

三种抗生素对蔬菜种子芽与根伸长的生态毒性效应

魏子艳¹, 王金花^{1,2*}, 夏晓明¹, 朱鲁生¹, 王军¹, 谢慧¹

(1. 山东农业大学资源与环境学院 植物保护学院 农药环境毒理研究中心 山东省高校农业环境重点实验室, 山东 泰安 271000; 2. 南开大学环境污染过程与基准教育部重点实验室, 天津 300071)

摘要: 采用水培法研究金霉素(Chlortetracycline, CTC)、诺氟沙星(Norfloracin, NFLX)、磺胺对甲氧嘧啶(Sulfametoxydiazine, SMD)三种抗生素对黄瓜、油菜、小白菜三种蔬菜种子芽和根伸长的影响, 比较分析了抗生素的生态毒性差异和相对敏感的蔬菜与指标。结果表明:(1)根长是更为敏感的生态毒性指标;(2)三种抗生素对黄瓜的生态毒性依次是金霉素>磺胺对甲氧嘧啶>诺氟沙星, 对油菜和小白菜的生态毒性则分别是磺胺对甲氧嘧啶>金霉素>诺氟沙星和磺胺对甲氧嘧啶>诺氟沙星>金霉素;(3)三种蔬菜对于金霉素和磺胺对甲氧嘧啶胁迫的敏感性均为油菜>小白菜>黄瓜, 而对于诺氟沙星胁迫的敏感性依次是小白菜>黄瓜>油菜。该结果为评价抗生素污染对生态环境和人体健康的潜在影响提供了理论依据。

关键词: 金霉素; 诺氟沙星; 磺胺对甲氧嘧啶; 蔬菜; 生态毒性

中图分类号: X171.5 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2014)02-0237-06 doi:10.11654/jaes.2014.02.005

Ecotoxicity of Three Antibiotics to Shoots and Root Elongation of Cucumber, Rape and Chinese Cabbage

WEI Zi-yan¹, WANG Jin-hua^{1,2*}, XIA Xiao-ming¹, ZHU Lu-sheng¹, WANG Jun¹, XIE Hui¹

(1. College of Resources and Environment, College of Plant Protection, Pesticide Environmental Toxicology Research Centre, Key Laboratory of Agricultural Environment in Universities of Shandong, Shandong Agricultural University, Taian 271000, China 2. Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria(Nankai University), Ministry of Education, Nankai University, Tianjin 300071, China)

Abstract: In order to evaluate the ecological toxicity of three antibiotics [chlortetracycline (CTC), norfloracin (NFLX) and sulfametoxydiazine (SMD)], three vegetables, cucumber (No. 4 of New Jinyan), rape (QiRu Green) and Chinese cabbage (Huangyang), were grown in hydroponic condition to observe their shoot and root elongation as well as half-inhibition concentration (IC₅₀) under six different concentrations of CTC and SMD (0, 10, 30, 50, 70, 90 mg·L⁻¹), and NFLX (0, 20, 40, 80, 160, 320 mg·L⁻¹). Results showed that: (1) roots were more sensitive than shoots; (2) ecological toxicity of three antibiotics was CTC>SMD>NFLX for cucumber, SMD>CTC>NFLX for rape, and SMD>NFLX>CTC for Chinese cabbage; (3) tolerance of vegetables to SMD and CTC was cucumber>Chinese cabbage>rape, whereas NFLX had the largest impact on Chinese cabbage, followed by cucumber and rape. These results demonstrate the potential ecological impacts of antibiotics in the environment.

Keywords: chlortetracycline; norfloracin; sulfametoxydiazine; vegetables; ecological toxicity

目前, 抗生素被广泛用于治疗疾病和保护人类及动物的健康, 同时也被添加到动物饲料中以提高动物生长速率和改善饲料转化效率^[1], 我国平均每年约有 6000 t 的抗生素被用作饲料添加剂^[2], 我国药物处方

中抗生素多达 70%^[3]。由于抗生素在生物体内停留时间短且代谢率低, 有 25%~75% 会以母体药物的形式随粪便和尿液排出体外进入环境中^[4]。同时, 人类活动和农业生产也导致了大量抗生素不断进入环境并在环境中积累, 严重污染土壤和水环境^[5], 进而影响到作物尤其是蔬菜的正常生长, 最终影响人类的身体健康^[6], 使其成为重要的公共卫生问题之一^[7]。

