六种常见抗生素对小白菜种子萌发及生理特性的影响*

肖明月[1] 安 婧[2**] 纪占华[2,3] 崔 爽[1] 李 萍[1]

([1]辽宁石油化工大学, 辽宁抚顺 113001; [2]中国科学院沈阳应用生态研究所污染生态与环境工程重点实验室, 沈阳 110016; [3]中国科学院大学, 北京 100049)

摘 要 以小白菜为受试生物,研究了6种常用抗生素(四环素、土霉素、金霉素、强力霉素、氯霉素和磺胺二甲嘧啶)对小白菜种子萌发、根(芽)伸长、可溶性蛋白及抗氧化酶系统的毒理效应。结果表明,0.5~5 mg·L^{-1}抗生素胁迫下,小白菜种子的发芽率无显著变化,随着抗生素暴露浓度的增加,小白菜种子的发芽率受到了显著抑制;抗生素暴露浓度与小白菜根(芽)伸长抑制率之间具有良好的剂量效应关系。由抗生素对小白菜根长的半抑制效应浓度(EC_{50})可知,6种抗生素对小白菜种子萌发的毒性大小依次为:磺胺二甲嘧啶>氯霉素>金霉素>四环素>强力霉素>土霉素。实验浓度范围内的抗生素对小白菜幼苗体内可溶性蛋白含量具有显著的诱导效应,且各处理组间差异显著。此外,抗生素的胁迫破坏了小白菜幼苗体内的抗氧化防御系统的平衡。

关键词 抗生素; 小白菜; 毒性效应; 种子萌发; 抗氧化酶

中图分类号 X171.5 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2014)10-2775-07

Toxic effects of six typical antibiotics on seed germination and physiological characteristics of Chinese cabbage. XIAO Ming-yue[1], AN Jing[2**], JI Zhan-hua[2,3], CUI Shuang[1], LI Ping[1] ([1]*Liaoning Shihua University*, *Fushun* 113001, *Liaoning*, *China*; [2]*Key Laboratory of Pollution Ecology and Environmental Engineering*, *Institute of Applied Ecology*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shenyang* 110016, *China*; [3]*University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*). *Chinese Journal of Ecology*, 2014, **33**(10): 2775-2781.

Abstract: Chinese cabbage (*Brassica chinensis* L.) was selected to investigate the toxic effects of six antibiotics (tetracycline, oxytetracycline, chlorotetracycline, doxycycline, chloromycetin and sulfadimidine) on the seed germination, root (shoot) elongation, soluble proteins and antioxidant enzymes of the Chinese cabbage. The results showed that 0.5-5 mg·L^{-1} antibiotics did not inhibit the germination rate, while the seed germination was significantly inhibited with the increasing of antibiotics concentration. There was a good dose-effect relationship between the antibiotic concentration and the inhibition rate of root (shoot) elongation. According to the EC_{50} values of root inhibition of the Chinese cabbage stressed by the antibiotics, the toxicity of the antibiotics was in order of sulfadimidine > chloramphenicol > chlortetracycline > tetracycline > doxycycline > xytetracycline. The contents of soluble proteins of Chinese cabbage induced by the antibiotics were significantly different among the groups. Moreover, the balance of the antioxidant enzyme system of Chinese cabbage seedlings was destroyed by the tested antibiotics.

Key words: antibiotics; Chinese cabbage; toxic effect; seed germination; antioxidant enzyme.

抗生素因具有促进生长和治疗疾病的双重功效而被广泛应用于农牧业生产。但是,由于对经济利益的过分追求和对抗生素的盲目依赖,近年来抗生素的使用量不断提高甚至以不合理的高剂量和高频率使用。据统计,美国每年农牧业生产消耗抗生素达1.1×10^4 t,占其抗生素消耗总量的70%(Kummerer,2003);中国是世界抗生素生产第一大国,

*国家自然科学基金项目(21277150、31370523和41001340)和国家环境保护公益性行业科研专项(201209030)资助。

**通讯作者 E-mail: anjing@iae.ac.cn

收稿日期: 2014-03-09 接受日期: 2014-05-28

2009年我国抗生素产量合计1.4×10^5 t,全世界75%的青霉素工业盐、80%的头孢菌素类抗生素和90%的链霉素类抗生素产于我国(Richardson *et al.*, 2005)。大量的生产和使用导致抗生素通过多种途径进入环境,并通过一系列的物理、化学、生物学过程,对动植物甚至是生态系统和人类健康带来危害。因此,抗生素污染的潜在生态危害问题已经成为国际环境领域普遍关注的热点(Kemper,2008;董璐玺等,2011;Rosendahl *et al.*,2011)。

