

陈博阳,余彬彬,钱晓晴,等. 锌和土霉素胁迫对玉米种子发芽和幼苗抗氧化酶活性的影响[J].江苏农业学报,2017,33(1):13-18.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2017.01.003

锌和土霉素胁迫对玉米种子发芽和幼苗抗氧化酶活性的影响

陈博阳^{1,2}, 余彬彬^{1,2}, 钱晓晴^{1,2}, 王 露^{1,2}, 罗 涛^{1,2}, 张振华^{1,3}

(1.江苏省环境材料与环境工程重点实验室,江苏 扬州 225127; 2.扬州大学环境科学与工程学院,江苏 扬州 225127; 3.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所,江苏 南京 210014)

摘要: 为了研究抗生素和重金属复合胁迫对玉米的毒性机制及环境健康风险,本研究以玉米(*Zea mays* L.)为材料,用低浓度锌(Zn)和土霉素(OTC)溶液培养玉米种子发芽,另外将健康玉米幼苗置于加入低浓度锌和土霉素的营养液中以水培的方式培养,研究Zn与OTC复合胁迫对玉米种子发芽和幼苗抗氧化系统的影响。结果表明,OTC和Zn单一胁迫时,对玉米种子发芽率影响不显著。而OTC和Zn复合处理能够显著促进玉米种子发芽率。各浓度OTC和Zn单一胁迫处理对玉米幼苗抗氧化酶活性的影响均为先升高后下降,Zn的加入可以减轻OTC对玉米幼苗的毒害作用。

关键词: 土霉素; 锌; 复合胁迫; 抗氧化系统

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2017)01-0013-06

Zinc and oxytetracycline stress effects on maize germination and seedling antioxidant system

CHEN Bo-yang^{1,2}, YU Bin-bin^{1,2}, QIAN Xiao-qing^{1,2}, WANG Lu^{1,2}, LUO Tao^{1,2}, ZHANG Zhen-hua^{1,3}

(1. The Key Laboratory of Environmental Material and Engineering of Jiangsu Province, Yangzhou 225002, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225127, China; 3. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to study the toxicity mechanism and environmental health risks about antibiotics and heavy metals compound stress on corn, maize (*Zea mays* L.) seedlings were used as materials, and the method of hydroponic cultivation with low concentration of zinc (Zn) and oxytetracycline (OTC) was applied to treat maize seed. Effect of compound pollution between Zn and OTC on maize germination and seedling antioxidant system was studied. The results showed that the single stress of OTC and Zn had no significant influence on the seed germination rate of maize, but their combined stress could significantly improve the germination rate of maize seeds. The antioxidant enzyme activities of maize seedlings increased first and then decreased under all concentrations of OTC and Zn, and the addition of Zn could reduce the toxic effects of OTC on

maize seedlings.

Key words: oxytetracycline; zinc; combined stress; antioxidant system

收稿日期:2016-03-07

基金项目:江苏省扬州市自然科学基金青年科技人才项目(YZ2014053);江苏省自然科学基金青年科技人才项目(BK20150452);江苏省普通高校研究生实践创新计划项目(SJLX15_0673)

作者简介:陈博阳(1992-),男,江苏常州人,硕士研究生,主要从事农业资源利用研究。(E-mail)329706371@qq.com。

通讯作者:余彬彬(1979-), (E-mail) bbyu@yzu.edu.cn。

四环素类抗生素是广泛使用的一类人畜共用药物,用量约占中国抗生素消耗总量的14%^[1]。土霉素(Oxytetracycline, OTC)在四环素类抗生素使用中所占的比例比较大,常被作为饲料添加剂,以便预防