四环素类、氟喹诺酮类和磺胺类抗生素因为广谱高效而被广泛应用到畜禽饲养中, 其中: 四环素类抗生素是我国使用最多的药物添加剂^[8]; 氟喹诺酮类抗生素被广泛应用于临床, 使用量增长最快; 磺胺类抗

收稿日期: 2013-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(40801203, 41001152, 41071164, 21377075); 2014 年国家环保部公益性行业科研专项(201409053-04); 环境污染过程与基准教育部重点实验室(南开大学)开放课题基金

作者简介: 魏子艳(1988—), 女, 山东潍坊人, 在读硕士, 研究方向为环境毒理与土壤微生物。

* 通信作者: 王金花 E-mail: wjh@sdau.edu.cn

生素是我国生产量和使用量最大的兽药之一。黄瓜、油菜和小白菜作为人们日常食用的蔬菜,在我国大面积种植,且具有对污染物敏感、易于栽培、生长周期短等特性,常被作为受试植物来评价污染物对植物的毒性效应^[9]。因此,本研究选取三种常用抗生素金霉素、诺氟沙星和磺胺对甲氧嘧啶作为污染物,研究其对黄瓜、油菜、小白菜根长和芽长的影响。通过蔬菜种子芽和根伸长的受抑制程度,比较三种抗生素的生态毒性差异,同时评价对抗生素相对敏感的蔬菜和污染生态指标,旨在为评价抗生素污染的生态影响和对人体健康的潜在风险提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试药品

金霉素,分子式为 $C_{22}H_{23}ClN_2O_8$ (图 1a),高纯($\geq 90\%$),合肥博美生物科技有限责任公司生产。

诺氟沙星,分子式为 $C_{16}H_{18}FN_3O_3$ (图 1b),化学名为 1-乙基-6-氟-1,4-二氢-4-氧代-7-(1-哌嗪基)-3-喹啉羧酸,高纯($>98\%$),合肥博美生物科技有限责任公司生产。

磺胺对甲氧嘧啶,分子式为 $C_{11}H_{12}N_4O_3S$ (图 1c),化学名为 2-(对氨基苯磺酰胺基)-5-甲氧基嘧啶,高纯($>99\%$),阿拉丁试剂(上海)有限公司生产。

1.1.2 供试种子

黄瓜品种为新津研四号,由武汉旺旺种苗培育;油菜品种为齐鲁青,由山东农大种业有限公司培育;小白菜品种为黄秧小白菜,由武汉旺旺种苗培育。

1.2 仪器设备

培养箱,直径 90 mm 玻璃培养皿,容量瓶(50、100 mL),10 mL 量筒,10 mL 移液管,100 mL 烧杯,温度计,玻璃棒,镊子,剪刀,刻度尺,保鲜膜,纱布,定性滤纸(90 mm 新星牌定性滤纸),次氯酸钠溶液(浓度 10%)等。

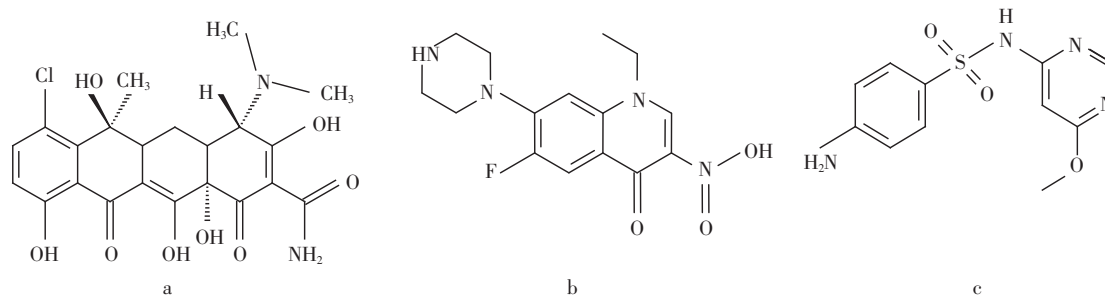


图 1 金霉素(a)、诺氟沙星(b)和磺胺对甲氧嘧啶(c)分子的结构式

Figure 1 Constitutional formula of CTC(a),NFLX(b)and SMD(c)

1.3 试验方法

试验采用水培法。

1.3.1 种子预处理

挑选大小一致、籽粒饱满的黄瓜、油菜和小白菜种子,在 0.2%的次氯酸钠溶液中浸泡消毒 10 min,然后用去离子水冲洗 3~5 遍。在 40 °C 的温水中浸泡种子 2~3 h 直至水冷,浸泡两次;把种子转移到消毒的纱布内(两层并包裹严实),放入玻璃培养皿(直径 90 mm)中,在培养箱内(25 ± 1)°C 培养至露白待用。

