

印度芥菜生理生化特性及其根区土壤中微生物对 Cd 胁迫的响应

杨卓¹, 陈婧¹, 李博文²

(1. 中国环境管理干部学院环境科学系, 河北 秦皇岛 066004 2. 河北农业大学, 河北 保定 071000)

摘要 通过盆栽试验研究了印度芥菜对土壤 Cd 污染的耐性及其生理生化特性响应。结果表明, 印度芥菜对 Cd 胁迫表现了较强的耐性, 在 Cd 添加量为 0~200 mg·kg⁻¹ 的情况下, 印度芥菜能够顺利发芽、生长, 其生物量出现了先增后降的“抛物线型”变化规律, Cd 主要影响其生殖生长, 大量的 Cd 使印度芥菜延迟进入生育期。植株体内 Cd 浓度随土壤 Cd 浓度增加而升高, 地上部可达 7.824~102.672 mg·kg⁻¹, 地下部可达 0.374~191.910 mg·kg⁻¹。地上部富集系数呈逐渐降低的趋势, 而地下部富集系数呈逐渐升高的趋势。转移系数为 20.920~0.535, 呈逐渐降低趋势。随着土壤 Cd 胁迫浓度的增加, 印度芥菜 3 种酶活性均呈先增后降的“抛物线型”变化趋势, 并且出现抗性酶活性高峰所对应的土壤 Cd 浓度相同, 均为 120 mg·kg⁻¹, 在 Cd 高浓度水平下酶活性普遍受到抑制, 在最高浓度处理时的酶活性均明显低于对照。根区土壤中微生物数量为细菌>放线菌>霉菌, 随着 Cd 添加量的增加, 土体内微生物的数量也增加, 但当 Cd 添加量>160 mg·kg⁻¹ 时, 微生物数量下降。

关键词 印度芥菜; 植物修复; 胁迫; 重金属; 生理生化指标; 微生物

中图分类号: Q945.78 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)12-2428-06

Effects of Cd Contamination on Number of Microbes, Physiological and Biochemical Characteristics of *Brassica juncea*

YANG Zhuo¹, CHEN Jing¹, LI Bo-wen²

(1. Environment Management College of China, Qinhuangdao 066004, China; 2. Agricultural University of Hebei, Baoding 071001, China)

Abstract Series of pot experiments were performed to determine the effects of cadmium in soil on chlorophyll content, CAT, POD and SOD activities in *Brassica juncea*. The results indicated that tolerance of *Brassica juncea* for Cd was stronger. It was able to burgeon and grow all right in the soil added Cd from 0 to 200 mg·kg⁻¹. The biomass of *Brassica juncea* taken on principle of parabola changes with Cd concentration in the soil. Nevertheless, Cd influenced the growth stages of *Brassica juncea* to postpone its procreating growth. Cd concentration of *Brassica juncea* gone to increase with the content of Cd in the soil. The contents of Cd was 7.824~102.672 mg·kg⁻¹ in the aboveground parts and 0.374~191.910 mg·kg⁻¹ in the underground parts. The bioaccumulation factor of the ground part was falling and underground part was rising during the Cd is rising. Meanwhile, the translocation factor was 20.920~0.535. It taken on gradually falling trend. The POD, CAT and SOD activities increased at lower Cd concentrations, but decreased at higher Cd concentrations. Added Cd in the soil was 120 mg·kg⁻¹, the POD, CAT and SOD activities was highest. The number of microorganisms was Bacteria>actinomycetes>mould. The number of microbes was increasing during the Cd added in the soil. When the added Cd was more than 160 mg·kg⁻¹, the number of microbes was going down.