动物疾病和促进动物生长。抗生素作为兽药和饲料添加剂在动物体内难以被动物肠胃吸收,大部分抗生素以原形或其代谢产物随尿粪等形式排出体外^[2-5]。锌是动植物生长的必需元素,被称为“生命元素”。随着畜牧水产业的迅猛发展,锌作为动物生长的必需元素,在提高畜禽繁殖和免疫能力等方面起着极其重要的作用^[6-8]。锌在饲料中作为添加剂被广泛使用,加之动物机体对其吸收利用率低,使大部分锌积累在畜禽粪便中。随着养殖业的规模化发展,为了促进动物生长和提高饲料的利用率,在饲料中添加重金属和抗生素药物非常普遍,这些重金属、抗生素残留在禽畜粪便中并通过还田进入到土壤,长期施用这类畜禽粪便对植物-土壤系统可能构成威胁^[9-10],给生态环境带来严重危害。在正常情况下,植物体内的活性氧产生和清除处于一种动态平衡状态,当植物处于逆境条件下,这种动态平衡遭到破坏,抗氧化酶系统活性下降,造成活性氧大量积累,对细胞造成伤害^[11-12]。因此,施用含有锌和土霉素的粪便或用含有锌和土霉素的水灌溉可能会对农作物产生一定的毒害作用^[13]。由于自然环境中抗生素和重金属的浓度较低,因此本研究以玉米幼苗为研究对象,采用较低浓度的抗生素和重金属,用水培的方式,研究锌与土霉素复合胁迫对玉米发芽和幼苗抗氧化酶系统的影响,为探讨重金属和抗生素复合胁迫对玉米的毒性机制及环境健康风险评价积累基础资料。

1 材料与方法

1.1 试验材料

本试验所用盐酸土霉素(含量 $\geq 95\%$)为 BBI LIFE SCIENCE 公司生产,其他药品均由国药集团化学试剂有限公司生产;所用的玉米品种为江苏明天种业科技有限公司生产的苏玉 20。培养用盆为塑料盆(500 mm \times 380 mm \times 250 mm),上层覆盖不透光的规格为 520 mm \times 400 mm \times 6 mm 的 PVC 板材,板材打有直径为 25 mm 的小孔,将玉米幼苗茎部用海绵包裹后插入小孔固定培养。

1.2 试验设计

试验浓度设计如下:(1)对照组(CK);(2)OTC、Zn 单一胁迫处理浓度均设置为 10 mg/L、20 mg/L、30 mg/L、40 mg/L;(3)Zn 和 OTC 复合胁迫处理设置为 Zn 10 mg/L+OTC 10 mg/L、Zn 20 mg/L+

OTC 20 mg/L、Zn 30 mg/L+OTC 30 mg/L、Zn 40 mg/L+OTC 40 mg/L 4 个水平,重复 3 次。

选取籽粒饱满无残缺的玉米种子,于 3% H_2O_2 消毒 15 min 后,用蒸馏水冲洗干净,放入装满蒸馏水的大烧杯中浸泡 12 h。在干净的直径为 15 cm 的培养皿底部铺 2 层滤纸,分组编号后按组分别加入不同浓度的 OTC、Zn 及其混合溶液,分别加入 20 粒种子在培养皿中,在培养箱中(25 $^{\circ}C$)进行培养,定期补充溶液,使各处理土霉素、锌浓度维持不变。每个处理重复 3 次,每隔 24 h 调查发芽数,7 d 后计算各处理种子的发芽率。

玉米种子经 3% H_2O_2 消毒 15 min,蒸馏水冲洗干净后置于 25 $^{\circ}C$ 下催芽。选发芽一致的种子,播于塑料网篮中,网篮置于盛有蒸馏水的培养盆中,在室温下自然光照培养。待幼苗长至一叶一心时,选长势良好且一致的幼苗转移到含 1/4 Hoagland 营养液的培养盆中继续培养 2 d,再进行 Zn、OTC 单一胁迫和 Zn 和 OTC 复合胁迫处理。每个处理于 1 个塑料盆中种植玉米幼苗 35 株,在塑料盆中加入 35 L 1/4 Hoagland 营养液后,加入胁迫物质使培养液到达胁迫浓度开始培养。单一胁迫和复合胁迫处理的玉米幼苗,分别在 0 h、4 h、8 h、12 h、24 h、48 h、72 h、96 h 时取样,测定玉米幼苗叶片中丙二醛(MDA)含量和超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。

1.3 测定方法

发芽率 = 7 d 后发芽种子数/供试种子数 $\times 100\%$,超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光还原法^[14]测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法^[15]测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用紫外吸收法^[15]测定,丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸(Thiobarbituric acid, TBA)法^[16]测定。