研究发现,抗生素对植物生长具有显著的毒性效应(Liu *et al.*,2009)。诺氟沙星浓度>1 mg·L^{-1}时,玉米幼苗的生长受到抑制,且敏感指标依次为根重>根长>芽长>芽重(王朋等,2010)。土霉素浓度>5 mg·L^{-1}时,生菜根和叶的生长均受到显著抑制,且其对水分的吸收以及对Fe、Cu、Zn、Mn等微量元素的吸收也受到了抑制(崔馨等,2008);2.4 mg·L^{-1}土霉素暴露21 d可显著抑制小麦幼苗的叶绿素和可溶性蛋白含量,并破坏小麦抗氧化酶系统的平衡(安婧等,2009)。此外,Farkas等(2007)发现,杂豆和玉米对金霉素耐受性的差异与过氧化物酶(POD)和谷胱甘肽转移酶(GST)的表达有关,表明氧化胁迫很有可能是抗生素的植物毒性机理之一,但是这方面还缺少直接的证据。此外,还有很多因素能够影响抗生素类污染物对植物的毒理效应及潜在生态风险,例如,抗生素的结构、植物种类和生长环境等。然而关于这些内容的报道并不多见,开展此类研究十分必要。

基于此,本文以农业生产中常用的抗生素(四环素、金霉素、土霉素、强力霉素、氯霉素和磺胺二甲嘧啶)为研究对象,研究了抗生素对小白菜种子萌发及其体内的可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性的影响,希望由此为抗生素的生态风险评价提供基础的数据依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

实验所用小白菜品种为四季小白菜(*Brassica chinensis* L.),种子购于沈阳东亚种子公司。实验用抗生素为分析纯(纯度≥99.0%),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。

1.2 实验方法

在培养皿中放入2层滤纸,加入新配制的5 mL抗生素溶液,对照中加入5 mL的去离子水。选取饱满、均匀的小白菜种子,经过3%的H_2O_2浸泡10 min后用去离子水冲洗干净。将16粒消毒后的小白菜种子均匀地放在培养皿中,每个处理3个重复。放置种子时,保持种子培根末端和生长方向呈一直线,盖好培养皿,并用胶带封住。将培养皿放入(25±1)℃的培养箱中,保持黑暗。当种子的胚芽和培根长度>2 mm时,认为是种子正常发芽,当对照根长达到20 mm时,培养结束(周启星等,2004)。分别计算处理组的发芽率、芽长及根长抑制率。培养至第7天,测定小白菜芽期的可溶性蛋白含量及抗氧化酶活性。

据预实验中对小麦根长抑制率为10%~60%的抗生素浓度,选择:(1)四环素实验浓度为0、0.5、1、5、10、20、30、40和50 mg·L^{-1};(2)土霉素浓度为0、0.5、1、5、10、20、30、40和50 mg·L^{-1};(3)金霉素浓度为0、0.5、1、5、10、15、20、25和30 mg·L^{-1};(4)强力霉素浓度为0、0.5、1、5、10、20、30、40、50 mg·L^{-1};(5)氯霉素浓度为0、0.5、1、5、10、15、20、25和30 mg·L^{-1};(6)磺胺二甲嘧啶浓度为0、0.5、1、2、4、6、8和10 mg·L^{-1}。

1.3 分析方法

(1)种子发芽抑制率、芽/根伸长抑制率的测定

发芽率=供试种子的发芽数/供试种子数×100%

发芽(根伸长)抑制率=(对照组-处理组)/对照组×100%

(2)可溶性蛋白含量的测定

考马斯亮蓝G-250染色法(李合生,2000)测定可溶性蛋白含量。100 mg考马斯亮蓝G-250溶于50 mL 90%乙醇中,加入100 mL 85%磷酸,用蒸馏水定容至1 L,贮存于棕色瓶中,常温保存。用牛血清白蛋白作标准蛋白质。取6支具塞试管加入试剂混合均匀,5 min后比色测定595 nm下的吸光度,根据不同含量牛血清白蛋白与相应吸光度的关系求得回归方程。用样品提取液代替牛血清白蛋白溶液重复上述计算回归方程的操作。每个处理重复3次,每个重复测定3次。样品中蛋白质含量(μg·g^{-1})$= C \cdot V_T/V_S \cdot W_F$,其中$C$为通过回归方程计算得到的样品中蛋白质含量(μg),V_T为蛋白质样品提取液总体积(mL),V_S为测定时加样量(mL),W_F为样品鲜重(g)。