1.3.2 预备试验

在洁净烘干的培养皿中铺平三层滤纸,分别加入以几何级数配制的不同浓度的抗生素溶液各 10 mL,对照处理加入等体积的蒸馏水。用镊子将黄瓜、油菜、小白菜种子均匀排列在培养皿中,保持种子胚根末端与生长方向呈直线,每个培养皿放置 10 粒饱满露白整齐一致的种子。每个处理设置三个重复。盖好玻璃培养皿,培养皿用保鲜膜封口以保持滤纸湿润,然后将其置于 25 °C 的培养箱中避光培养 72 h,再调节相对湿度为 66%,继续培养 24 h。培养 4 d 后取出观察,用刻度尺测定并记录种子的芽长及主根长度。当对照种子发芽率 $> 90\%$,根长度为 20 mm 时,试验结束。确定种子发芽和根伸长抑制率达到 10%~60% 区间后,开始正式试验。

1.3.3 正式试验

根据预备试验结果,在种子发芽和根伸长抑制率达到 10%~60% 区间内,设置 5 个正式试验浓度,正式试验抗生素浓度设计见表 1。同时设置蒸馏水空白

表 1 抗生素浓度设计表

Table 1 Concentrations of three antibiotics used in the study					
抗生素种类	黄瓜、油菜、小白菜中各抗生素含量/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$				
金霉素	10	30	50	70	90
诺氟沙星	20	40	80	160	320
磺胺对甲氧嘧啶	10	30	50	70	90

对照。每个处理 10 粒种子,3 个重复。在与预备试验相同的温度和水分等条件下,进行种子发芽与根伸长培养试验,试验结束时,测定各处理浓度的种子芽长及根长(芽长:下胚轴基部至芽顶端的长度;根长:下胚轴基部至主根尖端的长度)。

1.4 数据处理

运用 Excel 2003 计算 3 次重复所得数据的平均值及标准偏差,并绘制柱状图;采用 SPSS 17.0 软件计算半数抑制浓度(IC_{50}),并对数据进行单因素方差分析,差异显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 金霉素对三种蔬菜种子芽长、根长的影响

从图 2 可以看出,金霉素对油菜和小白菜种子的芽长和根长具有明显的抑制作用,且在所设浓度范围内,随浓度升高抑制作用加强。金霉素对黄瓜种子的根长在各浓度下同样具有抑制作用。与对照相比,金霉素处理浓度在 10、30、50 $mg \cdot L^{-1}$ 时对黄瓜芽长具有促进作用,其中 30 $mg \cdot L^{-1}$ 时促进作用最强,在处理浓度升高至 70 $mg \cdot L^{-1}$ 时,金霉素对黄瓜芽长已产生抑制作用,90 $mg \cdot L^{-1}$ 时对黄瓜芽长的抑制作用加强。

与对照组相比,黄瓜芽长只在金霉素处理浓度为 30 $mg \cdot L^{-1}$ 时差异显著,其他浓度下均无显著差异。油菜芽长各处理组均与对照组存在极显著差异。小白菜芽长在金

霉素处理浓度为 10 $mg \cdot L^{-1}$ 时与对照差异显著,其他浓度下均表现为差异极显著。黄瓜、油菜和小白菜的根长在金霉素各处理浓度下均与对照组存在极显著差异。