1.4 数据分析与统计方法

所得数据用 Microsoft Excel 2007 软件进行处理和绘图。

2 结果与分析

2.1 OTC 和 Zn 胁迫对玉米发芽率的影响

由表 1 可知,OTC 浓度为 10 mg/L 和 20 mg/L 时,玉米发芽率低于 CK,但差异不显著。OTC 浓度为 30 mg/L 和 40 mg/L 时,发芽率高于 CK,OTC 浓度

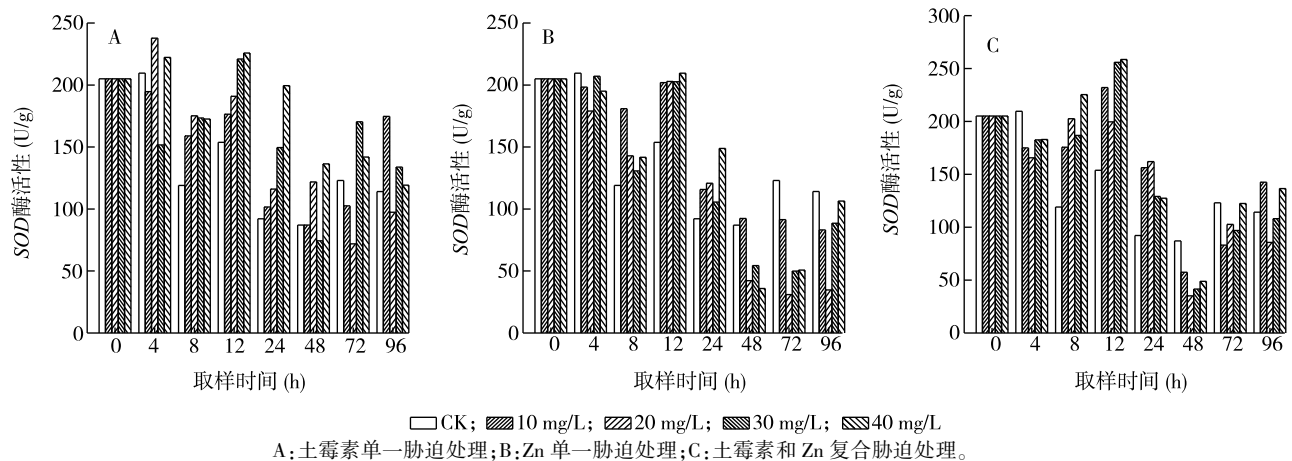
为 30 mg/L 处理的发芽率与对照差异显著。Zn 处理浓度为 10 mg/L 和 20 mg/L 时, 发芽率低于 CK, 差异不显著; 浓度为 30 mg/L 和 40 mg/L 时, 发芽率高于 CK, 差异均不显著; Zn 和 OTC 复合胁迫处理发芽率均高于 CK, 浓度为 20 mg/L、30 mg/L 和 40 mg/L 时玉米发芽率均显著高于 CK。结果表明, OTC 和 Zn 单一胁迫时, 对玉米发芽率无明显影响; 在 Zn 和 OTC 复合胁迫处理中, 除 10 mg/L 处理外, 其余各处理对玉米发芽率均有显著促进作用。

表 1 OTC、Zn 单一胁迫与 Zn 和 OTC 复合胁迫对玉米发芽率影响
Table 1 Effects of single and combined stress of OTC and Zn on germination rate of maize

浓度 (mg/L)	发芽率 (%)		
	OTC 处理	Zn 处理	Zn + OTC 处理
0	80±5bc	80±5ab	80±5c
10	77±3c	73±10b	87±3bc
20	77±3c	77±14ab	95±5a
30	95±4a	92±3a	88±5ab
40	90±10ab	85±5ab	93±3ab