(3)酶液提取与酶活性测定

取代表性处理幼苗植株0.2 g用去离子水清洗

后,于预冷的4 mL含10% PVP的0.2 mol·L^{-1} pH 6.8 PBS缓冲液中冰浴研磨,然后置于冷冻离心机中4 ℃,10000 r·min^{-1}离心20 min。取上清液用于SOD、POD、CAT酶活性测定。SOD活性用氮蓝四唑光化学还原法测定(李合生,2000),以抑制NBT光化学还原50%的酶量为一个酶活力单位;POD活性的测定用愈创木酚比色法(李合生,2000),以每分钟增加1.0 OD_{470}的酶量为一个酶活力单位;CAT活性采用紫外分光光度法(李合生,2000),以1 min减少0.01 OD_{240}的酶量为一个酶活力单位。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2007软件对数据进行处理和绘图,采用DPS 7.5和SPSS 11.5统计分析软件对数据进行差异显著性检验(LSD法),用英文小写字母表示各处理组间的差异显著性(P<0.05)。

2 结果与分析

2.1 抗生素污染对小白菜种子发芽率的影响

6种抗生素对小白菜种子发芽率的影响如表1所示。当TC≤20 mg·L^{-1};OTC≤10 mg·L^{-1};CTC≤5 mg·L^{-1};DOX≤5 mg·L^{-1};CHL≤20 mg·L^{-1};SMD≤8 mg·L^{-1}时,小白菜种子的发芽率没有显著变化。随着暴露浓度的增加,抗生素开始呈现出对小白菜发芽率的抑制作用,且浓度越大抑制作用越显著。当30 mg·L^{-1} OTC、CTC和CHL以及40 mg·L^{-1} DOX对小白菜种子发芽率的抑制作用与对照相比达到极显著水平。

2.2 抗生素污染对小白菜种子芽伸长和根伸长的毒性效应

如图1所示,实验浓度范围内的6种抗生素对小白菜种子芽伸长和根伸长具有不同程度的影响。0.5~1.0 mg·L^{-1}土霉素、0.5~1.0 mg·L^{-1}强力霉素、0.5 mg·L^{-1}氯霉素对芽长具有一定的促进作用,随着抗生素浓度的增加,小白菜芽长呈现出被抑制的趋势。0.5 mg·L^{-1}四环素、金霉素和磺胺二甲嘧啶开始对小白菜的芽长产生抑制作用,抑制率分别为10.1%、9.0%和2.0%。6种抗生素对小白菜种子根伸长的抑制作用显著高于对芽长的抑制作用。由表2可知,抗生素浓度与芽长和根长抑制率均具有良好的剂量-效应关系。6种抗生素的回归方程中根长的斜率均大于芽长的斜率。根据抗生素对小白菜根伸长的 EC_{50}可知,6种抗生素对小白菜种子萌发的抑制作用从大到小依次为:磺胺二甲嘧啶>氯霉素>金霉素>四环素>强力霉素>土霉素。

2.3 抗生素污染对小白菜幼苗可溶性蛋白含量的影响

6种抗生素暴露7 d对小白菜幼苗体内可溶性蛋白(SP)含量的影响如图2所示。实验浓度范围

表1 抗生素对小白菜种子发芽率的影响

Table 1 Effects of antibiotics on the germination rate of Chinese cabbage

抗生素浓度(mg·L^{-1})	TC发芽率(%)	OTC发芽率(%)	DOX发芽率(%)	抗生素浓度(mg·L^{-1})	CTC发芽率(%)	CHL发芽率(%)	抗生素浓度(mg·L^{-1})	SMD发芽率(%)
0.5	97.6±4.2	97.6±4.2	95.1±7.3	0.5	100±4.2	95.1±12.7	0.5	100±4.2
1	95.1±7.3	97.6±8.4	85.4±4.2	1	95.1±7.3	92.7±4.2	1	97.6±4.2
5	92.7±4.2	92.7±8.4	87.8±7.3	5	82.9±4.2	95.1±7.3	2	95.1±12.7
10	92.7±4.2	90.2±4.2	80.5±7.3*	10	80.5±7.3*	87.8±7.3	4	90.2±16.9
20	92.7±4.2	80.5±7.3*	87.8±7.3	15	78.0±4.2*	92.7±4.2	6	92.7±11.2
30	87.8±7.3*	78.0±4.2**	80.5±7.3*	20	75.6±4.2*	87.8±12.7	8	92.7±8.4
40	85.4±4.2*	75.6±4.2**	75.6±4.2**	25	78.0±11.2*	82.9±4.2*	10	80.5±7.3*
50	85.4±4.2*	68.3±8.4**	70.7±4.2**	30	73.2±12.7**	70.7±8.4**		

