

土壤四环素污染对小白菜幼苗生长发育的生态毒性

林琳^{1, 2}, 安婧¹, 周启星^{1, 3*}

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所陆地生态过程重点实验室, 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 南开大学环境科学与工程学院, 环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要:采用土培盆栽试验模拟研究了土壤四环素污染对小白菜幼苗生长发育的生态毒性. 结果表明, 1~100 mg/kg 四环素暴露促进了小白菜的茎伸长, 但抑制了小白菜的根伸长和鲜重. 100 mg/kg 四环素处理 28 d 后, 小白菜根长抑制率达到 36.0%, 鲜重抑制率达到 34.6%. 随着四环素暴露时间的延长, 100 mg/kg 四环素处理的小白菜叶片中叶绿素含量显著低于其他浓度处理, 其抑制率为 21.7%~29.0%. 四环素胁迫 7 d 后, 小白菜幼苗中可溶性蛋白 (SP) 含量及丙二醛 (MDA) 含量无显著性变化, 但随着暴露时间的延长, 小白菜幼苗中 SP 含量显著下降, MDA 含量则显著上升. 1~100 mg/kg 四环素对小白菜幼苗中 SOD、POD 和 CAT 酶活性均有不同程度的抑制作用; 100 mg/kg 四环素处理下, SOD、POD 和 CAT 酶活性抑制率分别为 33.9%~45.3%、33.8%~67.7% 和 29.6%~57.7%. 试验结果表明, 土壤四环素长期暴露对小白菜幼苗生长发育具有不良的生态毒性效应.

关键词:四环素; 小白菜; 生态毒性; 生理指标; 抗氧化防御系统

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)08-2430-06

Ecotoxicological Effects of Tetracycline on the Seedling Development of Chinese White Cabbage (*Brassica rapa* L. Chinensis Group.) in Soil

LIN Lin^{1, 2}, AN Jing¹, ZHOU Qi-xing^{1, 3}

(1. Key Laboratory of Terrestrial Ecological Process, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: The ecotoxicological effects of tetracycline (TC) on the early growth and seedlings development of Chinese white cabbage were investigated using the pot-culture method. The results showed that the stem elongation of the cabbages was promoted, while the root elongation and fresh weight of the cabbages were inhibited by 1-100 mg/kg TC. After a 28-day exposure, the inhibition rate of root elongation was up to 36.0% and that of fresh weight was up to 34.6% stressed by 100 mg/kg TC. With the exposure time of TC prolonged, the content of chlorophyll in leaves of the cabbage seedlings stressed by 100 mg/kg TC was significantly lower than that treated by other concentrations of TC, with the inhibition rate of chlorophyll was 21.7%-29.0%. After a 7-day exposure to TC, the content of soluble protein (SP) and malondialdehyde (MDA) in the cabbage seedlings changed insignificantly. With the exposure time of TC prolonged, the content of SP in the cabbage seedlings decreased significantly, while the content of MDA increased significantly. Moreover, the activity of SOD, POD and CAT in Chinese white cabbage seedlings was inhibited by 1-100 mg/kg TC. The inhibition rates of SOD, POD and CAT activity exposed to 100 mg/kg TC were 33.9%-45.3%, 33.8%-67.7% and 29.6%-57.7%, respectively. It suggested that TC has ecotoxicological effects on Chinese white cabbage seedlings with a chronic exposure.

