

玉米幼苗对镉、菲单一与复合污染的生理生化响应

徐向华^{1,2}, 徐德福¹, 王晓蓉^{2*}, 吴吉春², 林仁璋²

(1. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2. 南京大学环境学院, 南京 210093)

摘要:通过室内盆栽实验研究了玉米幼苗在镉、菲污染胁迫 14 d 后的生理生化响应,并探讨了镉、菲单一与复合污染对玉米幼苗的毒性效应及其致毒机制。结果表明,单一镉(0 ~ 50 mg/kg)污染时,镉处理对玉米幼苗地上部分和根系生物量以及可溶性蛋白都无显著影响;随镉处理浓度的增加,玉米幼苗叶片 SOD 酶活性表现为先增加后降低的趋势,而 POD、CAT、APX 活性都显著增加,其中 APX 对镉胁迫响应较为敏感,与对照相比,在 1 mg/kg 镉处理时其活性就显著增加,为对照的 1.38 倍;O₂^{·-} 的累积是镉污染致毒的主要原因。镉-菲复合污染时,SOD 酶活性在低镉(1 mg/kg)处理时就显著增加,为对照的 1.66 倍,高镉处理时 SOD 活性降低,SOD 对镉-菲复合污染响应敏感,有潜力作为土壤镉-菲毒性效应的监测指标。镉-菲复合污染处理时 POD、CAT、APX 活性仍表现为增加趋势,但 CAT、APX 活性与镉单一处理时比较有降低现象,镉-菲复合污染的毒性效应高于单一镉污染的毒性效应。O₂^{·-} 和 ·OH 的累积是镉-菲复合污染致毒的主要原因。

关键词: 镉; 菲; 复合污染; 抗氧化系统; 生物标志物

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2011)05-1471-06

Biological Responses of Maize Seedlings to Single and Combined Stress of Cadmium and Phenanthrene

XU Xiang-hua^{1,2}, XU De-fu¹, WANG Xiao-rong², WU Ji-chun², LIN Ren-zhang²

(1. Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of the Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: Maize (*Zea mays* L.) pot-culture experiments were conducted in this study for exploring the biological responses of maize seedlings to single and joint stress of Cadmium (Cd) and phenanthrene. The results showed that single-Cd treatment with Cd concentration ranging from 0 to 50 mg/kg had no significant influences on the above-ground biomass, root biomass, and the soluble protein of maize seedlings; with the increase of Cd concentrations, the maize leaf SOD activities appeared as an increasing-decreasing trend, while the POD, CAT, APX activities increased persistently. The APX is very sensitive to Cd stress, which increased 38% than control treatment at lower Cd treatment (1 mg/kg). The accumulation of O₂^{·-} is one of the main cause of single-Cd toxicity. Under the Cd-phenanthren combined stress, the SOD activity increased at lower Cd concentration (1mg/kg), which can reached to 1.66 times of control treatment, and decreased when Cd concentration becomes high. The SOD activity is a sensitive index in response to the Cd-phenanthren combined pollution. Unlike SOD activity, the activities of POD, CAT and APX were obviously induced by combined pollution of Cd and phenanthren; but these enzyme activities decreased when compared with the single-Cd stress, which suggested that the combined toxicity of Cd and phenanthrene is stronger than the single-Cd stress. And the accumulation of O₂^{·-} and ·OH is one of the main cause of Cd-phenanthrene combined toxicity.