2.2 诺氟沙星对三种蔬菜种子芽长、根长的影响

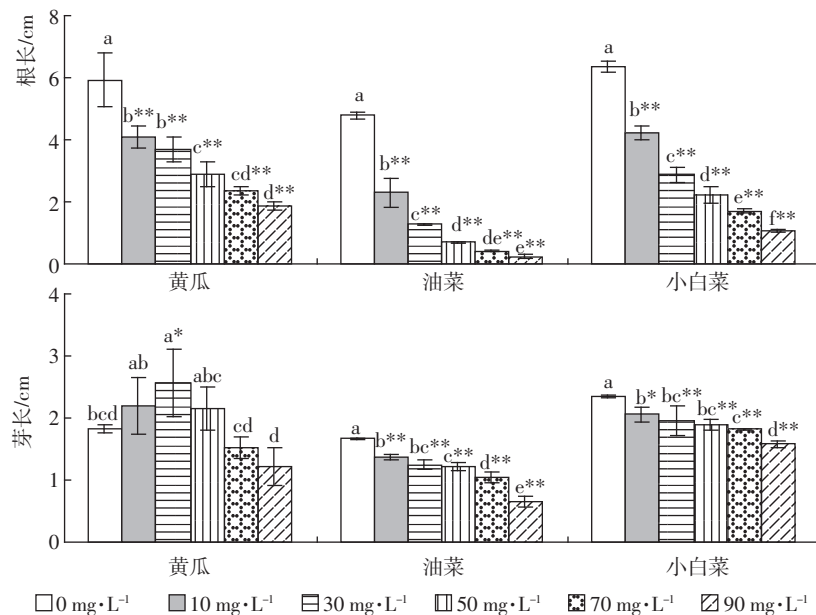
从图 3 可知,诺氟沙星在设置的 5 个浓度下,均能够明显地抑制油菜和小白菜种子的芽长和根长以及黄瓜种子的根长。随着浓度升高,抑制作用逐渐加强。诺氟沙星对黄瓜种子的芽长在 20 $mg \cdot L^{-1}$ 时具有促进作用,平均芽长高于对照组;其他浓度时均对黄瓜种子的芽长产生抑制。

黄瓜芽长在诺氟沙星浓度为 20、40 $mg \cdot L^{-1}$ 时与对照组无显著差异,小白菜芽长在诺氟沙星浓度为 20 $mg \cdot L^{-1}$ 时与对照组无显著差异;在诺氟沙星浓度为 50 $mg \cdot L^{-1}$ 黄瓜芽长与对照相比差异显著。其他各诺氟沙星浓度下,三种蔬菜芽长均与对照差异极显著。黄瓜、油菜和小白菜的根长在诺氟沙星各处理浓度下均与对照组存在极显著差异。

2.3 磺胺对甲氧嘧啶对三种蔬菜种子芽长、根长的影响

图 4 显示,磺胺对甲氧嘧啶在所设 5 个浓度下,对三种蔬菜的芽长和根长均表现为抑制作用,且抑制作用随浓度升高而加强。

磺胺对甲氧嘧啶浓度为 10 $mg \cdot L^{-1}$ 时,黄瓜芽长与对照组无显著差异;磺胺对甲氧嘧啶浓度为 30 $mg \cdot L^{-1}$ 时,黄瓜芽长与对照组相比差异显著。其他各



不同字母表示处理组之间存在显著性差异, $P<0.05$; *、** 分别表示处理组和对照组之间差异显著 ($P<0.05$)、极显著 ($P<0.01$)。下同
Bars with different letters are significantly different at $P<0.05$ level. * indicates significant differences at $P<0.05$ level, and** significant differences at $P<0.01$ level, respectively, as compared to the control. The same below

图 2 金霉素对黄瓜、油菜、小白菜根长和芽长的影响

Figure 2 Effects of CTC on shoot and root elongation of cucumber, rape and Chinese cabbage

磺胺对甲氧嘧啶浓度下,三种蔬菜芽长和根长均与对照差异极显著。

2.4 三种抗生素对三种蔬菜种子芽长、根长的半数抑制浓度

目前,经常采用植物的 IC_{50} 来评价污染物的生态毒性强弱^[10]。由表2可见,三种抗生素对黄瓜、油菜和小白菜种子的 IC_{50} 值均为根长<芽长,说明三种抗生素对种子根长的抑制效应大于种子芽长。金霉素和磺胺对甲氧嘧啶对黄瓜根长、芽长的 IC_{50} 值相近,相对诺氟沙星 IC_{50} 值较小。诺氟沙星对油菜根长、芽长的 IC_{50} 值最大,金霉素次之,磺胺对甲氧嘧啶对油菜根长、芽长的 IC_{50} 值最小。对小白菜,磺胺对甲氧嘧啶的 IC_{50} 值最小,金霉素对芽长的 IC_{50} 值小于诺氟沙星,而诺氟沙星对根长的 IC_{50} 值小于金霉素。

3 讨论

3.1 根长和芽长对抗生素的敏感程度分析

本试验选取根长和芽长两个比较直观、快捷的指标来测定三种抗生素对黄瓜、油菜和小白菜的生态毒性。通过表2可以看出,水溶液中诺氟沙星对油菜和小白菜的芽长影响微弱, IC_{50} 值在 $1100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 左右,环境中极少存在如此高的抗生素浓度,说明种子芽长不宜作为抗生素类有机污染生态毒理学的敏感生态