*P<0.05;** P<0.01,下同。

表2 抗生素暴露与小白菜种子芽伸长和根伸长抑制率的相关性

Table 2 Correlation between the concentrations of antibiotics and the germination rates of Chinese cabbage

抗生素	芽伸长				根伸长			
	回归方程	R^2	P	LC_{50}	回归方程	R^2	P	LC_{50}
TC	I=0.261C+8.874	0.848	***	157.60	I=0.869C+28.91	0.950	***	24.27
OTC	I=0.243C+0.986	0.719	**	201.70	I=1.536C−2.952	0.944	***	34.47
CTC	I=0.473C+6.584	0.796	***	91.79	I=2.148C+13.24	0.940	***	17.11
DOX	I=0.505C−2.160	0.953	***	103.30	I=1.180C+8.729	0.908	***	34.98
CHL	I=0.672C−0.382	0.847	***	74.97	I=1.923C+21.41	0.907	***	14.87
SMD	I=3.706C+3.506	0.977	***	12.55	I=6.944C+3.542	0.966	***	6.69

** P<0.05,** P<0.01,*** P<0.005,I表示抑制率,C表示抗生素浓度。

内的抗生素均不同程度的诱导了小白菜体内 SP 含量的上升。同一抗生素不同浓度处理组之间的小白菜 SP 含量具有显著差异,即抗生素处理浓度越大,小白菜 SP 含量越高。

2.4 抗生素污染对小白菜幼苗抗氧化防御系统的影响

6 种抗生素污染对小白菜幼苗体内 SOD、POD 和 CAT 3 种典型的抗氧化酶活性的影响如图 3 所示。随着四环素、土霉素、强力霉素和氯霉素浓度的上升,小白菜体内的SOD、POD和CAT酶活性均呈