Keywords *Brassica juncea*; phytoremediation; stress; heavy metal; physiological and biochemical index; microorganism

土壤重金属(Cd、Pb、Zn 等)污染是影响我国农业持续发展和生态环境质量的一个重要因素。重金属污

染及防治是当前环境问题研究中的一个重要课题, 镉(Cd)是重金属污染物中最危险的元素之一。印度芥菜(*Brassica juncea* L.)以其生活史短、地上部生物量大, 且能同时积累多种重金属元素(如 Cd、Cu、Se、Pb、Zn 等)而成为治理污染土壤的首选植物材料^[1]。植物细胞在长期进化过程中形成了两套清除 ROS 系统, 即由 SOD、POD、APX 和 CAT 等抗氧化酶组成的

收稿日期: 2010-12-09

基金项目: 河北省高等学校科学技术研究青年基金项目: 重金属污染土壤超富集植物的筛选及其对 Cd 胁迫的响应(2010167)

作者简介: 杨卓(1980—), 女, 河北秦皇岛人, 博士, 讲师, 从事土壤环境质量评价与修复等方面的研究。

E-mail: yangzhuo315566@126.com

酶系统以及谷胱甘肽(GSH)和抗坏血酸等抗氧化剂组成的非酶系统^[2]。Cd会影响植物体内多种酶,主要是由于Cd对细胞膜的伤害,破坏了细胞内酶及代谢作用的原有区域性,Cd还可能直接取代某些酶活性中心的微量元素或与酶中半胱氨酸残基结合,从而使其结构遭到破坏,导致酶的活性变化。近几年的研究表明,Cd对固氮酶、根系脱氢酶、淀粉酶^[3]、脱氧核酸酶、核糖核酸酶^[4]、硝酸还原酶、蛋白酶、多酚氧化酶、抗坏血酸过氧化物酶、乳酸脱氢酶^[5]等均有抑制作用。这表明Cd对氮代谢、呼吸作用、碳水化合物代谢和核酸代谢等均有毒害作用^[6]。土壤微生物代谢能产生多种低分子的有机酸,如甲酸、乙酸、柠檬酸、苹果酸等。低分子有机酸在土壤环境中可参与成土作用促进矿物溶解,改变根际土壤理化性状,缓解植物根系缺氧症状,促进植物对养分的吸收。同时,它能促进土壤中重金属的溶解,有助于超富集植物对重金属的吸收和清除。

本试验研究了在不同浓度镉胁迫下,印度芥菜对Cd的耐性及在生理方面的变化,明确了印度芥菜对重金属的吸收富集特点和印度芥菜在重金属毒害下其体内抗氧化保护酶活性的变化,并分析了Cd胁迫对根区微生物数量的影响,为进一步研究微生物-植物联合修复土壤重金属污染提供理论储备和科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物:试验所用印度芥菜为 *Brassica juncea* 的 Wild Garden Pangent Mix 品种。种子来自于美国俄勒冈州名为“Wild Garden Seed”的农场。

供试土壤:采自河北农业大学西校区标本园 0~40 cm 的潮褐土,理化性质特征见表 1。

供试底泥:取自安新县北际头乡,保定纳污河府河末梢入淀口处。试验所取为 0~20 cm 底泥,呈深黑色淤泥状,上部为稀浆状,下部呈流塑态,内有大量的淡水贝壳、软体动物,附近有大规模养鸭场,底泥有明显臭味。该层为近二三十年来人类活动的产物,沉积

年代新、沉积速率快,是该区域污染内源的主要蓄积库。供试底泥主要理化性质见表 1。底泥中有效态 Cd、Pb、Zn 含量分别为 1.70、16.80、61.50 mg·kg⁻¹。

1.2 实验方案与布置

盆栽试验在河北农业大学东校区日光温室中进行。所用塑料小盆钵的上缘直径 10 cm,底面直径 9 cm,高 14 cm。供试土壤、底泥风干后过 3 mm 筛,每盆装土 1 000 g(以烘干土计),供试土壤和供试底泥各为 500 g。重金属 Cd 以 Cd(HAc)₂·2H₂O 固体粉末形式加入土中,同时每盆加入 0.2 g 尿素和 0.4 g 二氨作肥底(均采用分析纯试剂),与土壤一并混合均匀装盆。加入蒸馏水使含水量为田间持水量的 60%,保持 10 d 后播种,生长 1 周后间苗,每盆保留 10 株。

重金属添加量分别为 0、40、80、120、160、200 mg·kg⁻¹ 共 6 个处理,每个处理重复 6 次,处理编号为 1 至 6。

76 d 收获后取样分析。测定植株株高,地上部生物量,植株体内叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素含量,可溶性蛋白质含量,SOD、POD、CAT 酶活性及植株体内 Cd、Pb、Zn 含量;测定盆栽土壤中有效态 Cd、Pb、Zn 含量及根表层 0~2 cm 土壤中细菌、放线菌、霉菌数量。