Key words: tetracycline; Chinese white cabbage; ecotoxicological; physiological index; antioxidant defense system

抗生素的生产量和使用量相当巨大, 且呈逐年递增的趋势. 在美国, 作为促生长作用的抗生素使用量在近 40 年内增加了 80 倍^[1]. 中国每年兽用抗生素的平均使用量已高达 6 000 t^[2]. 大量的抗生素通过多种途径直接或间接地排放后进入环境中, 导致地表水、地下水及农田土壤环境的污染, 故其残留情况值得关注^[3]. 近年来, 随着集约化畜牧业以及配合饲料工业的发展, 四环素类、大环内酯类、青霉素类、磺胺嘧啶类等抗生素作为饲料添加剂越来越被广泛地应用于畜禽及水产养殖业^[4], 这些抗生素不

但可以防病治病, 还可以促进动物生长. 兽用抗生素进入动物体内后, 大约 70% 不能被受体吸收, 而是以母体化合物的形式被直接排出体外. 这些未经处理的畜禽粪便常常作为有机肥被施入农田土壤, 而造成土壤环境污染. 张慧敏等^[5]对我国华北地区

收稿日期: 2010-09-20; 修订日期: 2010-12-17

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (40930739); 中国博士后科学基金项目; 中国科学院沈阳应用生态研究所博士启动基金项目

作者简介: 林琳 (1985~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态毒理学与污染生态学, E-mail: linlin576521@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhouqx@iae.ac.cn

施用畜禽粪肥的农田土壤中 3 种四环素类抗生素(土霉素、四环素和金霉素)残留状况进行调查,结果表明,农田表层土壤中土霉素、四环素和金霉素的检出率分别为 93%、88% 和 93%,残留量分别在检测限以下至 5.172、0.553 和 0.588 mg/kg 之间。土壤环境中的抗生素残留浓度相对较低,通常不易在短期内引起生态毒性效应。但由于其被持续不断地输入到土壤中,抗生素对植物能够产生长期的生态毒性效应^[6]。目前四环素类抗生素对植物的生态毒性效应研究多集中于对水生植物的影响上^[7],对于陆地作物研究较少^[8]。小白菜作为人们日常食用的蔬菜,具有生长周期短、易于栽培、对污染物敏感等特点,常被作为受试植物用来评价植物对污染物的吸收与毒性效应。本研究采用土培盆栽试验,模拟分析了四环素对小白菜幼苗生长的影响及其生态毒性,旨在探讨土壤中四环素类抗生素对植物的生态毒性效应。

1 材料与方法

1.1 试验材料

盆栽试验土壤为草甸棕壤,采自中国科学院沈阳生态试验站。经分析,其 pH 值 6.76,有机质 2.22 g/kg,全 N 1.05 g/kg,全 P 0.62 g/kg,全 K 23.25 g/kg。试验所用小白菜品种为四季小白菜(*Brassica rapa* L. Chinensis Group.),种子购于沈阳东亚种子公司。四环素(Tetracycline, TC)为原料药品(99%),购于南京奥多福尼生物科技有限公司,使用前不经过任何纯化。分子式为 $C_{22}H_{24}N_2O_8$,结构式如图 1。

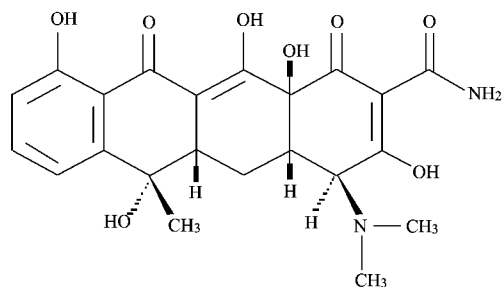


图 1 四环素的结构式

Fig. 1 Constitutional formula of tetracycline

1.2 试验方法

将供试土壤风干后过 4 mm 筛,每盆 0.8 kg,与一定量的四环素充分混匀后装入培养盆。试验共设 4 个浓度处理,分别为 CK、1、10 和 100 mg/kg。平

衡 2 周以便更好地模拟真实土壤环境。研究表明,四环素类抗生素不能被生物降解,且在土壤中残留时间较长^[9,10]。因此,平衡 2 周后不会对四环素的初始浓度有太大的影响。将小白菜种入培养盆,每盆 5 棵,每个浓度做 3 个平行。在小白菜生长的第 7、14、21 和 28 d 分别采样,并对小白菜的鲜重、根长、茎长、叶绿素、抗氧化酶等指标进行测定分析。采集样品时应注意小白菜根、茎的完整。每个测定项目做 3 次重复。根据盆中土壤缺水情况,不定期浇水,使土壤含水量经常保持在田间持水量的 80% 左右。