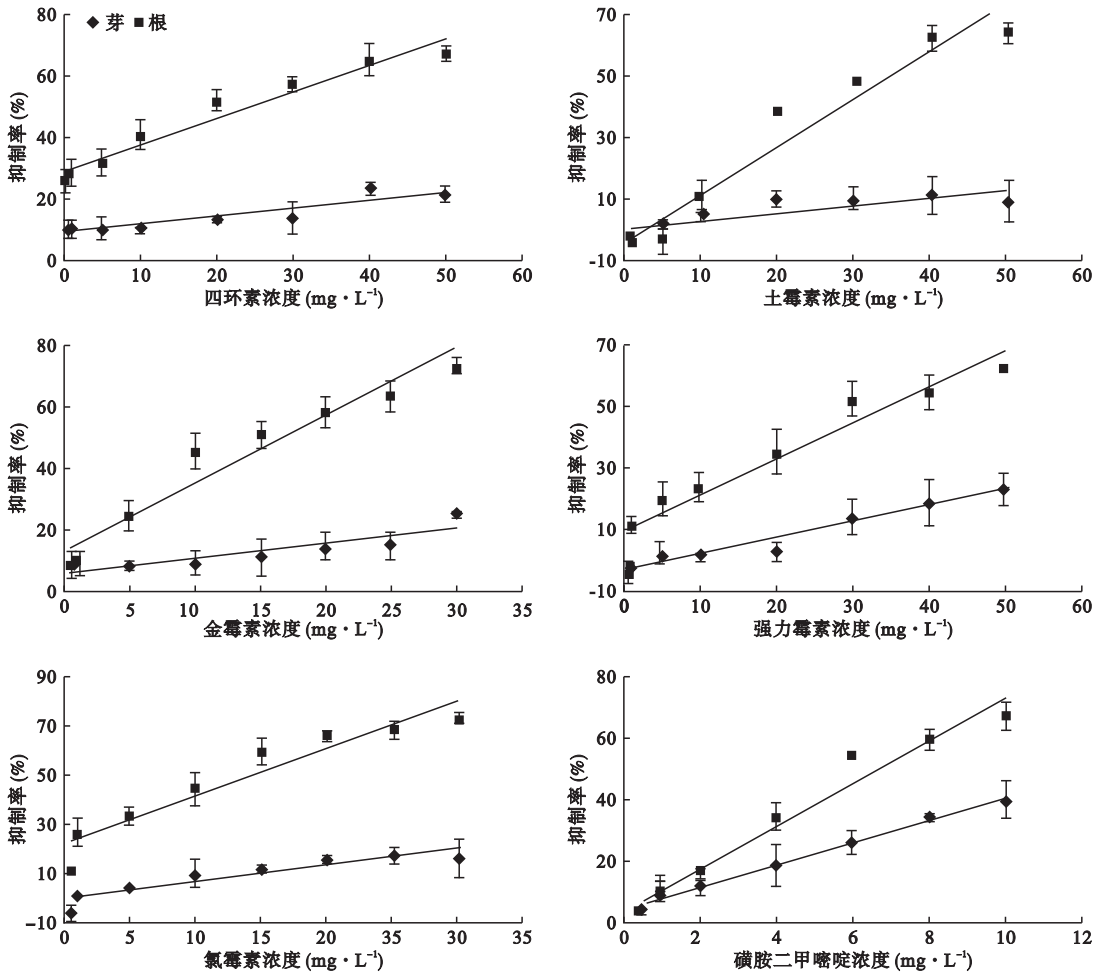


图 1 抗生素对小白菜种子芽长及根伸长的影响

Fig. 1 Effects of antibiotics on shoot and root elongation of Chinese cabbage

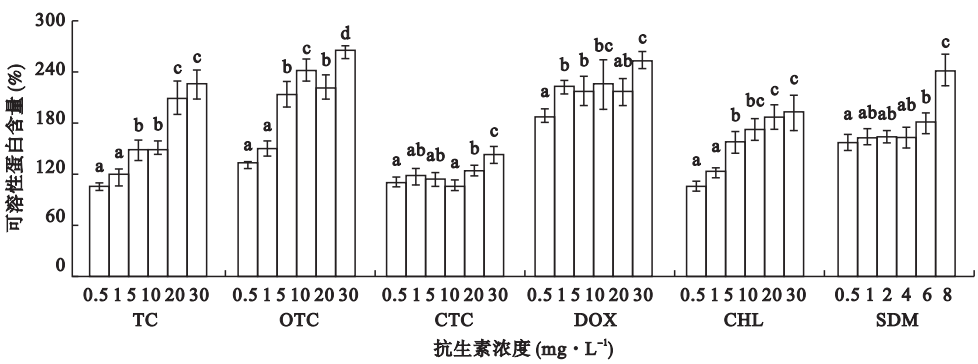


图 2 抗生素对小白菜幼苗体内可溶性蛋白含量的影响

Fig. 2 Effects of antibiotics on the content of SP in Chinese cabbage

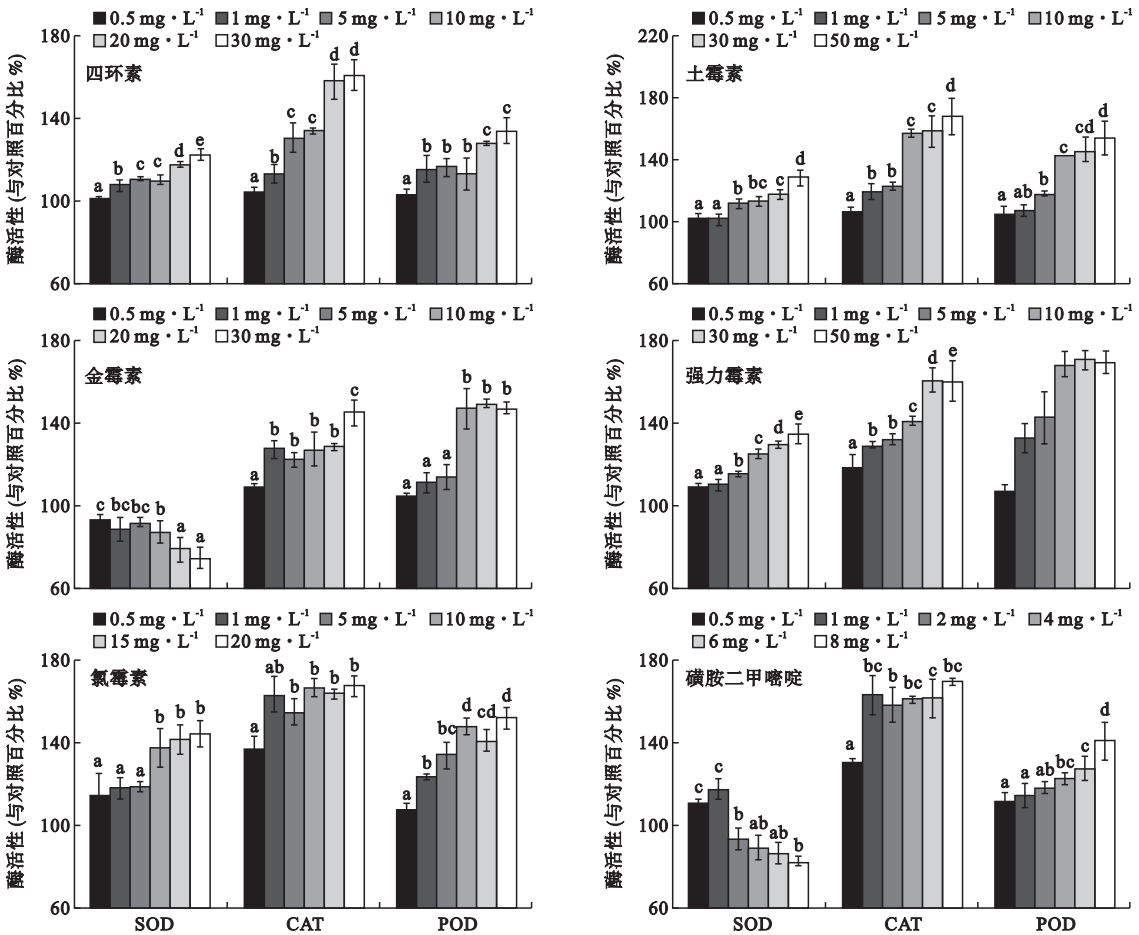


图 3 抗生素污染对小白菜体内抗氧化酶的影响

Fig. 3 Effects of antibiotics on the antioxidant enzyme activities of Chinese cabbage

显著上升趋势,且各处理组间差异显著。实验浓度范围内的金霉素和磺胺二甲嘧啶对小白菜幼苗体内的 POD 和 CAT 酶活性也具有显著的诱导效应,但是这 2 种抗生素对小白菜体内的 SOD 酶活性却表现出了显著的抑制效应,且浓度越高,抑制效应越显著。

3 讨 论