1.3 测定方法

叶绿素 a、叶绿素 b、类胡萝卜素采用乙醇提取法,分别在波长 470、649、665 nm 处用分光光度法测定。

植物组织中酶液的制备:称取新鲜植物样品 0.2 g 于预冷研钵中,加入 0.02 mol·L⁻¹ 磷酸二氢钾溶液 5 mL,冰浴下研磨成匀浆,于冷冻离心机内 10 000 r·min⁻¹ 低温离心 20 min,倾出上清液保存在冷处,残渣再用 5 mL 磷酸二氢钾溶液提取 1 次,合并两次上清液即为所需要的酶液。

可溶性蛋白质含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法,SOD 酶采用氮蓝四唑(NBT)法,CAT 活性采用分光光度法,POD 活性采用愈创木酚法^[7]。植株体内 Cd、Pb、Zn 含量采用硝酸-高氯酸联合消煮,原子吸收分光光度法;土壤中有效态 Cd、Pb、Zn 含量采用 DTPA 浸提,原子吸收分光光度法;土壤中细菌、放线菌、霉

表 1 供试土壤的理化性质特征

Table 1 Characteristics of physical and chemical properties of tested soil

土壤类型	重金属含量/mg·kg ⁻¹			有机质/ g·kg ⁻¹	全 N/ g·kg ⁻¹	碱解 N/ mg·kg ⁻¹	速效 P/ mg·kg ⁻¹	速效 K/ mg·kg ⁻¹	pH	<0.01 mm 物理性黏粒/%
	Cd	Pb	Zn							
潮褐土	0.83	30.54	75.88	10.89	0.63	22.71	14.02	98.04	7.4	38.78
底泥	6.86	63.67	234.42	24.99	1.56	46.76	29.69	107.42	7.9	28.97

菌数量采用稀释平板法。

2 结果与分析

2.1 Cd 胁迫对印度芥菜生长的影响

由表 2 可见,在 Cd 添加量为 0~200 mg·kg⁻¹ 的不同处理中,印度芥菜都能够顺利发芽生长,除高浓度处理叶子少部分有萎蔫发黄的症状外,均无明显受毒害现象,说明印度芥菜对 Cd 胁迫表现了极强的忍耐特征。同类盆栽试验中^[8],在重金属添加量为 50 mg·kg⁻¹ 时,油菜就受到了明显的重金属毒害而无法正常生长。本试验中,Cd 毒害主要影响了印度芥菜的生长进程,在 Cd 浓度为 0、40 mg·kg⁻¹ 时,印度芥菜顺利进入生育期,拔节开花结籽,而其他浓度处理都没能开花。随着 Cd 浓度增大,地上部生物量出现了先升高后降低的规律。在添加量为 0~120 mg·kg⁻¹ 时,生物量增加,Cd 添加量为 120 mg·kg⁻¹ 比不添加的生物量增加了 57.67%。在添加量为 120~200 mg·kg⁻¹ 时,生物量降低。由此可见,Cd 处理影响了印度芥菜的生殖生长,而对营养生长并没有明显干扰,相反,一定浓度的 Cd 处理还提高了植株地上部的生物量。Cd 处理对根重的影响没有明显规律性,根重最

大出现在处理 2,最小为处理 1。随着 Cd 处理浓度的增加,植株趋于矮小,即矮小植株在盆钵内的比例增加。

2.2 印度芥菜对 Cd 的吸收累积特征

相关分析发现,土壤 Cd 添加量与 Cd 有效态含量相关系数达 0.957,与植株地上部吸收量相关系数达 0.944,与地下部吸收量相关系数达 0.996;土壤中有有效态 Cd 含量与植株地上部含量相关系数达 0.961,与地下部吸收量相关系数达 0.958,以上均达到极显著的相关水平。这说明 Cd 能被植物有效吸收,其添加量和土壤含量在一定程度上代表着土壤中 Cd 的有效量。