1.3 生理生化指标的测定

酶提取液:取小白菜幼苗 0.1 g 在预冷的磷酸缓冲溶液(50 mmol/L $NaH_2PO_4 \cdot Na_2HPO_4$, 1% 聚乙烯吡咯烷酮, pH 7.8)中匀浆,4℃ 下 10 000 r/min 高速离心 20 min,上清液即为提取液^[11]。

酶活性测定:超氧化物歧化酶(SOD)采用氮蓝四唑法^[12],以 560 nm 下的吸光值计算酶活性,以鲜重计,单位为 U/g;过氧化物酶(POD)采用愈创木酚法^[12],以 470 nm 下的吸光值计算酶活性,以鲜重计,单位为 U/(g·min);过氧化氢酶(CAT)采用紫外吸收法^[13],以 240 nm 下的吸光值计算酶活性,以鲜重计,单位为 U/(g·min)。

叶绿素测定:按照 Hegedüs 等^[14]的方法进行,取 0.05 g 小白菜叶片加入 95% 乙醇溶液 10 mL,研磨并过滤后于 470 nm(胡萝卜素)、649 nm(叶绿素 b)、665 nm(叶绿素 a)下测定吸光度,以鲜重计,单位为 mg/g。

丙二醇(MDA)和可溶性蛋白(SP)含量测定:前者采用硫代巴比妥酸显色法^[15],以鲜重计,单位为 $\mu\text{mol/L}$;后者采用考马斯亮蓝法^[16],以鲜重计,单位为 mg/g。

1.4 数据处理

利用 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析,包括平均值、标准差及方差分析;并利用最小显著性差异检验法(LSD)进行差异显著性分析($p < 0.05$)。

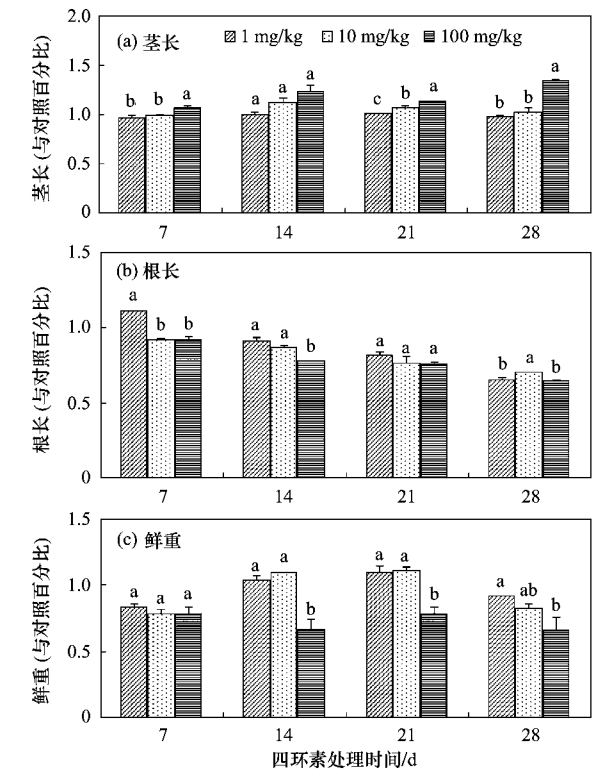
2 结果与分析

2.1 土壤四环素污染对小白菜幼苗茎长、根长及鲜重的生态毒性

由图 2(a)可知,小白菜的茎长随着四环素浓度的升高而增加。随着暴露时间的延长,100 mg/kg 四环素处理下的小白菜茎长显著长于其他处理浓度。由此可见,在 1~100 mg/kg 四环素处理下,高浓度四环素促进了小白菜的茎伸长。

不同浓度四环素处理下小白菜的根长变化见图2(b)所示. 暴露7 d后,各浓度四环素处理下的小白菜根长出现显著性差异. 随着四环素暴露时间的延长,小白菜根长的生长随着四环素浓度的增加而受到抑制. 暴露28 d后,100 mg/kg四环素处理下的小白菜根长抑制率高达36.0%. 由此表明,在1~100 mg/kg四环素处理下,高浓度四环素抑制了小白菜的根伸长.