种子发芽实验和早期幼苗生长发育实验是毒理学常用的实验方法,由于这些方法具有快速、便捷等优点,很多学者采用它们来研究污染胁迫下植物发芽、生长以及芽长等指标以综合评价该污染物的毒性(Liu *et al.*,2007;李悦等,2013)。本研究发现,6 种抗生素暴露浓度<5 mg·L^{-1}时,小白菜种子的发芽率与对照相比均无显著差异。王朋等(2010)也发现,0.5 ~ 50 mg·L^{-1}的诺氟沙星对玉米的发芽率也无显著影响。这一方面是由于抗生素等新型污染物的毒性不像一些工业化学品那样剧烈;另一方面种皮对种子的保护作用不可忽略,抗生素很可能被吸附在种皮上,而并不对培根的生长发育产生剧烈的影响,也就是说种皮起到了阻挡种子胚芽与外界环境直接接触的作用,使胚芽不能直接受到污染物的侵害(Araùjo *et al.*,2005)。值得注意的是,目前确定种子发芽的标准是培根从种孔中突破种皮,向下生长形成主根。但这种生长并不一定是由细胞分裂产生的,这种生长可能仅是简单的细胞伸长(Chon *et al.*,2004)。这就意味着,虽然从表面上看种子正常发芽伸出,但并不能说明污染物的胁迫对它们体内的细胞没有毒性效应。随着抗生素浓度的增加(TC≥30 mg·kg^{-1};OTC≥20 mg·kg^{-1};CTC≥10 mg·kg^{-1};DOX ≥10 mg·kg^{-1};CHL≥25 mg·kg^{-1};SMD≥10 mg·kg^{-1}),抗生素对种子发芽率产生了显著的抑制作用,说明此时抗生素已经对种子的萌发产生了毒性效应。