2.2 OTC 和 Zn 胁迫对玉米幼苗叶片超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的影响

由图 1A 可知, 在 OTC 单一胁迫下, 玉米幼苗叶片中 SOD 活性随着取样时间变化总体上为下降趋势; OTC 浓度为 30 mg/L 处理的 SOD 活性波动较大, 表明 SOD 对 30 mg/L 的 OTC 响应比较敏感。图 1B 显示, Zn 单一胁迫处理中, SOD 活性随取样时间变化总体上为下降趋势, 与 CK 的趋势相对一致, 在 8 h 到 24 h, 各处理 SOD 活性均高于 CK, 表明 Zn 胁迫使玉米幼苗叶片 SOD 活性提高以应对胁迫状态; 在 48 h 后, Zn 单一胁迫各处理玉米幼苗叶片中 SOD 活性均低于 CK。图 1C 显示, Zn 和 OTC 复合胁迫处理中, 玉米幼苗叶片中 SOD 活性随取样时间变化总体为下降趋势, 复合胁迫各处理在 8 h 到 12 h SOD 活性均高于 CK, 表明在此阶段 Zn 和 OTC 复合胁迫使玉米 SOD 活性提高, 在 48 h 后各复合胁迫处理 SOD 活性低于 CK。各处理 SOD 活性随取样时间变化趋势与 CK 大致相同, 各处理均在试验前期对 SOD 活性产生促进作用, 试验后期开始抑制 SOD 活性, 表明试验前期 SOD 抗氧化酶系统为激活状态, 在试验后期为未激活状态。



2.3 OTC 和 Zn 胁迫对玉米幼苗叶片过氧化物酶 (POD) 活性的影响

由图 2A 中可见, OTC 单一胁迫下, 玉米幼苗叶片中 POD 活性随取样时间变化总体为下降趋势, 在 72 h 后 OTC 各处理的 POD 活性均低于 CK, OTC 浓度为 10 mg/L 时, POD 活性波动较大, 表明 POD 对 10 mg/L OTC 响应较敏感。由图 2B 中可见, Zn 单

一胁迫下, 玉米幼苗叶片 POD 活性随取样时间变化趋势为先升高后下降, 各浓度 Zn 处理的 POD 活性在 CK 上下波动较大。在 Zn 和 OTC 复合胁迫下 (图 2C), 玉米幼苗叶片中 POD 活性变化趋势为下降, 48 h 后, 所有复合胁迫处理的 POD 活性均低于 CK。各处理 POD 活性随取样时间变化与 CK 的变化趋势大致相同。

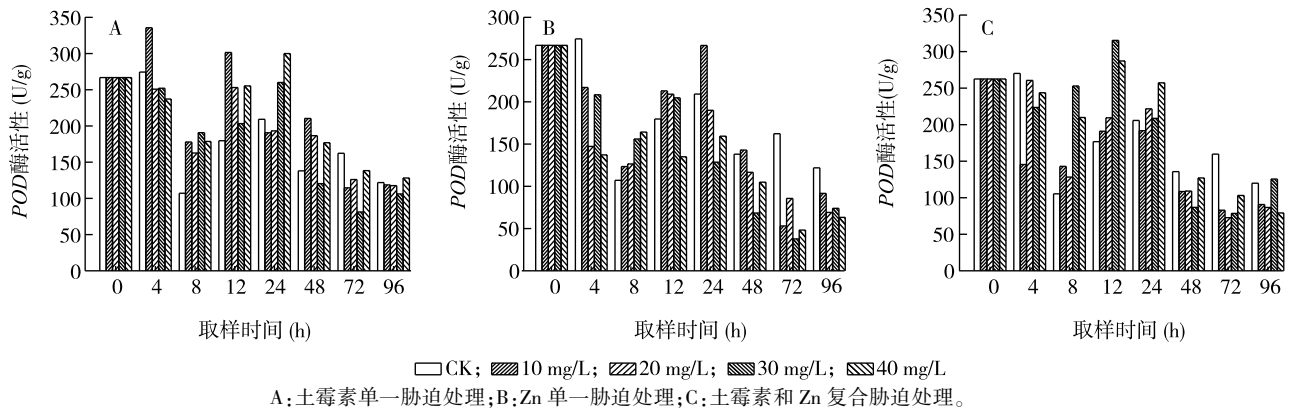


图 2 锌和土霉素胁迫对玉米幼苗中 *POD* 活性的影响

Fig.2 Effects of zinc and oxytetracycline stress on *POD* activity of maize seedlings