图2(c)所示为四环素处理下小白菜鲜重的变化情况. 暴露7 d后,各浓度四环素处理下的小白菜鲜重无显著性差异. 暴露14 d后,100 mg/kg四环素处理的小白菜鲜重与其他浓度处理下小白菜鲜重呈显著性差异,其抑制率为33.6%. 随着四环素暴露时间的延长,100 mg/kg四环素处理的小白菜鲜重显著低于其他含量处理. 暴露28 d后,100 mg/kg四环素处理的小白菜鲜重抑制率达到34.6%.



不同小写字母表示组间差异显著 ($p < 0.05$),下同
图2 四环素对小白菜幼苗茎长、根长及鲜重的影响
Fig.2 Effects of TC on stem elongation, root elongation and fresh weight of Chinese white cabbage seedlings

2.2 土壤四环素污染对小白菜幼苗叶片中叶绿素的生态毒性

由图3可知,1~100 mg/kg的四环素对小白菜幼苗叶绿素的合成均有抑制作用. 在相同的暴露时

间下,小白菜叶片中叶绿素含量随着四环素浓度的增大而降低. 暴露7 d后,3个处理浓度下,叶绿素均受到了不同的抑制,但组间差异不显著. 随着四环素暴露时间的延长,100 mg/kg四环素处理的小白菜叶片中叶绿素含量显著低于其他浓度处理,其抑制率为21.7%~29.0%.

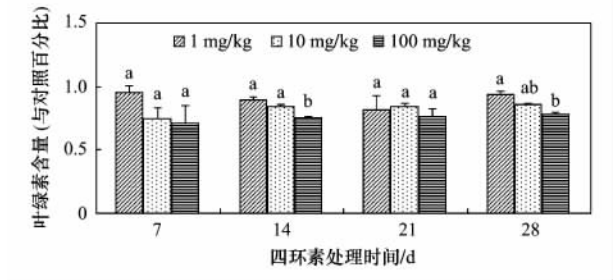


图3 四环素对小白菜幼苗叶片中叶绿素含量的影响
Fig.3 Effects of TC on the content of chlorophyll in leaves of Chinese white cabbage seedlings

2.3 土壤四环素污染对小白菜幼苗中可溶性蛋白 (SP) 及丙二醛 (MDA) 的生态毒性

四环素对小白菜幼苗可溶性蛋白 (SP) 含量的影响如图4(a)所示. 暴露7 d后,小白菜幼苗中SP含量随着四环素浓度的增大有所增加,但无显著性差异. 暴露14 d后,各浓度四环素处理的小白菜幼苗中SP含量较7 d后有显著性降低,SP抑制率为15.4%~35.0%. 随着四环素暴露时间的延长,100 mg/kg四环素处理的小白菜幼苗中SP含量显著低于其他浓度处理. 暴露28 d后,SP抑制率达到21.1%~49.3%.

由图4(b)可知,1~100 mg/kg四环素处理下,小白菜幼苗MDA含量均较CK处理下的MDA含量有所增加. 暴露7 d后,各含量四环素处理下小白菜幼苗中MDA含量无显著性差异. 暴露14 d后,随着四环素浓度的增大,小白菜幼苗中MDA含量显著增加. 随着四环素暴露时间的延长,100 mg/kg四环素处理的小白菜幼苗中MDA含量显著高于其他浓度处理.

