源 Cd 浓度的升高,Fe ($F=4.875, P=0.011$) 和 Mn ($F=17.965, P<0.000$) 浓度均表现为先显著降低而后显著升高的趋势,Fe 和 Mn 浓度最低值均出现在 C3 处理,在 C4 处理时 Fe 和 Mn 浓度虽较 C3 处理时显著

升高,但仍然显著低于 CK;Zn ($F=28.228, P<0.000$) 和 Cu ($F=30.262, P<0.000$) 浓度则一直表现为显著降低的趋势。

2.5 对抗氧化酶活性的影响

由图 4 可以看出,冬油菜中双 9 号幼苗体内抗氧化酶活性在 Cd 胁迫下变化较大。在 Cd 胁迫下,油菜幼苗体内过氧化物酶(POD)活性显著升高,且根系 POD 活性远远高于地上部。除 C5 处理外,与对照(CK)相比,根系 ($F=51.052, P<0.000$) 和地上部 ($F=16.654, P<0.000$) POD 活性均随 Cd 浓度的增加显著升高。这说明低浓度 Cd 胁迫可以提高了冬油菜幼苗体内 POD 活性,但当 Cd 浓度超过一定的阈值($1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)则降低了 POD 活性。过氧化氢酶(CAT)活性与 POD 类似,即在低浓度 Cd 胁迫下,油菜幼苗根系 ($F=18.022, P<0.000$) 和地上部 ($F=13.420, P<0.000$) CAT 活性显著高于对照。但当 Cd 浓度超过 $1.0 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, CAT 活性开始显著下降。超氧化物歧化酶(SOD)活性变化与 POD 和 CAT 不太一致。在油菜幼苗根系中,除 C1 处理外, SOD 活性显著 ($F=38.514, P<0.000$) 高于对照;而在植株地上部, SOD 活性则显著 ($F=7.040, P<0.000$) 低于对照。



注:误差线代表标准误($n=4$)。不同字母表示处理间差异显著性(Duncan 检验,大写字母代表 $P<0.01$,小写字母代表 $P<0.05$)。

Note: Error bar represent standard error ($n=4$). Different letter denoted statistically difference between treatment groups according to Duncan's test (capital letter for $P<0.01$ and lowercase letter for $P<0.05$, respectively).

图3 油菜幼苗根系(a)和地上部(b)Fe、Mn、Zn、Cu 浓度

Figure 3 Fe, Mn, Zn and Cu concentrations in winter oilseed rape seedlings roots(a) and shoots(b)