与种子出芽相比较,芽和根的伸长更易依赖于外界环境,尤其是种子的根部。根是作物与污染物

接触最为直接的部位,因而经常表现出更为显著的受害症状。许多关于重金属、农药等污染物对小麦种子根伸长的研究也证实了根是对污染物胁迫最为敏感的部位(晁雷等,2006;宋雪英等,2006)。在本研究中,土霉素、强力霉素和氯霉素浓度为0.5 mg·L^{-1}时对小白菜的发芽具有一定的促进作用,这是由于低浓度的抗生素对生物生长具有一定的促进作用(林琳等,2011)。但是当抗生素的浓度超出了小白菜种子所能耐受的范围,小白菜的芽伸长和根伸长又逐渐出现抑制效应,且相同浓度抗生素处理对小白菜根长抑制率显著高于对芽长的抑制率。由回归方程中的斜率可以看出(表2),随着对各抗生素浓度的增加,小白菜根伸长与芽伸长的抑制率之间的差异性可能会不断的扩大。此外,由于6种抗生素化学结构与使用功能完全不同,它们对小白菜种子的作用机制也不同,造成它们对小白菜种子芽伸长及根伸长的毒性效应不同。根据小白菜敏感部位的EC_{50}值可知,6种抗生素对小白菜种子萌发的毒性大小依次为:磺胺二甲嘧啶>氯霉素>金霉素>四环素>强力霉素>土霉素。金彩霞等(2009)也发现,磺胺类抗生素对植物的毒性效应要大于四环素类和喹诺酮类抗生素。

可溶性蛋白含量是植物体内代谢过程中蛋白质损伤的重要指标,其变化可以反映细胞内蛋白质合成、变性及降解等多方面的信息。在有机物、重金属以及寒旱等胁迫下,植物体内可溶性蛋白的合成能力也会发生一定的变化(Mosleh *et al*.,2003)。但是污染物的种类以及受试植物基因型的不同都会使可溶性蛋白质的合成情况有所差异。本研究中,0.5 mg·L^{-1}抗生素胁迫下小白菜体内SP含量被显著诱导,说明小白菜SP对抗生素污染胁迫较为敏感。

在正常生理条件下,生物体内活性氧的产生与其体内的抗氧化防御系统之间具有动态平衡机制。但是,当生物体受到污染胁迫后,生物体内的活性氧增加,导致其体内的抗氧化防御系统不能及时的消除过剩的活性氧,进而引起生物体的氧化应激反应。SOD、POD和CAT是生物体抗氧化防御系统中典型的抗氧化酶。SOD是生物体内重要的氧自由基消除剂,它能把O_2^-转化成O_2和H_2O_2,抑制高活性的·OH等自由基形成,终止自由基连锁反应,保护生物体免受氧化损伤。POD和CAT是清除H_2O_2的重要酶类,它们可以协同作用将SOD歧化自由基的产物H_2O_2转化为H_2O和O_2(An *et al*.,2009)。本研究中,实验浓度范围内的6种抗生素对小白菜体内的这3种抗氧化酶活性均产生了不良效应,或抑制或诱导,这说明抗生素的胁迫扰乱了机体抗氧化防御系统的正常功能,已经给植物的正常生长造成一定的毒害作用。朱健等(2009)和王朋等(2011)也发现,盐酸左氧氟沙星和环丙沙星等抗生素对玉米芽期抗氧化酶活性具有显著的毒性效应。

4 结 论

研究表明,6种常见抗生素对小白菜种子萌发、根(芽)伸长以及幼苗体内的可溶性蛋白和抗氧化酶含量等生理生化指标均具有一定的影响,说明抗生素污染可以在植物芽期就出现毒性效应。虽然有些抗生素在低浓度暴露下,对种子的芽长具有一定的促进作用,但实际上其体内的一些生理指标已经出现了不良的变化。因此,对于抗生素等持久性环境污染物来说,仅以单一的某种生理生化指标变化来判断其对植物的毒性效应是不够的,应该从不同水平上将几种生物标志物有机地结合起来综合考虑以更好地反映其对动植物的潜在生态危害。

参考文献

安 婧, 周启星, 刘维涛. 2009. 土霉素对小麦种子发芽与幼苗生长发育的生态毒性. 环境科学, **30**(10): 3022-3027.