2.4 土壤四环素污染对小白菜幼苗中抗氧化系统的生态毒性

如图5(a)所示,暴露7 d后,1 mg/kg四环素处理的小白菜幼苗中SOD活性略高于CK处理下小白菜幼苗中SOD活性;但随着四环素浓度的增大,小白菜幼苗中SOD活性呈显著性下降趋势,100 mg/kg四环素处理的小白菜幼苗中SOD活性抑制率达到45.3%. 暴露14 d后,各浓度四环素处理下小

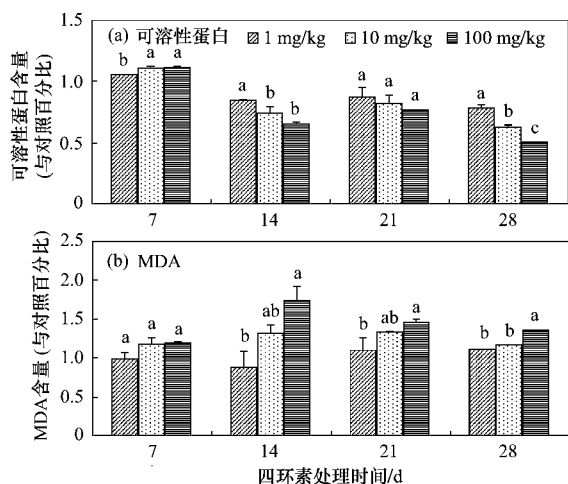


图4 四环素对小白菜幼苗可溶性蛋白及MDA含量的影响

Fig.4 Effects of TC on the content of soluble protein and MDA of Chinese white cabbage seedlings

白菜幼苗中SOD活性较7 d后有显著性降低,其抑制率为28.8%~33.9%。暴露21 d和28 d后,100 mg/kg四环素处理的小白菜幼苗中SOD活性显著低于其他含量处理,其抑制率分别为41.9%和44.1%。

图5(b)所示为四环素对小白菜幼苗中POD活性的影响。暴露7 d后,四环素浓度越大,小白菜幼苗中POD活性越低,其抑制率为19.6%~54.7%。随着四环素暴露时间的延长,100 mg/kg四环素处理的小白菜幼苗中POD活性显著低于其他含量处理。暴露28 d后,100 mg/kg四环素处理的小白菜幼苗中POD活性抑制率为67.7%。

四环素对小白菜幼苗中CAT活性的影响如图5(c)所示。1~100 mg/kg的四环素对小白菜幼苗中CAT活性均有抑制作用。在相同的暴露时间下,小白菜幼苗中CAT活性均随着四环素含量的增大而降低。随着四环素暴露时间的延长,暴露28 d后,小白菜幼苗中CAT活性抑制率为39.3%~57.7%。

3 讨论

土壤四环素污染胁迫下小白菜幼苗的生长试验,包括茎长、根长及鲜重的测量,是直观、快捷地检测四环素对小白菜幼苗毒性的一些指标。通过小白菜幼苗的生长试验可知,在1~100 mg/kg四环素处理下,随着其浓度的增大,四环素促进了小白菜的茎伸长,但却抑制了小白菜的根伸长。随着四环素暴露时间的延长,100 mg/kg四环素处理的小白菜鲜重显著低于其他含量处理,表明高含量处理下小白菜鲜