从表 3 可以看出,在 Cd 添加量为 0~200 mg·kg⁻¹ 的不同处理中,土壤中 Cd 有效态含量为 0.429~62.483 mg·kg⁻¹,随着 Cd 添加量的增加,其有效态含量增加的幅度越来越小,有效态占全量的比重也越来越小,说明添加的重金属会很快被土壤中一些物质固定而成为不能被植物吸收利用的无效态。因此,植物修复的关键环节是土壤中重金属的活化诱导。植株体内重金属含量随添加量的增加而增加,但增幅呈下降趋势,当地上部含量超过 160 mg·kg⁻¹ 时,植株体内含

表 2 印度芥菜对 Cd 污染生长的反应

Table 2 The growing responses of the tested plants entails to the Cd pollution

处理编号	Cd 添加量/mg·kg ⁻¹	生物量/g(FW)	根重/g(FW)	株高/cm	长势情况
1	0	25.30±1.38a	2.08±0.46a	13~19	已拔节开花,长势良好
2	40	32.08±2.16bc	4.34±0.28e	15~20	已开花,未结籽
3	80	35.40±1.98c	3.22±0.13d	7~27	长势健壮,未能开花
4	120	39.89±0.94d	2.55±0.15b	6~21	生长旺盛,叶子繁茂
5	160	34.38±1.47c	2.71±0.43c	7~23	有部分黄叶
6	200	30.69±2.02b	2.85±0.37c	8~22	植株多数矮小,老叶易变黄

注:数据之间的显著性差异用 Duncan 检验,同一列的数据后的字母不同表示处理间有显著差异($P < 0.05$),字母相同表示处理间无显著差异,取样量为各处理的平均值,下同。

Note: The difference treats were tested by One-way ANOVA. Number which on the same line followed by different letters were significantly different at $P < 0.05$. The same as follows.

表 3 印度芥菜对 Cd 的吸收累积特征

Table 3 The character of sorption and accumulation of *Brassica juncea* with Cd

处理编号	土壤中 Cd 全量/ mg·kg ⁻¹	土壤中 Cd 有效态/ mg·kg ⁻¹	植株地上部 Cd 含量/ mg·kg ⁻¹	植株地下部 Cd 含量/ mg·kg ⁻¹	地上部 富集系数	地下部 富集系数	转移系数
1	3.84	0.43±0.07a	7.82±0.72a	0.37±0.28a	2.04	0.05	20.92
2	43.84	18.31±2.06b	44.70±2.10b	46.37±1.76b	1.02	1.04	0.96
3	83.84	43.05±3.38c	71.23±3.25c	85.00±2.34c	0.85	1.19	0.84
4	123.84	46.46±3.27c	83.43±2.73d	116.69±3.68d	0.67	1.40	0.72
5	163.84	52.55±3.96d	115.59±3.04f	171.76±3.95e	0.71	1.49	0.67
6	203.84	62.48±4.52e	102.67±2.96e	191.91±3.07f	0.50	1.87	0.54

量开始下降。地上部含量为 7.824~102.672 mg·kg⁻¹, 地下部含量为 0.374~191.910 mg·kg⁻¹, 最高浓度处理分别是最低浓度处理地上、地下部含量的 13.12 倍和 513.13 倍。地上部富集系数为 2.038~0.504, 呈逐渐降低的趋势, 地下部富集系数为 0.048~1.869, 呈逐渐升高的趋势, 两者相反。转移系数为 20.920~0.535, 逐渐降低。这说明随着 Cd 浓度的增加, 植株由地下部向地上部运输重金属的能力一直下降, 富集的 Cd 无法大量向地上部转移, 而越来越多地累积在根部。由此可见, 印度芥菜适合作为轻、中度 Cd 污染土壤的修复植物, 这样才有较强的富集转运能力。

若以土壤中有效态 Cd 含量为自变量 X , 植株地上部含量为因变量 Y_1 , 地下部含量为因变量 Y_2 , 则植株的吸收方程为:

$$Y_1=1.635 3X+10.055(R^2=0.923 6)$$

$$Y_2=3.021 1X-10.405(R^2=0.918 2)$$

2.3 Cd 胁迫下印度芥菜生理生化指标的变化特征

叶绿素是植物光合作用的物质基础, 其含量高低决定其光合作用水平, 叶绿素破坏与降解会直接导致光合作用效率的降低, 使植物长势减弱, 植物生长量减少。从表 4 可知, 叶绿素含量并没有表现出明显的规律性, 值得关注的是, Cd 浓度最高的处理其叶绿素 a、b、a/b、类胡萝卜素含量都是最高的, 分别比 Cd 添加量为 0 的对照处理提高了 66.67%、41.36%、17.86%、34.06%。