Key words: cadmium; phenanthrene; combined pollution; antioxidant system; biomarker

植物对土壤污染的响应是土壤污染生态毒理诊断的主要方法之一。植物的响应包括植物生理生化过程的变化^[1,2]、整个植株或器官的响应(生长受到抑制、产量减少或叶片出现受害症状等)^[1,3]、甚至是植物群落组成的改变^[4]。然而,植物的一些明显症状,如生长受到抑制、产量减少以及出现受害症状等,只有在污染物水平较高或作用时间较长时才发生^[5]。因此,有必要寻求和发展一些指标或方法能在污染物胁迫的早期或低浓度污染时做出响应。近年来,生物标志物的方法被逐渐应用到植物土壤污染诊断研究中,特别是细胞和分子水平的生物标志物在污染土壤早期诊断及修复效果评价方面具有

广阔的应用前景^[2,6]。

细胞抗氧化防御系统是目前在植物中应用较多的生物标志物。它是生物体抵御污染胁迫的第一道屏障,可被环境中的多种污染物诱导,是一种具有较高灵敏性和特异性的环境评价指标,因此,近年来常被用以警示性指示环境污染的变化^[7,8]。植物抗氧化防御系统的一些抗氧化酶如过氧化物酶(POD)、

收稿日期: 2010-05-24; 修订日期: 2010-10-09

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2010572); 国家自然科学基金项目(20577021)

作者简介: 徐向华(1977~), 女, 博士, 主要研究方向为污染土壤修复及生态毒理, E-mail: xianghua_xu@163.com

* 通讯联系人, E-mail: ekxr@nju.edu.cn

超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等都已 在环境污染评价中得到了广泛的应用和良好验证, 可作为污染土壤诊断的敏感生物标志物^[2, 8, 9]. 另外,有研究表明,污染物可诱导生物体内活性氧的累积进而引发或加剧膜脂过氧化,其产物如丙二醛(MDA)含量与化学污染物等存在明显的剂量-效应关系,也可用于土壤污染诊断^[8-10].

目前有关植物对单一污染物的抗氧化等生理生化响应的研究较多,而对复合污染的响应及作用机制研究相对较少. 重金属和多环芳烃是土壤环境中 2 类重要污染物,往往同时或先后进入土壤形成复合污染,本实验以重金属镉和多环芳烃菲为目标污染物,研究玉米幼苗叶片的抗氧化酶等生理生化指标对镉-菲复合污染的响应,探讨其作为土壤复合污染早期诊断的生物标志物的可行性,以期为土壤复合污染生态环境风险评价提供一定的理论依据.

1 材料与方法

1.1 实验材料

仪器设备:J₂-HS 高速冷冻离心机(Beckman 公司);Z-81001 型原子吸收分光光度计(Hitachi 公司);岛津 UV-220 型分光光度计;850 型光栅荧光分光光度计(Hitachi 公司).

主要试剂:小牛血清蛋白(BSA)(分析纯)购自 Sigma 公司;菲购自 Fluka 公司产品,纯度为 99%;其它试剂均为国产分析纯或优级纯.

1.2 实验处理

盆栽实验在室内温室开展,供试作物为玉米,供试土壤取自南京中山陵,基本理化性质如下:pH 5.4,有机质 1.66%,总镉含量 0.048 mg/kg,土样风干后过 3 mm 筛备用. 镉的用量为 5 个水平,以 Cd²⁺计,分别为 0、1、10、20、50 mg/kg,以 CdCl₂ 溶液

形式加入,记作 Cd0、Cd1、Cd10、Cd20、Cd50;菲的用量为 3 个水平,分别为 0、3、50 mg/kg,记作 Phen0、Phen3、Phen50. 实验采用完全设计,共 15 个处理,每个处理 3 个重复. 充分混匀后放置陈化,每天及时补充水分,保持土壤相对含水率为最大田间持水量的 60% 左右.

一周后播种,每盆 20 粒(播种前用 30% 次氯酸钠溶液消毒 10 min,用水冲水干净后浸泡 24 h),待出苗后匀至 15 株/盆,整个培养期间维持室内温度白天 25℃,夜间 20℃,每天光照 13 h,光强 400 μmol/(m·s)⁻¹. 幼苗生长 14 d 后收获.

1.3 玉米生理生化指标的测定

叶片脂质过氧化产物丙二醛(MDA)测定参照 Dhindsa 等^[11]的方法. 可溶性蛋白含量测定采用考马斯亮蓝方法^[12]. 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[13],过氧化氢酶(CAT)和过氧化物酶(POD)活性的测定参照 Dhindsa 等^[11]的方法;抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性测定参照 Asada^[14]的方法.