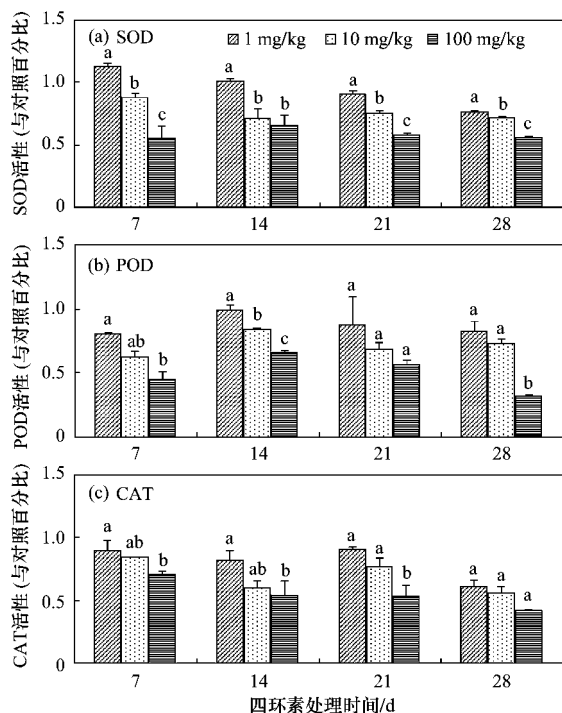


图5 四环素对小白菜幼苗中SOD、POD及CAT活性的影响

Fig.5 Effects of TC on the activity of SOD, POD and CAT of Chinese white cabbage seedlings

重受到抑制。通过抑制率可以看出,土壤四环素污染对小白菜幼苗的生长毒性大小依次为:根长>鲜重>茎长。这与Chen等^[17]的研究结果相似,即有机化合物在相同浓度下对植物幼苗根长的抑制效应大于其他参数。Migliore等^[18~20]发现恩诺沙星对黄瓜、生菜、豆、萝卜的生长有兴奋效应,即在低浓度时促进植物生长,而在高浓度时抑制植物的生长。并认为抗生素对植物的毒性与抗生素和叶酸相互竞争有关。Bradel等^[21]发现四环素可以通过抑制植原体的活性而影响幼芽分枝。这些都有可能成为四环素污染胁迫下小白菜幼苗生长受限制的原因。

叶绿素是植物光合作用的物质基础,其含量高低决定植物光合作用水平。有研究表明:在污染物的胁迫下,由于捕光化合物LHC蛋白合成的转录过程会受到抑制,而且初期形成的叶绿素单也被光氧化分解,导致光截获LHC的形成受到影响,从而影响叶绿素的积累^[22]。本试验中,四环素对小白菜叶片中叶绿素含量有显著的抑制作用,且随着四环素浓度的增大,四环素对小白菜叶片中叶绿素含量的抑制作用更加显著。

植物体内SP含量的变化是外界胁迫下植物生长发育受到影响的直接指示。当植物各种代谢活动正常时,可溶性蛋白的合成能力也有所增强。但在有

机物、重金属以及寒旱等胁迫下,植物体内的 SP 含量会下降^[12]. 本试验结果显示,当四环素暴露 7 d 后,小白菜幼苗中 SP 含量有所上升,说明四环素短期暴露可以诱导 SP 的合成. 但随着四环素暴露时间的延长,四环素对小白菜幼苗中 SP 含量呈现显著性抑制作用. MDA 是氧化损伤最终形成的脂质过氧化产物,其含量可间接提示机体自由基水平^[23]. 本研究结果显示,当四环素暴露 7 d 后,小白菜幼苗中 MDA 含量无显著性变化,说明短期内四环素未对小白菜幼苗造成明显的氧化损伤,四环素胁迫产生的自由基可被体内的抗氧化防御酶系及时、有效地去除. 但随着四环素暴露时间的延长,四环素对小白菜幼苗中 MDA 含量呈现显著性增加,说明土壤四环素污染已经对小白菜幼苗造成明显的氧化损伤.