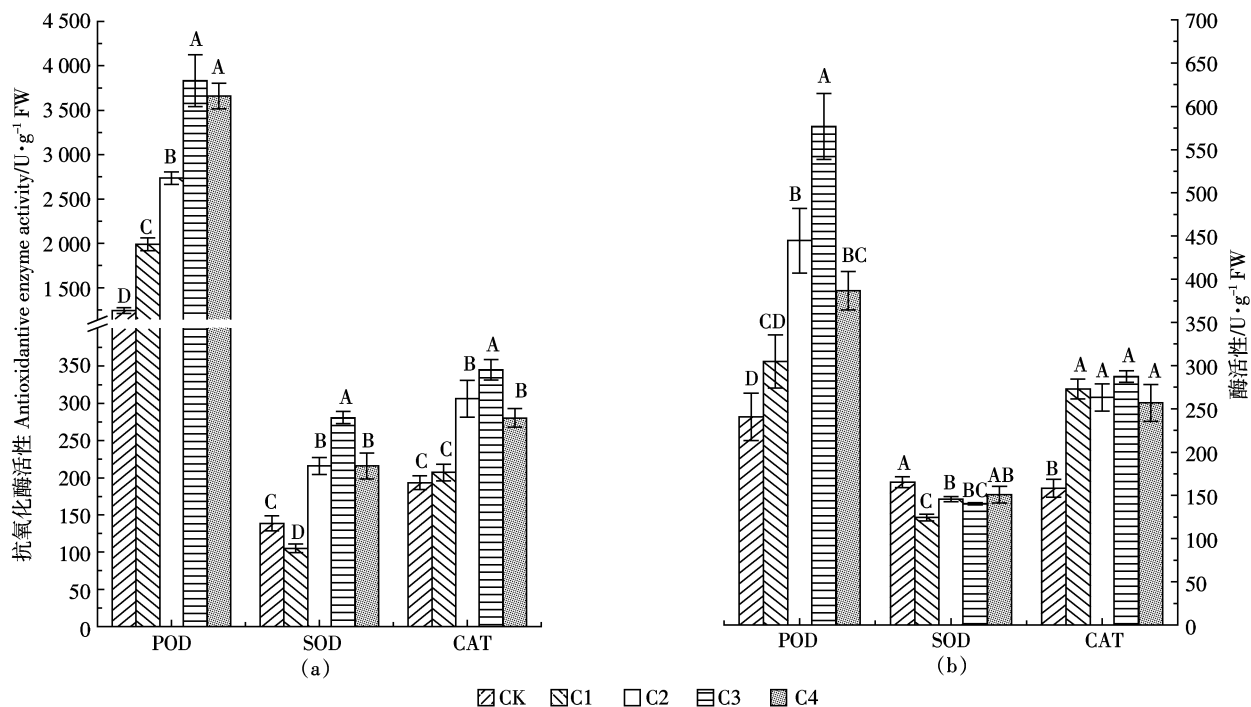


图4 油菜幼苗根系(a)和叶片(b)抗氧化酶活性

Figure 4 Antioxidative enzymes activity of plant roots(a) and leaves(b)

3 讨论

本研究结果显示, Cd 胁迫下, 中双 9 号冬油菜幼苗生长受到明显的抑制, 随着外源 Cd 浓度的升高, 植株根系和地上部干重显著降低(图 1)。这与前人许多研究结果一致^[2-5, 14], 因而又一次证明了 Cd 胁迫对植物生长的毒害作用。在对 Cd 的吸收和富集方面, 中双 9 号冬油菜幼苗地上部 Cd 浓度及 Cd 富集量显著低于根系, 并且地上部和根系 Cd 浓度及 Cd 富集量之间的差值也随着外源 Cd 浓度的升高而显著增加(图 2)。这个结果表明, 中双 9 号冬油菜幼苗从根系向地上部转运 Cd 的能力较低。王激清等通过比较多个品种冬油菜对 Cd 的吸收和运输能力后认为, 中双 4 号和中双 5 号属于低吸收 Cd 油菜品种^[14]。因此, 中双 9 号也应该属于低吸收 Cd 的冬油菜品种。

Myśliwa-Kurdiel 和 Strzałka 报道, 叶绿素含量降低是植物受 Cd 毒害的最先症状, 他们认为抑制叶绿素合成是 Cd 抑制植物光合作用的第一步^[15]。光合色素是绿色植物光合作用系统中的核心成分, 有研究认为, 光合色素含量水平的变化最直接的结果就是改变植物的光合作用^[16]。因此, 降低中双 9 号冬油菜幼苗叶片中光合色素含量, 从而抑制油菜幼苗的光合作用, 可能是 Cd 胁迫引起生长受阻的主要原因之一。

许多研究发现, Cd 胁迫下, 油菜叶片光合色素含量显著降低^[2, 17]。例如: 江海东等通过营养液培养研究发现, 低浓度 Cd 对叶绿素 a 和叶绿素 b 的伤害程度相近, 但随着 Cd 浓度的增加, Cd 对叶绿素 a 的抑制作用大于对叶绿素 b 的抑制作用^[2]; 王兴明等通过盆栽实验发现, 在 Cd 浓度为 0~5 mg·kg⁻¹ 范围内, 叶绿素 a、b 含量显著高于对照, 而在 Cd 浓度为 10~40 mg·kg⁻¹ 时, 叶绿素 a、b 含量则显著低于对照, Cd 对光合色素的影响顺序为叶绿素 b>叶绿素 a>叶绿素总量>类胡萝卜素^[17]。这些研究结果与本实验的结果并不完全一致。本实验显示, 叶绿素 a、叶绿素 b、叶绿素总量及类胡萝卜素含量均随着 Cd 浓度的增加显著降低, 而且叶绿素 a 和叶绿素总量受 Cd 胁迫的影响要大于叶绿素 b 和类胡萝卜素(表 1)。上述研究结果的差异, 可能是由于实验所选用的油菜品种及实验方法不同所致。

许多研究发现, Cd 胁迫能够显著影响植物对必需元素(包括 Fe、Mn、Zn 和 Cu)的吸收及体内运输, 并且大多数研究结果都认为 Cd 胁迫降低了这些必需元素在植物体内的浓度和含量^[6, 10]。例如: Dong 等通过营养液培养试验发现, 10 μmol·L⁻¹ 的 Cd 显著降低了番茄(*Lycopersicon esculentum*, 合作 903)幼苗根系中 Fe、Mn、Zn 和 Cu 的浓度, 而仅使叶片中 Fe、Mn 和 Zn 的浓