1.4 统计分析

实验结果表示为平均值 ± 标准偏差,采用 SPSS13.0 统计分析软件 LSD 方法进行显著性检验. * 表示显著性差异 $p < 0.05$; ** 表示极显著性差异, $p < 0.01$.

2 结果与分析

2.1 镉、菲单一与复合污染对玉米生长的影响

镉、菲及其复合污染对玉米生物量的影响见图 1. 0~50 mg/kg 镉对玉米地上部分及根系生物量都无显著影响. 低浓度菲(3 mg/kg)对玉米地上部分及根系生物量亦无显著影响,高浓度菲(50 mg/kg)对玉米地上部分生物量无显著影响,但

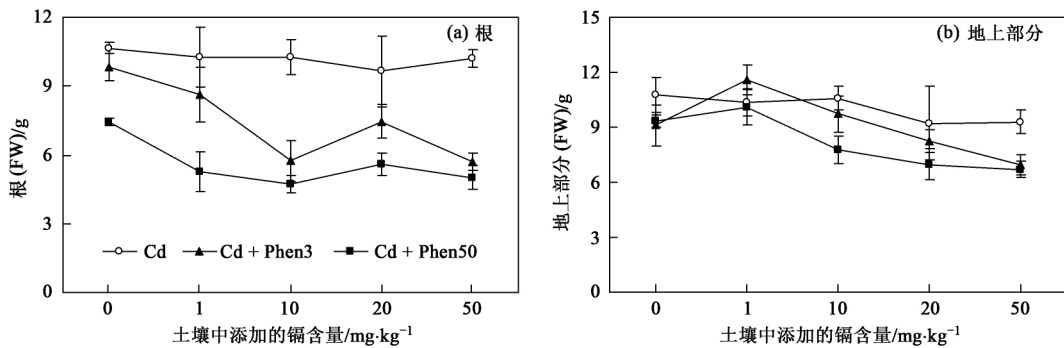


图 1 镉、菲污染对玉米生物量的影响

Fig. 1 Effect of cadmium and phenanthrene on the biomass of maize

根系生物量明显减少,为对照的 69.7%,表明高浓度菲对玉米根系的影响大于对地上部分的影响. 对镉-菲复合污染而言,添加低浓度的菲(3 mg/kg),在镉浓度为 0~20 mg/kg 处理时对玉米地上部生物量无显著影响,在镉浓度为 50 mg/kg 时,玉米地上部生物量显著降低,为对照的 64.5%;添加高浓度菲(50 mg/kg)时,在镉浓度为 0~1 mg/kg 处理时对玉米地上部生物量无显著影响,在镉浓度为 10~50 mg/kg 时,玉米地上部生物量显著降低,为对照的 62.2%~72.0%. 本实验浓度范围内,镉、菲单一处理对玉米地上部分生物量无显著影响,复合污染处理时,玉米地上部分生物量显著降低,表明镉、菲之间存在交互作用. 镉-菲复合污染对玉米根系生物量的影响大于对地上部分生物量的影响,不同镉浓度处理下,添加污染物菲后,玉米根系生物量都显著降低,且高浓度菲(50 mg/kg)的影响大于低浓度菲(3 mg/kg)的影响.