SOD 作为生物体内重要的抗氧化酶之一,对机体的氧化与抗氧化平衡起着重要作用,它能把 O_2^- 和 H_2O_2 转化成 H_2O 和 O_2 ,抑制高活性的 $\cdot OH$ 等的形成,终止自由基连锁反应,保护生物体免受氧化损伤^[24]. 本试验结果表明,当四环素暴露 7 d 后,小白菜幼苗中 SOD 活性呈逐渐下降趋势,这说明小白菜幼苗中 SOD 活性的下降可能与 SOD 诱导产生 H_2O_2 的量下降有关. 但当四环素暴露 14 d 后,小白菜幼苗中 SOD 活性有所增加,这说明四环素的胁迫或代谢过程产生了超氧阴离子,从而诱发了 SOD 活性增加. POD 作为生物体内重要的抗氧化酶之一,在调控生物体内过氧化物平衡方面具有重要的作用. 本试验中,当四环素暴露 7 d 后,小白菜幼苗中 POD 活性显著降低. 随着四环素暴露时间的延长,小白菜幼苗中 POD 活性略有增加. 这种“先抑制后诱导”的现象说明在四环素的代谢过程中,有过氧化物或过氧化氢产生. 这种响应趋势在张薇等^[25]的研究中也被观察到,即荧蒽对蚯蚓内脏中 POD 活性的影响在暴露 3 d 时活性被抑制,而在 7 d 后被诱导. 另有研究表明,佳乐麝香 (HHCB) 和扑热息痛 (PCM) 对小麦幼苗中 POD 活性的影响也是先抑制后诱导^[26]. CAT 可有效清除生物体内过量的 H_2O_2 ,维持细胞内 H_2O_2 平衡. 本试验结果显示,四环素暴露前 21 d,小白菜幼苗中 CAT 活性有显著性增加,这说明四环素的急性胁迫增加了细胞内 H_2O_2 的含量,从而诱发 CAT 活性增加,这是生物应激的体现. 随着四环素暴露时间的延长,小白菜幼苗中 CAT 活性逐渐下降,这可能与细胞内 H_2O_2 的含量下降有关. 小白菜幼苗中 SOD、POD 及 CAT 活性的变化表明,四环素对小白菜幼苗中抗氧化系统具有破坏作用,其自身

的抗氧化防御功能降低.

4 结论

(1) 由小白菜幼苗的生长试验得出,在土壤 1 ~ 100 mg/kg 四环素处理下,高浓度四环素促进了小白菜的茎伸长,但却抑制了小白菜的根伸长,且高浓度处理下小白菜鲜重也受到抑制. 土壤四环素污染对小白菜幼苗的生长毒性大小依次为:根长 > 鲜重 > 茎长.

(2) 四环素长期暴露对小白菜幼苗的生长发育具有生态毒性作用. 1 ~ 100 mg/kg 的四环素对小白菜幼苗叶绿素的合成均有抑制作用,且暴露 21 d 后,各浓度四环素处理下小白菜叶绿素含量均达到最低. 小白菜幼苗中 SP 含量降低,而 MDA 的含量增加;SOD、POD 和 CAT 的活性也不同程度地受到了抑制,这些生理生化指标的变化将影响小白菜植株的正常生长发育.

参考文献:

- [1] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall A B A. A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(5):725-759.
- [2] Zhao L, Dong Y H, Wang H. Residues of veterinary antibiotics in manures from feedlot livestock in eight provinces of China [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(5):1069-1075.
- [3] Halling-Sørensen B. Algal toxicity of antibacterial agents used in intensive farming [J]. *Chemosphere*, 2000, **40**(7):731-739.
- [4] Haller M Y, Müller S R, McArdell C S, *et al.* Quantification of veterinary antibiotics (sulfonamides and trimethoprim) in animal manure by liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2002, **952**(1-2):111-120.
- [5] 张慧敏,章明奎,顾国平. 浙北地区畜禽粪便和农田土壤中四环素类抗生素残留 [J]. *生态与农村环境学报*, 2008, **24**(3):69-73.
- [6] 周启星,罗义,王美娥. 抗生素的环境残留、生态毒性及抗性基因污染 [J]. *生态毒理学*, 2007, **2**(3):243-251.
- [7] 俞道进,曾振英,陈杖榴. 四环素类抗生素残留对水生态环境影响的研究进展 [J]. *中国兽医学报*, 2004, **24**(5):515-517.
- [8] Kuhne M, Ihnen D, Moller G, *et al.* Stability of tetracycline in water and liquid manure [J]. *Journal of Veterinary Medicine Series A-Physiology Pathology Clinical Medicine*, 2000, **47**(6):379-384.
- [9] Hamscher G, Sczesny S, Hoper H, *et al.* Determination of persistent tetracycline residues in soil fertilized with liquid manure by high-performance liquid chromatography with electrospray ionization tandem mass spectrometry [J]. *Analytical Chemistry*, 2002, **74**(7):1509-1518.
- [10] Søbørg T, Ingerslev F, Halling-Sørensen B. Chemical stability of chlortetracycline and chlortetracycline degradation products and