度轻微降低^[10];Zhang 等研究也发现,Cd 胁迫使番茄幼苗体内 Fe、Mn、Zn、Cu 等微量元素的含量发生显著改变,主要表现为降低了这些元素在番茄幼苗体内的浓度,而通过在营养液中添加蚯蚓粘液或者氨基酸溶液可以缓解这种扰乱作用^[9]。本实验也得出类似的结果,添加 Cd 后显著影响了中双 9 号油菜幼苗体内微量元素 Fe、Mn、Zn、Cu 的浓度和含量(图 3)。因此,许多研究者提出,引起植物体内微量元素代谢失调是 Cd 抑制植物生长的另一主要原因^[6,10,18-19]。

目前普遍认为,Cd 通过在植物体内诱导产生活性氧(ROS)对植物产生氧化胁迫,这些活性氧包括 O_2^- 、 $OH\cdot$ 和 H_2O_2 等^[20]。一方面,活性氧可以引起植物油脂过氧化、膜损伤、酶失活,甚至植物死亡^[6,21];另一方面,植物体内具有抗氧化系统可以防止植物遭受氧化损伤。抗氧化系统包括酶促系统和非酶促系统两部分^[6,17,21]。在抗氧化酶促系统中,超氧化物歧化酶(SOD)作为植物抗氧化系统的第一道防线,具有清除细胞中过多超氧根阴离子的作用,防止细胞损坏,它能够催化超氧根阴离子转化为 H_2O_2 。过氧化物酶(POD)参与植物体内木质素和乙烯的生物合成,能够将 H_2O_2 转化为 H_2O ,从而在逆境条件下能保持植物细胞膜系统的完整性。过氧化氢酶(CAT)可以将 H_2O_2 转化为 H_2O 和分子氧,能有效清除体内的活性氧,使细胞内 H_2O_2 维持到正常水平^[6,21-23]。本实验发现,在外源 Cd 浓度低于 $0.5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,中双 9 号油菜幼苗体内抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性显著升高,但是当 Cd 浓度超过 $1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,SOD、POD 和 CAT 活性则显著降低(图 4)。这个结果表明,在低浓度 Cd 胁迫下,油菜可以通过提高自身抗氧化酶系统的活性来缓解 Cd 的生理毒害;但是当 Cd 浓度超过一定的阈值时,Cd 引起的氧化胁迫超过了油菜所能承受的临界值,使其抗氧化酶系统失去了对植物的保护作用^[2,17,22-23],从而使植物的生长受阻。

4 结论

(1) 镉胁迫抑制了中双 9 号冬油菜幼苗生长,显著降低植株根系和地上部干重。而且随着外源 Cd 浓度的升高,这种毒害作用显著增强。

(2) 降低光合色素含量、扰乱植株对必需营养元素的吸收和运输可能是 Cd 毒害的主要作用机理之一。

(3) 低浓度 Cd 胁迫下,中双 9 号冬油菜幼苗可以通过提高体内抗氧化酶(SOD、POD 和 CAT)活性来缓解 Cd 毒害引起的氧化胁迫;但是当 Cd 浓度超过

$1.0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,抗氧化酶系统的缓解作用就会被抑制。

(4) 中双 9 号应该属于低吸收 Cd 的冬油菜品种。

参考文献:

- [1] 顾继光,周启星. 镉污染土壤的治理及植物修复[J]. 生态科学, 2002, 21(4):352-356.
GU Ji-guang, ZHOU Qi-xing. Cleaning up through phytoremediation: A review of Cd contaminated soils[J]. *Ecologic Science*, 2002, 21(4): 352-356.
- [2] 江海东,周琴,李娜,等. Cd 对油菜幼苗生长发育及生理特性的影响[J]. 中国油料作物学报, 2006, 28(1):39-43.
JIANG Hai-dong, ZHOU Qin, LI Na, et al. Effect of Cd on the growth and physiological characteristics of rape seedlings[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2006, 28(1):39-43.
- [3] 纪雄辉,梁永超,鲁艳红,等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3930-3939.
JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3930-3939.
- [4] 张佩,周琴,孙小芳,等. 抗坏血酸对镉胁迫下油菜幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(6):2362-2366.
ZHANG Pei, ZHOU Qin, SUN Xiao-fang, et al. The alleviative effects of AsA on the growth of rape seedlings under Cd stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(6):2362-2366.
- [5] 刘鑫,张世熔,朱荣,等. 镉铜胁迫下紫苏的生长响应和富集特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(11):2264-2269.
LIU Xin, ZHANG Shi-rong, ZHU Rong, et al. Effect of cadmium and copper stress on the growth response and accumulation characteristics of *Perilla frutescens* L. Britt[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(11):2264-2269.
- [6] Zhang S J, Hu F, Li H X, et al. Influence of earthworm mucus and amino acids on tomato seedling growth and cadmium accumulation[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157:2737-2742.
- [7] Wu F B, Zhang G P, Dominy P. Four barley genotypes respond differently to cadmium: Lipid peroxidation and activities of antioxidant capacity[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50:67-77.
- [8] 郭智,王涛,奥岩松. 镉对龙葵幼苗生长和生理指标的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(4):755-760.
GUO Zhi, WANG Tao, AO Yan-song. Physiological responses of *Solanum nigrum* L. seedlings to cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(4):755-760.
- [9] Verma S, Dubey R S. Effect of cadmium on soluble sugars and enzymes of their metabolism in rice[J]. *Biological Plant*, 2001, 44:117-123.
- [10] Dong J, Wu F B, Zhang G P. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*) [J]. *Chemosphere*, 2006, 64:1659-1666.
- [11] 王汉中. 我国油菜产需形势分析继产业发展对策[J]. 中国油料作物学报, 2007, 29(1):101-105.
WANG Han-zhong. Strategy for rapeseed industry development based