可溶性蛋白是植物所有蛋白质组分中最活跃的一部分, 包括各种酶原、酶分子和代谢调节物, 并与植物对不良环境的抗性有关, 可溶性蛋白的含量部分体现着机体的衰老程度, 显示了机体的代谢和叶片的生命活动旺盛程度。试验中可溶性蛋白含量为 3.916~5.191 mg·g⁻¹。在 Cd 添加量为 0~40 mg·kg⁻¹ 时, 可溶性蛋白增加, 在 Cd 添加量为 40~120 mg·kg⁻¹ 时, 可溶性蛋白降低; 在 Cd 添加量为 160~200 mg·kg⁻¹ 时, 可

溶性蛋白降低。

SOD 是一种重要的活性氧防御酶, 在消除超氧化物自由基、减轻脂质过氧化作用和膜伤害方面起重要作用^[9]。正常植物细胞的叶绿体和线粒体在光合作用和呼吸作用过程中会产生自由基 (O₂⁻·和·OH)^[10], SOD 能清除超氧化物的阴离子自由基(O₂⁻·), 并产生歧化物 H₂O₂。因此 SOD 在一定程度上支配植物体内的 O₂⁻·和 H₂O₂ 的浓度。有关重金属胁迫下植物体内 SOD 活性的变化, 目前的文献报道有两种情况: 一是 SOD 活性随着重金属浓度的增大而增大^[11]; 二是随着重金属浓度的增加, SOD 活性先升后降或持续下降^[12]。本研究与后者相同。

POD 是一种含 Fe 的金属蛋白质, 是植物体内常见的氧化还原酶, 催化过氧化氢类的反应, 广泛参与植物的物质和能量代谢, 在植物的呼吸代谢和抗性生理中起重要作用。POD 活性的维持和提高是植物耐受重金属胁迫的物质基础之一^[13]。SOD、CAT、POD 协同作用, 排除自由基对植物细胞结构潜在氧伤害的可能性。在本研究中, POD 活性上升的原因是重金属胁迫下印度芥菜体内产生的过氧化物增加诱导的结果, 而当重金属处理浓度进一步增加, 有毒物质超过 POD 正常的催化能力后则导致其活性的下降, 后果是使植物体内 H₂O₂ 过量积累, 进而对植物体内的膜系统造成潜在的氧伤害。

CAT 是一种含 Fe 的血蛋白酶类, 能阻止活性氧自由基的生成, 减轻植物所受的氧伤害。有研究表明, CAT 活性的下降可以导致 H₂O₂ 的累积^[14], 从而破坏植物膜的完整性。本研究中 SOD、POD、CAT 活性表现了一致的变化规律, 在 Cd 添加量为 0~80 mg·kg⁻¹ 时, SOD、POD、CAT 总活性增加; 在 Cd 添加量为 80~200 mg·kg⁻¹ 时, SOD、POD、CAT 总活性降低。可见 Cd 添加量 80 mg·kg⁻¹ 是个转折, 在土壤 Cd 含量超过这个浓度时, 印度芥菜虽然表现上没有明显中毒症状,

表 4 Cd 污染下印度芥菜部分生理生化指标的变化

Table 4 The changes character of physiological and biochemical index of *Brassica juncea* with Cd