2.2 镉、菲单一与复合污染对玉米 MDA 含量的影响

图 2 显示了镉、菲单一与复合污染对玉米叶片 MDA 含量的影响. 单一镉处理时,玉米叶片的 MDA 含量只在高镉浓度(50 mg/kg)时显著增加,与对照相比,增加了 31.8%;单一菲处理,无论是低浓度菲(3 mg/kg)还是高浓度菲(50 mg/kg)对玉米叶片 MDA 含量都无显著影响;镉-菲复合污染时,不同镉浓度处理下,添加低浓度菲(3 mg/kg)后,MDA 含量只在高镉浓度(50 mg/kg)时显著升高,为对照的 1.27 倍,与不添加菲时镉处理的变化基本一致,表明低浓度菲与镉复合污染对玉米 MDA 含量的影响主要来自于镉的影响;添加高浓度菲(50 mg/kg)时,玉米叶片 MDA 含量在镉浓度为 10~50 mg/kg

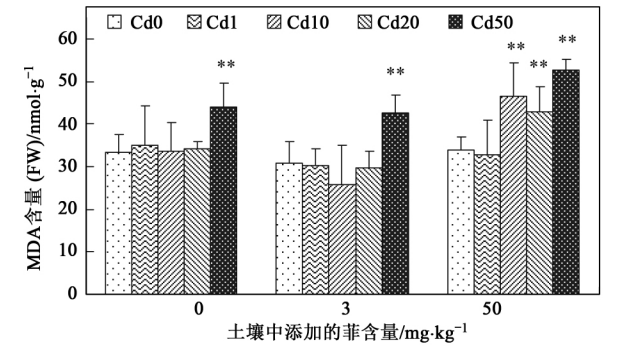


图 2 镉、菲污染对玉米叶片 MDA 含量的影响
Fig. 2 Effect of cadmium and phenanthrene on the contents of MDA in maize leaf

时都显著增加,且在镉浓度为 50 mg/kg 时达到最大,为对照的 1.57 倍,表明高浓度菲与镉复合污染时对玉米叶片 MDA 含量的影响存在一定的交互作用.

2.3 镉、菲单一与复合污染对玉米可溶性蛋白含量的影响

镉、菲处理对玉米叶片可溶性蛋白含量的影响如图 3 所示. 单一镉(0~50 mg/kg)处理和单一菲(3 mg/kg、50 mg/kg)处理对玉米叶片的可溶性蛋白含量无显著影响;镉-菲复合污染处理时,不同镉浓度处理下,添加低浓度菲(3 mg/kg)对玉米叶片可溶性蛋白含量亦无显著影响;添加高浓度菲(50 mg/kg)时,玉米叶片可溶性蛋白含量在镉浓度为 20~50 mg/kg 时都显著降低,为对照的 77.6%~78.6%.

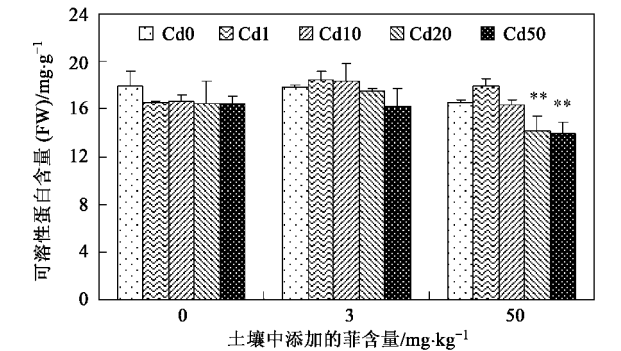


图 3 镉、菲污染对玉米叶片可溶性蛋白含量的影响
Fig. 3 Effect of cadmium and phenanthrene on the contents of soluble protein in maize leaf

2.4 镉、菲单一与复合污染对玉米抗氧化酶活性的影响

图 4 显示了镉、菲处理对玉米叶片抗氧化酶活性的影响. 对 SOD 酶而言,与对照相比,10 mg/kg 镉处理时玉米叶片 SOD 酶活性显著升高,而后随镉处理浓度的增加 SOD 活性又降低,即单一镉处理时, SOD 活性随镉浓度的增加表现为先增加后降低的趋势;单一菲(3 mg/kg、50 mg/kg)处理对玉米叶片的 SOD 活性影响不大;镉-菲复合污染处理时, SOD 活性的变化趋势仍表现为先增加后降低,添加低浓度菲(3 mg/kg)时,玉米叶片 SOD 活性在镉处理为 1 mg/kg 时就被诱导增加,为对照 1.66 倍,随镉处理浓度增加, SOD 酶活性下降,但在镉处理浓度为 10~20 mg/kg 时, SOD 活性仍显著高于对照,镉浓度继续增加为 50 mg/kg, SOD 活性接近于对照;当镉和高