2.4 OTC 和 Zn 胁迫对玉米幼苗叶片过氧化氢酶 (*CAT*) 活性的影响

由图 3A 可知,OTC 单一胁迫时,玉米幼苗叶片中 *CAT* 活性随时间变化趋势为先下降后趋于平稳,在 12 h 时,各 OTC 处理 *CAT* 活性均低于 CK,12 h 后,各 OTC 处理 *CAT* 活性均高于 CK,说明 OTC 的加入对 *CAT* 活性影响为先降低后提高。图 3B 显示,Zn 单一胁迫时,玉米幼苗叶片中 *CAT* 活性随时间变化而下降,在 8 h

后各 Zn 处理 *CAT* 活性均低于 CK 的 *CAT* 活性。在 Zn 和 OTC 复合胁迫处理中,玉米幼苗叶片中 *CAT* 活性随时间变化的趋势相对稳定,在 24 h 后各处理 *CAT* 活性在 CK 上下浮动(图 3C)。OTC 单一胁迫处理试验后期 *CAT* 抗氧化酶防御系统仍为激活状态,说明 *CAT* 酶活性对 OTC 的反应较大。Zn 和 OTC 复合胁迫处理,*CAT* 活性在试验后期在 CK 上下浮动,说明 Zn 的加入减轻了 OTC 对于玉米的毒害作用。

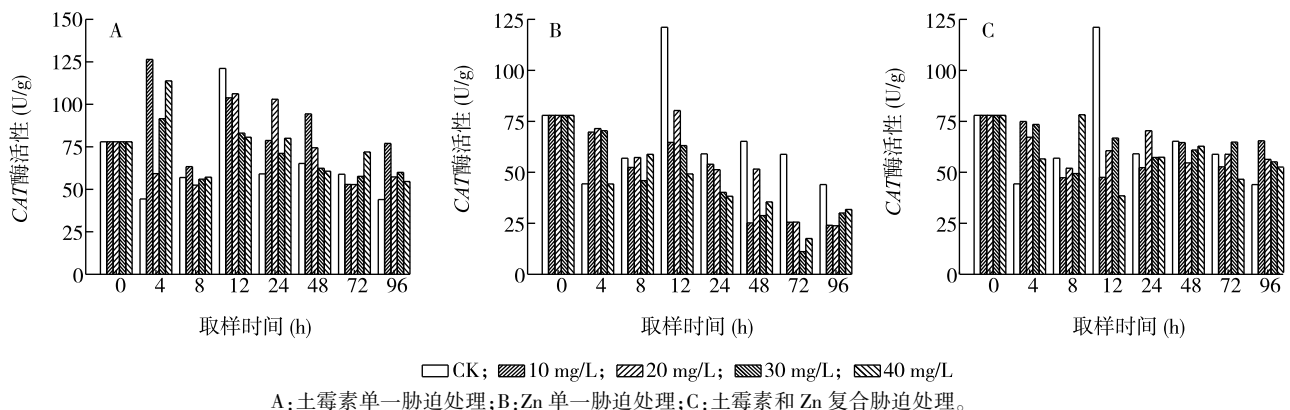


图 3 锌和土霉素胁迫对玉米幼苗中 *CAT* 活性的影响

Fig.3 Effects of zinc and oxytetracycline stress on *CAT* activity of maize seedlings

2.5 OTC 和 Zn 胁迫对玉米幼苗叶片丙二醛 (MDA) 含量的影响

由图 4A 可知,OTC 单一胁迫时,玉米幼苗叶片中 MDA 含量随时间变化趋势为先下降后上升再下降,在 4 h 时 MDA 含量为最高,可能是由于处理初期为玉米幼苗对处理的适应阶段,对逆境反应敏感,在 4 h 到 48 h,各处理 MDA 含量均高于 CK,72 h 后,各处理 MDA 含量均低于 CK。Zn 单一胁迫时