处理	叶绿素 a/ mg·g ⁻¹ FW	叶绿素 b/ mg·g ⁻¹ FW	叶绿素 a/b	类胡萝卜素/ mg·g ⁻¹ FW	可溶性 Pr/ mg·g ⁻¹	SOD 总活性/ U·g ⁻¹ FW	SOD 比活力	POD/ Δ470 nm·min ⁻¹ ·g ⁻¹ FW	CAT/ U·g ⁻¹ FW
1	0.62±0.16b	0.22±0.04b	2.8	1.19±0.21b	3.92±0.21a	46.03±2.18b	11.75	1045±32.9d	564±17.5d
2	0.64±0.14b	0.21±0.07ab	3.1	1.11±0.17c	6.43±0.19f	57.41±3.20e	8.93	1055±25.1e	597±23.0e
3	0.53±0.09a	0.19±0.04a	2.8	0.91±0.13b	4.97±0.17b	70.64±3.76f	14.21	1150±37.8f	620±16.9f
4	0.88±0.17c	0.29±0.09d	3.0	1.53±0.09c	5.80±0.14d	54.50±2.95d	9.40	995±29.6c	525±17.2c
5	0.63±0.06b	0.26±0.06c	2.5	0.99±0.08a	6.17±0.23e	50.27±3.07c	8.14	910±25.1b	518±19.4b
6	1.03±0.23d	0.31±0.11d	3.3	1.59±0.13d	5.19±0.26c	43.39±3.56a	8.36	895±30.2a	476±23.4a

但机体已经受到实质性伤害。

2.4 Cd 胁迫下印度芥菜土壤中微生物数量变化分析

研究发现, Cd 的胁迫使印度芥菜所生长的土壤环境中微生物数量发生明显变化。从表 5 可知, 土壤中微生物数量为细菌>放线菌>霉菌, 后者比前者均低 2 个数量级, 随着 Cd 添加量的增加, 微生物的数量也随之增加, 当 Cd 到达一定浓度, 微生物数量开始下降, 所有添加 Cd 的处理, 微生物数量均高于对照。

表 5 Cd 污染下印度芥菜根区土壤微生物数量的变化(个·g⁻¹干土)

Table 5 The changes character of numbers of microbe of *Brassica juncea* with Cd

编号	细菌/×10 ⁷	放线菌/×10 ⁵	霉菌/×10 ³
1	0.35±0.06a	1.25±0.07a	1.10±0.10a
2	0.56±0.03b	2.45±0.13b	2.50±0.15b
3	0.85±0.11c	3.60±0.12c	4.10±0.14c
4	1.20±0.09d	3.85±0.07d	4.52±0.09d
5	1.35±0.04e	5.65±0.05f	4.15±0.06c
6	1.30±0.07f	4.15±0.12e	4.82±0.08e

对于细菌, 其数量为 0.35×10⁷~1.35×10⁷ 个·g⁻¹ 干土, 最大值出现在 Cd 添加量为 160 mg·kg⁻¹ 的处理, 各处理间差异显著, Cd 添加量最高时细菌数量为对照的 3.71 倍。对于放线菌, 其数量为 1.25×10⁵~5.65×10⁵ 个·g⁻¹ 干土, 最大值出现在 Cd 添加量为 160 mg·kg⁻¹ 的处理, 各处理间差异显著, Cd 添加量最高时放线菌数量为对照的 3.32 倍。对于霉菌, 其数量为 1.10×10³~4.82×10³ 个·g⁻¹ 干土, 最大值出现在 Cd 添加量为 200 mg·kg⁻¹ 的处理, 各处理间差异显著, Cd 添加量最高时霉菌数量为对照的 4.38 倍。

植物生长可以刺激微生物数量增加, Cd 的胁迫在一定浓度范围内时也刺激了微生物数量的增加, 但过高浓度的 Cd 污染将使这种刺激强度减弱。

3 讨论

对于土壤中的重金属元素, 植物的抗性响应包括两部分: 避性和耐性。避性和耐性可以同时在一种植物上出现, 分别具有不同的机制。避性指的是植物并不吸收环境中的重金属, 其中包括限制重金属离子跨膜运输和使重金属离子与体外分泌物结合两种作用。耐性则包括金属排斥性和金属积累。