浓度菲50 mg/kg复合污染处理时,SOD 活性在镉浓度为1 mg/kg时显著升高,为对照的 1.53 倍,而后随镉处理浓度的增加 SOD 活性逐渐降低,在镉浓度为

20 ~ 50 mg/kg时,SOD 活性低于对照,表明高浓度菲与镉复合污染的毒性大于低浓度菲与镉复合污染的毒性.

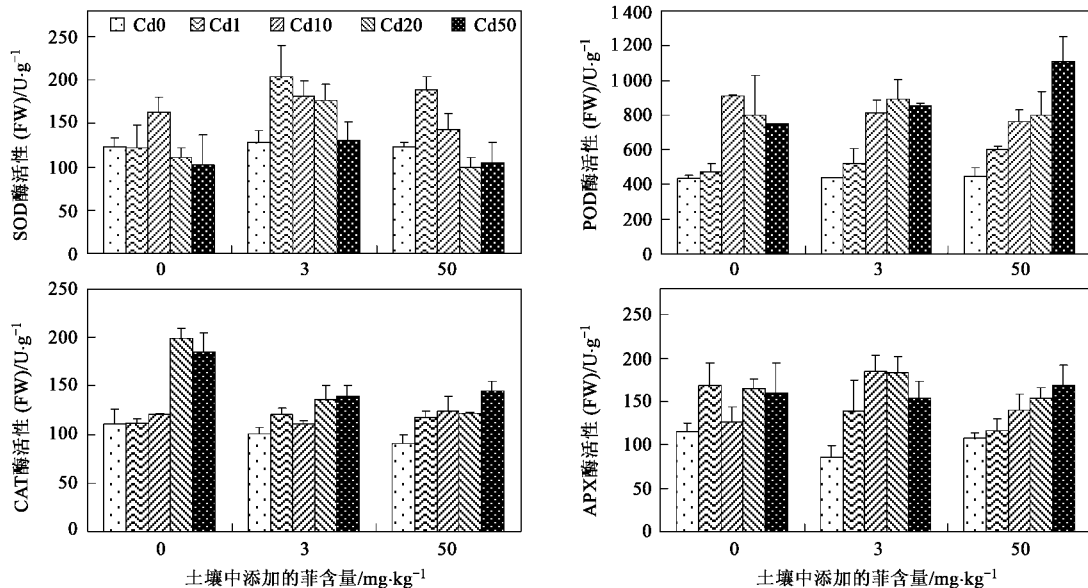


图 4 镉、菲污染对玉米叶片抗氧化酶活性的影响

Fig. 4 Effect of cadmium and phenanthrene on the activity of SOD, POD, CAT and APX in maize leaf

单一镉处理时,与对照相比,在镉处理浓度为 10 ~ 50 mg/kg时,POD 活性显著高于对照;单一菲 (3 mg/kg、50 mg/kg) 处理对 POD 活性影响不大;镉-菲复合污染处理时,添加低浓度菲 (3 mg/kg) 对镉处理无显著影响,POD 活性与单一镉处理时比较变化不大,添加高浓度菲 (50 mg/kg) 对 POD 的影响表现在高镉处理 (50 mg/kg) 时其活性增加.

对 CAT 活性而言,与对照相比,高镉浓度处理时 CAT (20 ~ 50 mg/kg) 活性显著增加;单一菲 (3 mg/kg、50 mg/kg) 处理时,CAT 活性有降低趋势,但差异不显著;镉-菲复合污染处理时,与对照相比,添加菲处理在高镉浓度时 CAT 活性增加,但增加幅度小于对应的单一镉处理时 CAT 活性,表明菲与高镉处理复合污染时毒性增强.