(图 4B),玉米幼苗叶片中 MDA 含量随时间变化的趋势为下降。Zn 和 OTC 复合胁迫时(图 4C),玉米幼苗叶片中 MDA 含量随时间变化趋势为下降,各处理 MDA 含量在 48 h 后均低于 CK。OTC 对玉米幼苗毒害较大,所以在试验中期玉米幼苗膜脂过氧化水平较高,Zn 对于玉米幼苗毒害较小。而 Zn 和 OTC 复合胁迫时 Zn 能减轻 OTC 对于玉米幼苗的毒害作用。

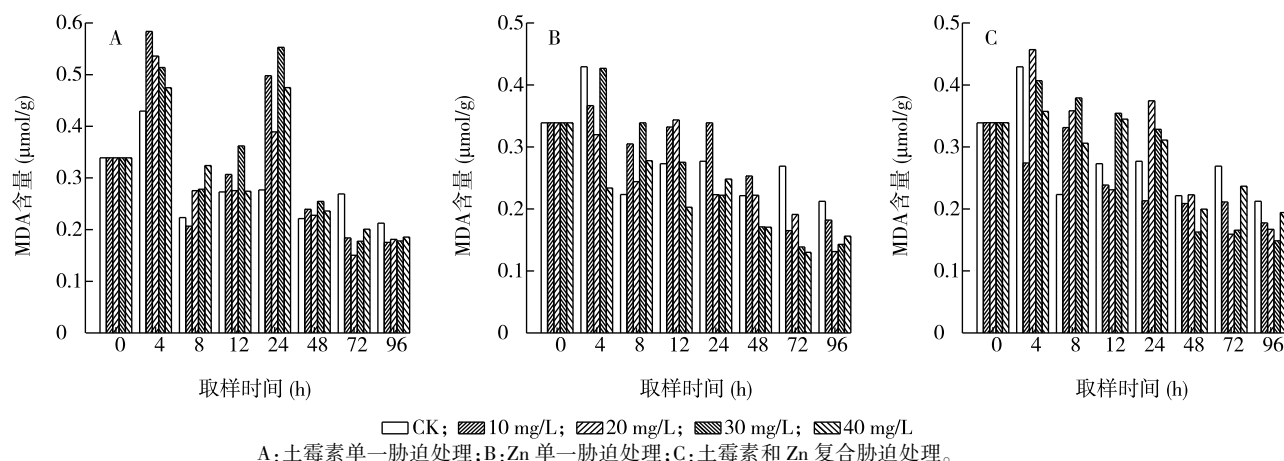


图 4 锌和土霉素胁迫对玉米幼苗中 MDA 含量的影响

Fig.4 Effects of zinc and oxytetracycline stress on content of MDA of maize seedlings

3 讨论

在 Zn 和 OTC 复合胁迫处理中,各处理对玉米发芽率均有促进作用,且除 10 mg/L 处理外其余处理对玉米发芽均有显著促进作用。这与 Zn 和 OTC 胁迫会降低青菜种子发芽率的研究结果^[13]不同,原因为本试验采用的胁迫浓度较低,处于对种子发芽的促进阶段,未达到抗生素和重金属对种子产生毒害的阈值。

SOD 是植物保护系统中的重要酶之一,在植物抵抗外界环境胁迫中起着非常重要的作用。在抗氧化酶系统中,SOD 处于第一道防线,它能催化新陈代谢中产生的超氧阴离子自由基歧化为 O_2 和 H_2O_2 , H_2O_2 可以产生氧化能力更强的羟自由基和单线态分子氧,对细胞造成很大的伤害。在本研究初期,各浓度的 OTC、Zn 单一胁迫以及 Zn 和 OTC 复合胁迫对玉米幼苗叶片内 SOD 影响均为促进,说明玉米体内所具有的防御机制和具有抗性特征的生理活动被刺激而加快,SOD 活性升高以应对体内超氧阴离子的增加以免细胞受损,随着时间的推移,玉米幼苗逐渐适应了各处理的环境胁迫,SOD 活性下降,说明各处理前期对玉米幼苗产生毒害作用,当玉米适应处理环境后开始促进玉米幼苗生长,与盐酸左氧氟沙星对玉米种子萌发及抗氧化酶系统的影响研究得出的抗生素对玉米幼苗 SOD 活性表现出低浓度促进的结论^[17]一致,与 Cd、Zn 复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响所得的 Zn 对玉米幼苗 SOD 活性表现出低浓度促进的结论^[18]也一致。本研究中同浓度 Zn