晁 雷, 周启星, 崔 爽, 等. 2006. 铅与对二氯苯复合污染对小麦和大白菜种子发芽及幼苗期生长的毒性. 生态学杂志, **25**(8): 944-949.

崔 馨, 乔显亮, 韩成伟, 等. 2008. 生菜对土霉素的吸收及其植物毒性. 农业环境科学学报, **27**(3): 1038-1042.

董璐玺, 谢秀杰, 周启星. 2011. 两种兽药添加剂对蚯蚓的DNA损伤及其联合效应. 环境科学学报, **31**(12): 2798-2803.

金彩霞, 陈秋颖, 刘军军, 等. 2009. 两种常用兽药对作物发芽的生态毒性效应. 环境科学学报, **29**(3): 619-625.

李 悦, 谢 诗, 陈忠林, 等. 2013. 锌、苯并[a]芘及其复合胁迫对小麦幼苗生长及抗氧化酶的影响. 生态学杂志, **32**(2): 358-362.

李合生. 2000. 植物生理生化实验原理和技术. 北京: 高等教育出版社.

林 琳, 安 婧, 周启星. 2011. 土壤四环素污染对小白菜幼苗生长发育的生态毒性. 环境科学, **32**(8): 2430-2435.

宋雪英, 宋玉芳, 孙铁珩, 等. 2006. 柴油污染土壤对小麦种子萌发及幼苗生长的生态毒性效应. 农业环境科学学报, **25**(3): 554-559.

王 朋, 温 蓓, 张淑贞. 2010. 诺氟沙星对芽期玉米的毒性和氧化损伤. 生态毒理学报, **5**(6): 849-856.

王 朋, 温 蓓, 张淑贞. 2011. 环丙沙星对玉米芽期抗氧化酶活性及自由基代谢的影响. 环境化学, **30**(4): 753-759.

周启星, 孔繁翔, 朱 琳. 2004. 生态毒理学. 北京: 科学出版社.

朱 健, 龙 健, 张明时, 等. 2009. 盐酸左氧氟沙星对玉米种子萌发及抗氧化酶系统的影响. 种子, **28**(7): 97-100.

An J, Zhou QX, Sun YB. 2009. Ecotoxicological effects of typical personal care products on seed germination and seedling development of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Chemosphere*, **76**: 1428-1434.

Araùjo ASF, Monteiro RTR. 2005. Plant bioassays to assess toxicity of textile sludge compost. *Scientia Agricola*, **62**: 286-290.

Chon SU, Nelson CJ, Coutts JH. 2004. Osmotic and autotoxic effects of leaf extracts on germination and seedling growth alfalfa. *Agronomy Journal*, **96**: 1673-1679.

Farkas MH, Berry JO, Aga DS. 2007. Chlortetracycline detoxification in maize via induction of glutathione s-transferases after antibiotic exposure. *Environmental Science & Technology*, **41**: 1450-1456.

Kemper N. 2008. Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment. *Ecological Indicators*, **8**: 1-13.

Kummerer K. 2003. Significance of antibiotics in the environment. *Journal of Antimicrobial Chemotherapy*, **52**: 5-7.

Liu F, Ying GG, Tao R, *et al*. 2009. Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities. *Environmental Pollution*, **157**: 1636-1642.

Liu W, Yang YS, Zhou Q, *et al*. 2007. Impact assessment of cadmium contamination on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings at molecular and population levels using multiple biomarkers. *Chemosphere*, **67**: 1155-1163.

Mosleh YY, Paris-Palacios S, Couderchet M, *et al*. 2003. Effects of the herbicide isoproturon on survival, growth rate, and protein content of mature earthworms (*Lumbricus terrestris* L.) and its fate in the soil. *Applied Soil Ecology*, **23**: 69-77.

Richardson BJ, Lam PKS, Martin M. 2005. Emerging chemicals of concern: Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Asia, with particular reference to Southern China. *Marine Pollution Bulletin*, **50**: 913-920.

Rosendahl I, Siemens J, Groeneweg J, *et al*. 2011. Dissipation and sequestration of the veterinary antibiotic sulfadiazine and its metabolites under field conditions. *Environmental Science & Technology*, **45**: 5216-5222.

作者简介 肖明月,女,1987 年生,硕士研究生,主要从事污染生态学和环境化学研究。E-mail: xmy452009@hotmail.com

责任编辑 王 伟