- on the analysis of rapeseed production and demand in China[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2007, 29(1):101-105.
- [12] Blake K M M A, Harrison K R, Hawkesford M J, et al. Distribution of sulfur within oilseed rape leaves in response to sulfur deficiency during vegetative growth[J]. *Plant Physiology*, 1998, 118:1337-1344.
- [13] 马淑敏, 孙振钧, 王冲. 蚯蚓-甜高粱复合系统对土壤镉污染的修复作用及机理初探[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):133-138.
- MA Shu-min, SUN Zhen-jun, WANG Chong. Remediation of Cd contaminated soil and its mechanism by earthworm-sweet broomcorn system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):133-138.
- [14] 王激清, 张宝悦, 苏德纯. 修复镉污染的油菜品种的筛选及吸收累积特征研究——高积累镉油菜品种的筛选(I)[J]. 河北北方学院学报(自然科学版), 2005, 21(1):58-61.
- WANG Ji-qing, ZHANG Bao-yue, SU De-chun. The study on selection of rape species in phytoremediated cadmium contaminated soil and their cadmium absorbing characters(I): Selection of oilseed rape species with higher cadmium accumulation[J]. *Journal of Hebei North University(Natural Science Edition)*, 2005, 21(1):58-61.
- [15] Mysliwa-Kurdzifl B, Strzałka K. Influence of metals on biosynthesis of photosynthetic pigments[M]//M N V Prasad, K Strzałka (Eds.), *Physiology and Biochemistry of Metal Toxicity and Tolerance in Plants*. Kluwer Academic Publishers. AH Dordrecht, Netherlands, 2002:201-227.
- [16] Mishra S, Agrawal S B. Interactive effects between supplemental ultra-violet-B radiation and heavy metals on the growth and biochemical characteristics of *Spinacia oleracea* L. Braz[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2006, 38:307-314.
- [17] 王兴明, 徒俊芳, 李晶, 等. 镉处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1):102-106.
- WANG Xing-ming, TU Jun-fang, LI Jing, et al. Effects of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1):102-106.
- [18] Toshihiro Y, Hirofuka H, Yoshiyuki M, et al. Cadmium inducible Fe deficiency responses observed from macro and molecular views in tobacco plants[J]. *Plant Cell Reports*, 2006, 25:365-373.
- [19] Wang M, Zou J H, Duan X H, et al. Cadmium accumulation and its effects on metal uptake in maize(*Zea mays* L.)[J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98:82-88.
- [20] Olmos E, Martinez-Solano J R, Piqueras A, et al. Early steps in the oxidative burst induced by cadmium in cultured tobaccos cells (BY-2 line)[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2003, 54:291-301.
- [21] Qiu R L, Zhao X, Tang Y T, et al. Antioxidative response to Cd in a newly discovered cadmium hyperaccumulator, *Arabis paniculata* F[J]. *Chemosphere*, 2008, 74:6-12.
- [22] 刘丽莉, 冯涛, 向言词, 等. 外源钙对镉胁迫下芥菜型油菜幼苗生长和生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5):978-983.
- LIU Li-li, FENG Tao, XIANG Yan-ci, et al. Effect of exogenous calcium on seedling growth and physiological characteristics of *Brassica juncea* under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5):978-983.
- [23] Guo T R, Zhang G P, Zhang Y H. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium[J]. *Colloids and Surfaces B-Biointerfaces*, 2007, 57:182-188.