学指标^[11]。且三种抗生素对蔬菜种子的生态毒性大小均为根长>芽长,这可能是由于植物对抗生素的吸收大部分积累在根部,只有很少量转移到其他部位并蓄积^[12-13]。从而致使蔬菜种子在较低含量的抗生素胁迫下,根部首先受到影响被抑制时,芽仍可以通过种子自身吸收养分不被抑制;但随着抗生素含量的增加,污染物会被根部吸收、运输到达种胚,进而影响芽的伸长和植株的生长^[14]。因此,相对芽长,种子的根长对三种抗生素更为敏感,是更为合适的生态毒性指示指标。这与林琳^[9]、魏瑞成^[15]等的研究结果相似,即同等条件下,抗生素对蔬菜种子根长的抑制效应大于其对芽长的抑制效应。

3.2 三种抗生素对蔬菜种子的毒性差异分析

由图2和图3可见,在金霉素和诺氟沙星浓度较低时,对黄瓜的芽长有一定的促进作用,这可能是黄瓜对不同抗生素产生的抗性机制不同而导致。由表2中三种蔬菜种子根伸长的 IC_{50} 可以看出,三种抗生素对黄瓜的生态毒性依次是金霉素>磺胺对甲氧嘧啶>诺氟沙星,对油菜的生态毒性则是磺胺对甲氧嘧啶>金霉素>诺氟沙星。对小白菜,毒性最大的是磺胺对甲氧嘧啶,其次是诺氟沙星,再次是金霉素。在所设浓度范围内,诺氟沙星对油菜和小白菜芽长的影响变化不大,可能由于油菜和小白菜对诺氟沙星具有一定的抗

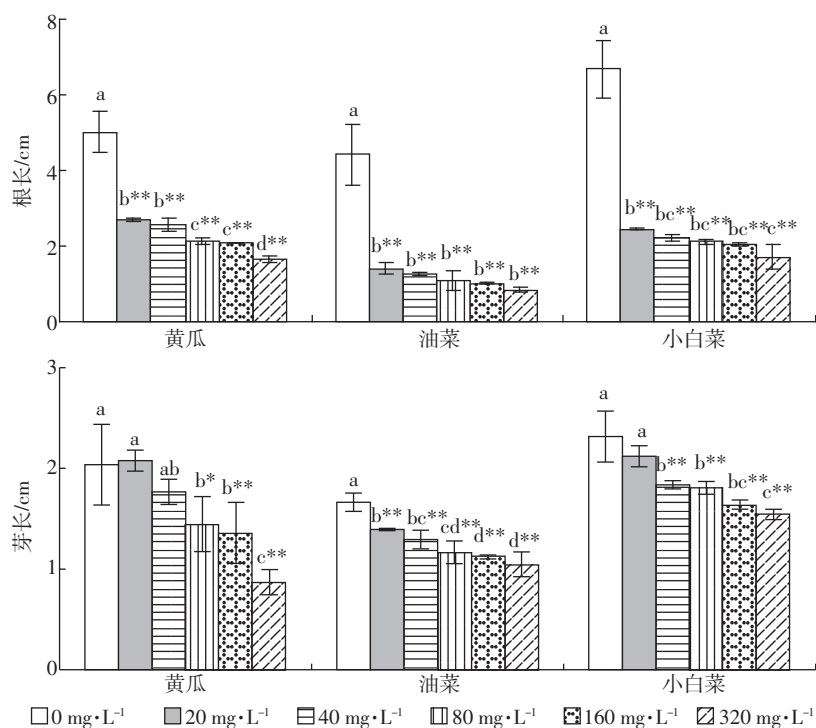


图3 诺氟沙星对黄瓜、油菜、小白菜根长和芽长的影响

Figure 3 Effect of NFLX on shoot and root elongation of cucumber,rape and Chinese cabbage