epimers in soil interstitial water [J]. Chemosphere, 2004, **57** (10):1515-1524.

[11] Polle A, Eiblemeier M, Sheppard L, *et al.* Responses of antioxidative enzymes to elevated CO₂ in leaves of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings grown under a range of nutrient regimes [J]. Plant, Cell and Environment, 1997, **20**(10):1317-1321.

[12] Wu X Y, Von Tiedemann A. Impact of fungicides on active oxygen species and antioxidant enzymes in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) exposed to ozone [J]. Environmental Pollution, 2002, **116**(1):37-47.

[13] 徐镜波,袁晓凡,郎佩珍. 过氧化氢酶活性及活性抑制的紫外分光光度测定 [J]. 环境化学, 1997, **16**(1):73-76.

[14] Hegedüs A, Erdei S, Horvãth G. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedling under cadmium stress [J]. Plant Science, 2001, **160**(6):1085-1093.

[15] 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. 165-166.

[16] Wang M E, Zhou Q X. Joint stress of chlorimuron-ethyl and cadmium on wheat *Triticum aestivum* at biochemical levels [J]. Environmental Pollution, 2006, **144**(2):572-580.

[17] Chen Y, Zhou Q X. Ecological toxicity of reactive X-3B red dye and cadmium acting on wheat (*Triticum aestivum*) [J]. Journal of Environmental Sciences-China, 2002, **14**(1):136-140.

[18] Migliore L, Cozzolino S, Fiori M. Phytotoxicity to and uptake of enrofloxacin in crop plants [J]. Chemosphere, 2003, **52** (7): 1233-1244.

[19] Migliore L, Civitareale C, Cozzolino S, *et al.* Laboratory models to evaluate phytotoxicity of sulphadimethoxine on terrestrial plants [J]. Chemosphere, 1998, **37**(14-15):2957-2961.

[20] Migliore L, Cozzolino S, Fiori M. Phytotoxicity to and uptake of flumequine used in intensive aquaculture on the aquatic weed, *Lythrum salicaria* L. [J]. Chemosphere, 2000, **40** (7): 741-750.

[21] Bradel B G, Preil W, Jeske H. Remission of the free-branching pattern of *Euphorbia pulcherrima* by tetracycline treatment [J]. Journal of Phytopathology-Phytopathologische Zeitschrift, 2000, **148**(11-12):587-590.

[22] Horvãth G, Droppa M, Oravec A. Formation of the photosynthetic apparatus during greening of cadmium poisoned barley leaves [J]. Planta, 1996, **199**(2):238-243.

[23] Porter N A. Chemistry of lipid peroxidation [J]. Methods in Enzymology, 1984, **105**:273-282.

[24] 罗广华,王爱国,邵从本,等. 高浓度氧对种子萌发和幼苗生长的伤害 [J]. 植物生理学报, 1987, **13**(2):161-167.

[25] 张薇,宋玉芳,孙铁珩,等. 土壤低剂量荧蒽胁迫下蚯蚓的抗氧化防御反应 [J]. 土壤学报, 2007, **44**(6):1049-1057.

[26] An J, Zhou Q X, Sun Y B, *et al.* Ecotoxicological effects of typical personal care products on seed germination and seedling development of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Chemosphere, 2009, **76**(10):1428-1434.