和 OTC 复合胁迫处理的 SOD 活性下降到 CK 水平以下的时间要早于 OTC 单独处理,表明 Zn 的加入可以减轻 OTC 对玉米幼苗的毒害作用。Zn 和 OTC 胁迫青菜的抗氧化酶系统研究中,SOD 活性的变化规律^[13]与本试验不一致,Zn 和 OTC 的胁迫会使青菜 SOD 活性低于而不是高于 CK,原因为不同作物所能承载的负氧离子浓度阈值不同,从而导致抗氧化酶系统激活的程度不同导致。

POD、CAT 也是植物抗氧化保护酶系统中的重要酶,在抗氧化酶系统中,POD 和 CAT 催化 H_2O_2 形成 H_2O 而阻止 H_2O_2 在体内的积累,减少活性氧对脂膜的过氧化作用^[19-20],其活性大小反映了植物生长条件的好坏。逆境胁迫能诱导植物组织中 POD 和 CAT 活性升高,这是植物对所有逆境胁迫的共同响应。本试验初期,各处理对玉米幼苗叶片中 POD 和 CAT 产生促进作用,在盐酸左氧氟沙星对玉米种子萌发及抗氧化酶系统的影响研究和 Cd、Zn 复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统影响的研究中,研究结论为低浓度的抗生素和 Zn 对于玉米幼苗 POD 和 CAT 活性有促进作用^[17],这与本试验结论一致,而 Pb 对小麦的 POD 活性影响一直呈上升趋势^[21],且被激活程度最大,原因为不同作物对不同重金属的胁迫响应程度不同。试验后期各处理 POD 和 CAT 活性均低于 CK,Zn 处理较 OTC 处理提前使 POD 和 CAT 活性低于 CK,表明试验前期 OTC 对玉米幼苗 POD 和 CAT 活性的刺激作用更强,而 Zn 的加入减轻了 OTC 对玉米幼苗的毒害作用,试验后期各处理 POD 活性均低

于CK,说明玉米幼苗适应了各处理环境,玉米幼苗在处理环境中能够正常生长。

MDA含量是植物细胞膜质过氧化程度的体现,MDA含量高,说明植物细胞膜质过氧化程度高,细胞膜受到的伤害严重。一般植物在逆境条件下就会产生膜质过氧化。由膜脂过氧化水平可以看出,试验初期,各处理的MDA含量高于CK,后期低于CK,说明试验后期抗氧化酶系统酶活性下降并不是OTC和Zn超出玉米耐受限度而导致的,而可能是玉米适应了低浓度OTC和Zn,可以在处理环境下正常生长。

本研究中,植物抗氧化酶系统中的SOD、POD和CAT在低浓度重金属和抗生素复合胁迫处理中有较好的抗胁迫能力,与卢信等^[22]、徐勤松等^[23]、Kupper等^[24]的研究结果一致。植物重金属和抗生素伤害及抗性机理十分复杂,其耐受性状可能是由多个基因控制的,但其中关键因子至今尚不清楚。本研究中,SOD、POD、CAT 3种酶变化趋势大致相同,是由于玉米幼苗在低浓度OTC、Zn单一胁迫与Zn和OTC复合胁迫处理初期处于适应阶段,抗氧化酶系统激活,SOD、CAT、POD活性提高,玉米体内的H₂O₂使玉米幼苗膜脂过氧化水平提高,各处理对玉米幼苗产生毒害作用,随着时间推移,抗氧化酶系统逐渐清除了玉米幼苗体内的H₂O₂,使玉米幼苗适应处理环境后膜脂过氧化水平下降,抗氧化酶系统随后关闭,各处理表现出对玉米生长产生促进作用。Zn和OTC复合胁迫处理组中,Zn的加入相比OTC单独处理能提前使玉米幼苗进入促进生长阶段,说明Zn的加入可以减轻OTC对于玉米幼苗的毒害作用。