Cd 胁迫下植物体内发生一系列生理变化, 引起自由基的积累和膜脂过氧化, 使膜系统的结构和功能受到损伤和破坏, 透性增大, 抑制细胞和整个植株

的生长, 造成植物矮化, 生长迟缓^[15]。Cd 是毒性较强的重金属元素, 0.1 mg·L⁻¹ 处理浓度即可引起细胞代谢的紊乱和结构损伤。对植物而言, Cd 离子毒害的主要机制在于它对细胞内蛋白质和核酸等重要的生物大分子上的巯基(-SH)具强大的亲和力, 对磷酸盐功能团等其他侧链也显示出亲和力, 且易于移动, 往往集中在生长旺盛的部位, 显示其敏感的毒害损伤作用。不良环境诱发生物代谢过程产生的自由基对植物膜有伤害作用, 但生物体自身的保护酶系统能清除自由基, 减轻危害。植物细胞内的 SOD、POD、CAT 和 APX 等抗氧化酶可以在一定程度上抵御各种环境因子造成的氧化胁迫。SOD 将 O₂^{·-}歧化为 H₂O₂, POD、CAT、APX 则负责 H₂O₂ 的清除。Cd 胁迫可以启动抗氧化酶系统, 清除过量的 H₂O₂ 和 O₂^{·-}, 从而防止氧化伤害或毒性更强的自由基·OH 的形成^[16]。但是, 如果 SOD 增加的幅度比 CAT、POD、APX 大得多, 即 SOD/CAT、SOD/APX、SOD/POD 比值增加, 那么由于 SOD 分解产生的 H₂O₂ 不能被及时地清除, 积累的 H₂O₂ 将与未被 SOD 分解的 O₂^{·-}在 Cd 等催化下通过 Fenton 反应生成·OH, 其结果是加剧氧化胁迫作用^[17]。

4 结论

印度芥菜对 Cd 表现了很好的耐性, 在 Cd 添加量为 0~200 mg·kg⁻¹ 的情况下, 能够顺利发芽、生长, 其生物量出现了先升后降的规律, Cd 主要影响了植物的生殖生长, 大量的 Cd 使印度芥菜延迟进入生育期。植株体内 Cd 浓度随土壤中 Cd 浓度升高而升高, 地上部可达 7.824~102.672 mg·kg⁻¹, 地下部可达 0.374~191.910 mg·kg⁻¹。地上部富集系数呈逐渐降低的趋势, 地下部富集系数呈逐渐升高的趋势, 两者相反。转移系数为 20.920~0.535, 呈逐渐降低趋势。

本研究表明, 在低 Cd 浓度(0~120 mg·kg⁻¹)下, SOD、POD 和 CAT 活性上升, 说明 SOD、POD 和 CAT 确实起到了清除活性氧的作用, SOD 在稍高 Cd 浓度下发挥清除活性氧的作用。在高 Cd 浓度(120~200 mg·kg⁻¹)下, 3 种酶活性均有不同程度的下降, 说明其活性受到了不同程度的抑制, 可能因为 Cd 干扰了其分子结构或改变了其空间结构或产生的活性氧自由基超过了它们的清除能力, 酶活性低升高抑的结果与徐秋曼等^[18]的研究结果类似。

在一定范围内 Cd 的胁迫促进了植物的生长, 进而促进了土壤微生物数量的增加, 但一旦超过了某一范围, 这种刺激就会相应减弱, 微生物数量开始减少。

由于印度芥菜在植物修复重金属污染土壤方面有很强的利用价值,有关其吸收特性、生理生化、根区微生物等方面的特性规律有待于进一步研究。

参考文献:

- [1] 蒋先军, 骆永明, 赵其国, 等. 重金属污染土壤的植物修复研究[J]. 土壤, 2000(2): 71-74.
JIANG Xian-jun, LUO Yong-ming, ZHAO Qi-guo, et al. Study on phytoremediation of heavy metal polluted soils[J]. *Soil*, 2000(2): 71-74.
- [2] 周长芳, 吴国荣, 施国新, 等. 水花生抗氧化系统在抵御 Cu²⁺胁迫中的作用[J]. 植物学报, 2001, 3(4): 389-394.
ZHOU Chang-fang, WU Guo-rong, SHI Guo-xin, et al. The role of antioxidant systems in Cu²⁺ stress resistance in *Alternanthera philoxeroides*[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2001, 3(4): 389-394.
- [3] 洪仁远, 蒲长辉. 镉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 Ren-yuan, PU Chang-hui. Effects of cadmium on the growth and physiological and biochemical reactions of wheat seedlings[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 1991, 6(3): 70-75.
- [4] 段昌群, 王焕校. 重金属对蚕豆根尖的核酸含量及核酸酶活性影响的研究[J]. 环境科学, 1992, 13(5): 31-35.
DUAN Chang-qun, WANG Huan-xiao. Studies on the effects of heavy metals on the contents of nucleic acids and activities of nucleases in the root tips of *Vicia faba*[J]. *Environmental Science*, 1992, 13(5): 31-35.
- [5] 杨居荣, 贺建树. 镉对植物生理生化的影响[J]. 农业环境保护, 1995, 14(5): 193-197.
YANG Ju-rong, HE Jian-shu. The effects of cadmium on plant physiological and biochemical reactions[J]. *Agro-Environment Protection*, 1995, 14(5): 193-197.
- [6] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 514-523.
ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 514-523.
- [7] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002: 120-121.
CHEN Jian-xun, WANG Xiao-feng. Guidance of plant physiology experiments[M]. Guangzhou: South China University of Technology Press, 2002: 120-121.
- [8] 李博文, 杨志新, 谢建治. 土壤 Cd、Pb、Zn 复合污染对植物吸收重金属的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(5): 908-911.
LI Bo-wen, YANG Zhi-xin, XIE Jian-zhi. Effects of soil compound contamination with cadmium, zinc and lead on adsorption of the metals by rape[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(5): 908-911.
- [9] 刘鸿先, 曾韶西, 王以柔, 等. 低温对不同耐寒力的黄瓜幼苗子叶各细胞器中超氧化物歧化酶(SOD)的影响[J]. 植物生理与分子生物学报, 1985, 11(1): 48-57.
LIU Hong-xian, CENG Shao-xi, WANG Yi-rou, et al. The effect of low temperature on superoxide dismutase in various organelles of cucumber seedling cotyledon with different cold tolerance[J]. *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 1985, 11(1): 48-57.
- [10] Elstner E F. Oxygen activation and oxygen toxicity[J]. *Ann Rev Plant Physiol*, 1982, (33): 73-96.
- [11] Cakmak I, Horst W J. Effect of aluminum on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase and peroxidase activities in root tip of soybean[J]. *Physiol Plantarum*, 1991, 83: 463-468.
- [12] 严重玲, 洪业汤, 付舜珍. Cd、Pb 胁迫对烟草叶片中活性氧消除系统的影响[J]. 生态学报, 1997, 17(5): 488-491.
YAN Chong-ling, HONG Ye-tang, FU Shun-zhen. Effect of Cd, Pb stress on scavenging system of activated oxygen in leaves of tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(5): 488-491.
- [13] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 不同耐性作物中几种酶活性对 Cd 胁迫的反应[J]. 中国环境科学, 1996, 16(2): 113-117.
YANG Ju-rong, HE Jian-shu, ZHANG Guo-xiang, et al. Reaction of some enzyme activities in crops of different tolerance to the stress of Cd[J]. *China Environmental Science*, 1996, 16(2): 113-117.
- [14] Kellogg E W, Fridovich I. Superoxide. Hydrogen peroxide and single oxygen in lipid peroxidation by a xanthine oxidase system[J]. *J Bio Chem*, 1975, 250: 8812-8817.
- [15] 秦丽, 祖艳群, 李元. Cd 对超累积植物续断菊生长生理的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(增刊): 48-52.
QIN Li, ZU Yan-qun, LI Yuan. Effects of Cd on the physiological characteristics and growth of the *Sonchus asper* L. Hill [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(Suppl): 48-52.
- [16] Ptsikk E, Kairavuo M, Kermen F, et al. Excess copper predisposes photosystem II to photoinhibition in vivo by out competing iron and causing decrease in leaf chlorophyll[J]. *Plant Physiol*, 2002, 129: 1359-1367.
- [17] Shah K, Kumar R G, Verma S, 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.
- [18] 徐秋曼, 陈宏, 程景胜, 等. 镉对油菜叶细胞膜的损伤及细胞自身保护机制初探[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4): 235-237.
XU Qiu-man, CHEN Hong, CHEN Jing-sheng, et al. Injure of cadmium on cell membrane of rape leaf and its protection mechanism[J]. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(4): 235-237.