APX 酶活性对镉胁迫响应比较敏感,在 1 mg/kg镉处理时其活性就显著增加,为对照的 1.38 倍,在镉浓度为 1 ~ 50 mg/kg处理时都显著增加;镉-菲复合污染时 POD、CAT、APX 酶活性仍表现为增加趋势.

3 讨论

本实验中,单一镉处理时,SOD 活性表现为先增加后降低的趋势 (图 4). 这主要是由于 SOD 是保

卫植物细胞免受自由基伤害的第一道防线^[15],在低浓度镉胁迫时,作为应激反应的一部分,植物便会合成更多的 SOD 以抵抗外源物质的氧化损伤,所以在低浓度的镉胁迫下,SOD 活性增加;另外,镉可与 SOD 中的金属基团发生作用,SOD 活性会被强烈抑制^[16],或者说,镉通过与酶发生相互作用而改变其蛋白结构,从而改变其功能活性^[17],因此过高浓度的镉可能是干扰到酶结构,从而导致 SOD 酶活性降低. 本研究的结果与 Jin 等^[1]和张蕾等^[18]对镉的生物毒性效应研究结果一致. SOD 酶可将超氧阴离子 ($O_2^{\cdot-}$) 分解为 H_2O_2 和 O_2 ,POD、CAT 和 APX 酶又可将 H_2O_2 催化成为 H_2O 与 O_2 ,从而降低 H_2O_2 的浓度,酶的活性高低与机体内 $O_2^{\cdot-}$ 和 H_2O_2 的累积程度有关^[15]. 本研究中单一镉处理时 SOD 酶活性表现为先增加后降低,表明有 $O_2^{\cdot-}$ 积累,且 SOD 清除增加 $O_2^{\cdot-}$ 的能力有限,而 POD、CAT、APX 活性表现为随镉处理浓度增加而增加的趋势,表明 H_2O_2 的累积还未达到抑制 POD、CAT、APX 活性的程度,因此说 $O_2^{\cdot-}$ 的积累是单一镉胁迫导致玉米受伤害的主要原因. 其中 MDA 便是细胞膜受活性氧伤害的产物之一,细胞膜的受损程度越严重,MDA 含量越高^[10,19]. $O_2^{\cdot-}$ 的积累导致了 MDA 含量的增加 (图 2),但还未对生物量产生影响 (图 1). 菲单一处理

主要是影响根部生物量,并未对玉米各项指标(生物量、MDA、可溶性蛋白、抗氧化酶)有显著影响,这可能与根是直接接触污染物的部位有关,因此受损伤最大,由于菲的降解特性,在土壤和植物体内会大量降解而导致到达叶部的含量相对较少,因此对叶部一些其他指标影响不大;同时也表明本实验浓度范围内,单一菲胁迫还未引起玉米幼苗活性氧的过量积累,其抗氧化酶系统和自由基的累积处于一种动态平衡。

镉-菲复合污染时,菲添加后,SOD 酶活性仍表现为先增加后降低的变化趋势,但与单一镉污染比,SOD 活性在低镉(1 mg/kg)浓度处理时就显著增加,表明镉-菲复合污染后毒性增强,诱导了玉米叶片对污染产生更大的应激作用,从而会对其自身起到更大的保护作用,但在高浓度菲添加后,SOD 活性低于对照,说明此时外源物质对 SOD 酶的破坏作用起主导作用,这与张蕾等^[18]研究结果一致。此结果同时也表明了镉-菲复合污染交互作用的毒性效应与污染物浓度有关,即高浓度菲与镉复合处理的毒性效应高于低浓度的菲与镉复合的毒性效应。镉-菲复合污染,SOD 酶活性降低,表明有 $O_2^{\cdot -}$ 积累,而 POD、CAT、APX 酶活性仍表现为增加趋势,但 CAT、APX 活性和镉单一污染时比较有降低现象,表明复合污染其毒性高于单一镉污染时的毒性效应,且有 H_2O_2 积累,积累的 H_2O_2 和 $O_2^{\cdot -}$ 可生成毒性更强的 $\cdot OH$ ^[15],因此说 $O_2^{\cdot -}$ 和 $\cdot OH$ 的累积是镉-菲复合污染致毒的主要原因。镉-菲复合污染对玉米的毒性效应增强,MDA 累积(图 2)和生物量减少(图 1)的结果也证明了这一点。