参考文献:

- [1] XU W H, ZHANG G, LI X D, et al. Occurrence and elimination of antibiotics at four sewage treatment plants in the Pearl River Delta (PRD) South China [J]. Water Research, 2007, 41(19): 4526-4534.
- [2] ELMUND G K, MORRISON S M, GRANT D W, et al. Role of excreted chlortetracycline in modifying the decomposition process in feedlot waste [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1971, 6(2): 129-135.
- [3] GERSEMA L M, HELLING D K. The use of subtherapeutic antibiotics in animal feed and its implications on human health [J]. Drug Intelligence & Clinical Pharmacy, 1986, 20(3): 214-218.
- [4] ADDISON J B. Antibiotics in sediments and run-off water from feedlots [J]. Residue Reviews, 1984, 92(4): 1-28.
- [5] KROKER R. Aspekte zur ausscheidung antimikrobiell wirksamer substanzen nach der chemotherapeutischen behandlung von nutztieren [J]. Wissenschaft und Umwelt, 1983, 34(4): 305-308.
- [6] 孙桂芳, 杨光穗. 土壤-植物系统中锌的研究进展[J]. 热带生物学报, 2002, 8(2): 22-30.
- [7] 盛清凯, 战余铭, 李会荣, 等. 饲料发酵对饲料、猪粪中微量元素形态及粪臭素的影响[J]. 山东农业科学, 2016, 48(3): 106-109.
- [8] 王志武, 孙建钢, 孙锐锋, 等. 微量元素锌的生物学功能及其应用进展[J]. 饲料研究, 2005(8): 12-16.
- [9] 张莹, 魏安智, 杨途熙. 锌胁迫对灰杨幼苗生长和光合特性的影响[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(3): 19-21.
- [10] 赵云香. 铅和镉复合胁迫对小麦保护酶系统的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2005, 25(3): 261-263.
- [11] 周传凤, 郑国生, 张玉喜, 等. 强光胁迫对牡丹叶片抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2011, 39(3): 232-233.
- [12] 范美华, 石戈, 廖智, 等. 稀土元素铈、镧对薄甲藻生长和抗氧化系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(3): 343-346.
- [13] 张春艳. 土霉素与锌胁迫对青菜生长及抗氧化系统酶的影响[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [14] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [15] 孙群, 胡景江. 植物生理学研究技术[M]. 杨凌: 西北农林科技大学出版社, 2005.
- [16] 陈建勋. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [17] 朱健, 龙健, 张明时, 等. 盐酸左氧氟沙星对玉米种子萌发及抗氧化酶系统的影响[J]. 种子, 2009, 28(7): 97-100.
- [18] 刘建新, 赵国林, 王毅民. Cd、Zn复合胁迫对玉米幼苗膜脂过氧化和抗氧化酶系统的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 54-58.
- [19] BOXALL A B A, FOGG L A, BLAEKWELL P A, et al. Veterinary medicines in the environment [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2004, 180(180): 1-91.
- [20] 程昕昕, 刘正. 不同营养元素对甜玉米种子活力及抗氧化指标的影响[J]. 食品工业科技, 2012, 33(18): 121-123, 127.
- [21] 金璘, 袁金萍. 铅对小麦保护酶系统的影响[J]. 江苏农业科学, 2007, 35(2): 225-227.
- [22] 卢信, 罗佳, 高岩, 等. 畜禽养殖废水中抗生素和重金属的污染效应及其修复研究进展[J]. 江苏农业学报, 2014, 30(3): 671-681.
- [23] 徐勤松, 施国新, 王学, 等. 镉、铜和锌胁迫下黑藻活性氧的产生及抗氧化酶活性的变化研究[J]. 水生生物学报, 2006, 30(1): 107-111.
- [24] KUPPER, KUPPER F, SPILLER M. In situ detection of heavy-metal substitution chlorophylls in water plants [J]. Photosynthesis Research, 1998, 58(2): 123-133.

(责任编辑:陈海霞)