生物体内的细胞抗氧化系统是表征生物体健康变化良好的生物标志物^[7, 8],目前已在环境污染评价中得到了广泛的应用^[2, 8, 20],其优势在于能够在生物体表观症状出现之前,在细胞分子水平上灵敏地反应出污染物的毒理学效应^[5]。本研究结果表明,单一镉胁迫时,玉米植株的一些明显症状,如地上生长受到抑制,叶片出现斑点等这些表观症状只有在污染物水平较高(50 mg/kg Cd)时才发生,而玉米叶片抗氧化系统在相对较低浓度时就有变化,特别是 APX 酶活性对镉胁迫响应敏感,在 1 mg/kg 的低镉浓度时就表现出应激响应,因此,玉米叶片的 APX 酶活性有潜力作为土壤镉毒效应的监测指标;同样,镉-菲复合污染时,菲添加后玉米叶片的 SOD 酶的响应有别于单一镉污染时的响应,在低镉浓度(1 mg/kg)时就被显著诱导,较其他指标反映灵敏,

因此 SOD 酶活性有潜力作为土壤镉-菲复合污染的毒性效应的监测指标。本研究结果显示,不同的抗氧化酶对不同污染物胁迫的响应是不同的,这种响应差异可能与不同污染物的致毒途径之间存在一定的关系^[21, 22],同时,抗氧化系统酶活性也会因受胁迫受体的种类、生长阶段、以及胁迫浓度和暴露时间不同而不同^[23]。因此,有关植物抗氧化系统生物标志物在土壤污染监测和评价中的应用时,最好能够把化学分析的结果与生物体的毒理学其他响应指标结合起来综合考虑。

4 结论

(1) 镉-菲复合污染存在交互作用,其毒性效应大小与浓度有关,高浓度菲与镉复合污染的毒性效应高于低浓度菲与镉复合污染的毒性效应,且复合污染的毒性效应高于单一污染的毒性效应; $O_2^{\cdot -}$ 的累积是单一镉胁迫导致玉米受伤害的主要原因, $O_2^{\cdot -}$ 和 $\cdot OH$ 累积是镉-菲复合污染致毒的主要原因。

(2) 不同的抗氧化酶对不同污染胁迫的响应不同,其中,APX 对单一镉胁迫响应比其他指标敏感,SOD 对镉-菲复合污染响应敏感,二者有潜力作为土壤污染评价的生物标志物指标,但实际应用中还应结合化学分析和其他毒理学指标综合考虑。

参考文献:

- [1] Jin X, Yang X, Islam E, et al. Effects of cadmium on ultrastructure and antioxidative defense system in hyperaccumulator and non-hyperaccumulator ecotypes of *Sedum alfredii* Hance [J]. Journal of Hazardous Materials, 2008, **156**: 387-397.
- [2] 汪承润,王晓蓉,于红霞,等. 运用蚕豆幼苗叶片生物标志物评价铅污染土壤[J]. 环境科学, 2008, **29**(11): 3246-3251.
- [3] Seebba F, Arduini I, Ercoli L, et al. Cadmium effects on growth and antioxidant enzymes activities in *Miscanthus sinensis* [J]. Biologia Plantarum, 2006, **50**(2): 688-692.
- [4] Folkesson L, Andersson-Bringmark E. Impoverishment of vegetation in a coniferous forest polluted by copper and zinc [J]. Canadian Journal of Botany, 1988, **66**: 417-428.
- [5] Liu X, Zhang S, Shan X, et al. Combined toxicity of cadmium and arsenate to wheat seedlings and plant uptake and antioxidative enzyme responses to cadmium and arsenate co-contamination [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, **68**(2): 305-313.
- [6] Handy R D, Galloway T S, Depledge M H. A proposal for the use of biomarkers for the assessment of chronic pollution and in regulatory toxicology [J]. Ecotoxicology, 2003, **12**: 331-343.
- [7] 王晓蓉,罗义,施华宏,等. 分子生物标志物在污染环境早

- 期诊断和生态风险评估中的应用[J]. 环境化学, 2006, **25**(3): 320-325.
- [8] Klumpp G, Furlan C M, Domingos M, *et al.* Response of stress indicators and growth parameters of *Tibouchina pulchra* Cogn. exposed to air and soil pollution near the industrial complex of Cubatão, Brazil [J]. Science of the Total Environment, 2000, **246**(1): 79-91.
- [9] Dong B, Sang W, Jiang X, *et al.* Effects of aluminum on phymological metabolism and antioxidant system of wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. Chemosphere, 2002, **47**(1): 87-92.
- [10] 王兴明, 涂俊芳, 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.
- [11] Dhindsa R S, Dhinsa P P, Thorpe T A. Leaf senescence correlated with increased levels of membrane permeability and lipid-peroxidation and decreased levels of superoxide dismutase and catalase [J]. Journal of Experimental Botany, 1980, **32**: 127-132.
- [12] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [13] Cakmak I, Strboe D, Marschner H. Activities of hydrogen peroxide scavenging enzymes in germinating wheat seeds [J]. Journal of Experimental Botany, 1993, **44**: 127-132.
- [14] Asada K. Chloroplasts: formation of active oxygen and its scavenging [J]. Methods Enzymol, 1984, **105**: 422-429.
- [15] Schutzenubel A, Polle A. Plant responses to abiotic stress: heavy metal induced oxidative stress and protection by mycorrhization [J]. Journal of Experimental Botany, 2002, **53**: 1351-1365.
- [16] Casalino E, Calzaretti G, Sblano C, *et al.* Molecular inhibitory mechanism of antioxidant enzymes in rat liver and kidney by cadmium [J]. Toxicology, 2002, **179**(1): 37-50.
- [17] Nagaraj M, Sunitha S, Varalakshmi P. Effect of lupeol, apentacyclic triterpene on the lipid peroxidation and antioxidant status in rat kidney after chronic cadmium exposure [J]. Journal of Applied Toxicology, 2000, **20**(5): 413-417.
- [18] 张蕾, 周启星, 孙福红, 等. 麝香酮和镉单一与复合污染对金鱼藻的生态毒理效应研究[J]. 生态毒理学报, 2009, **4**(4): 507-515.
- [19] Dong J, Wu F, Zhang G. Influence of cadmium on antioxidant capacity and four microelement concentrations in tomato seedlings (*Lycopersicon esculentum*) [J]. Chemosphere, 2006, **64**: 1659-1666.
- [20] Wang C, Wang X, Tian Y, *et al.* Oxidative stress, defence response and early biomarkers for lead-contaminated soil in *Vicia faba* seedlings [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2008, **27**(4): 970-977.
- [21] 王悠, 姜爽, 赵晓玮, 等. 2种有机污染物对鲈鱼生化标志物系统的影响及作用评价[J]. 环境科学, 2010, **31**(3): 801-807.
- [22] Ahmad I, Pacheco M, Santos M A. Enzymatic and monenzymatic antioxidants as an adaptation to phagocyte-induced damage in *Anguilla anguilla* L. following in situ harbor water exposure [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2004, **57**: 290-302.
- [23] Sun F, Zhou Q. Oxidative stress biomarkers of the polychaete *Nereis diversicolor* exposed to cadmium and petroleum hydrocarbons [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2008, **70**(1): 106-114.