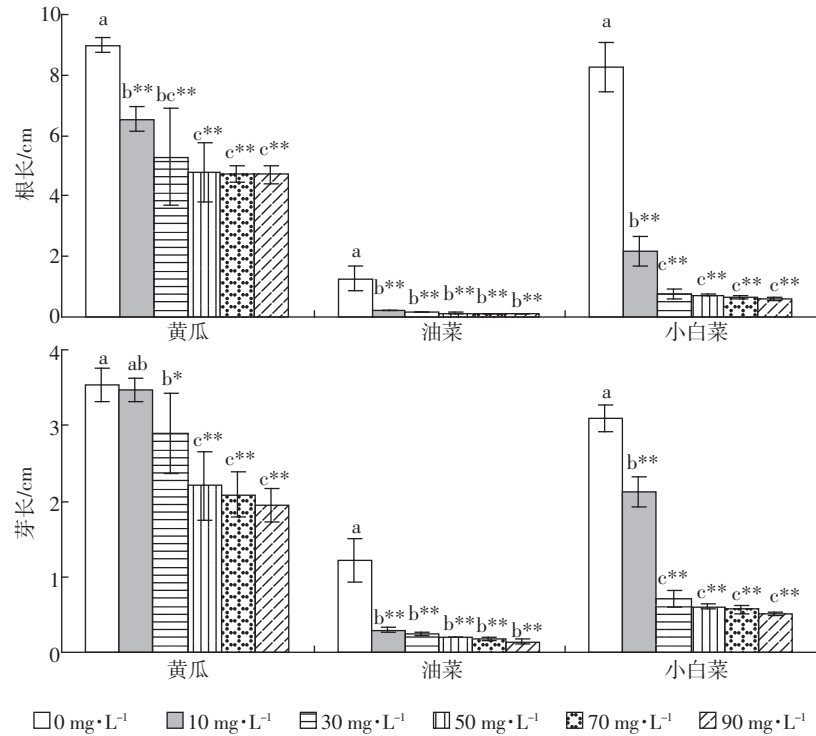


图4 磺胺对甲氧嘧啶对黄瓜、油菜、小白菜根长和芽长的影响

Figure 4 Effect of SMD on shoot and root elongation of cucumber, rape and Chinese cabbage

表2 三种抗生素对三种蔬菜种子芽长、根长的半数抑制浓度

Table 2 Half-inhibition concentrations of three antibiotics for three vegetables' seed shoot and root elongation

蔬菜种子	金霉素		诺氟沙星		磺胺对甲氧嘧啶	
	根长 IC ₅₀ /mg·L ⁻¹	芽长 IC ₅₀ /mg·L ⁻¹	根长 IC ₅₀ /mg·L ⁻¹	芽长 IC ₅₀ /mg·L ⁻¹	根长 IC ₅₀ /mg·L ⁻¹	芽长 IC ₅₀ /mg·L ⁻¹
黄瓜	80.176	113.58	229.25	255.66	87.988	94.278
油菜	31.271	96.228	532.95	1157.5	0.0620	5.1740
小白菜	47.098	244.44	13.888	1131.7	1.7080	16.122

性机制,也可能是油菜和小白菜种子的种皮对诺氟沙星的透过有一定的阻碍作用^[6]。由此可见,不同抗生素对同种蔬菜的生态毒性有很大的差别。从本试验结果来看,对黄瓜和油菜,诺氟沙星的毒害效应相对较弱,是相对生态安全性较高的一种抗生素;而对黄瓜,金霉素的生态毒性较强,对油菜和小白菜,磺胺对甲氧嘧啶的生态毒性相对强一些,其毒性主要是由于蔬菜吸收了抗生素而降低了对生长所需叶酸的吸收导致^[7]。对各种抗生素可能对植物及生态环境造成的危害应予以足够的重视。

3.3 不同蔬菜对抗生素的耐受程度分析

不同蔬菜在同一抗生素胁迫下表现出的敏感性不同。从表2可见,三种蔬菜对于金霉素和磺胺对甲氧嘧啶胁迫的敏感性依次是油菜>小白菜>黄瓜,而对于诺氟沙星胁迫的敏感性依次是小白菜>黄瓜>油菜。因此,在本试验中,黄瓜相对小白菜对三种抗生素

的耐性更强一些;油菜对金霉素和磺胺对甲氧嘧啶最敏感,而对诺氟沙星最不敏感,表现出完全相反的趋势。这可能与抗生素作用的靶分子和作物本身的抗性机制有关^[4],但具体机制和作用机理还需要进一步深入研究和探讨。抗生素残留普遍存在于施用过粪肥的土壤中,Karci等在8个禽畜粪便和9个农田土壤样品中对常用的10种抗生素进行检测发现,每个样品中至少能够检测到其中一种抗生素^[18]。研究表明,蔬菜生产中较高的复种指数和经常性的轮作有利于施用粪肥土壤中抗生素的降解,在湿热气候下,连续大量地施用粪肥也有利于土壤中残留的施用粪肥本身所含有的抗生素的降解^[9]。由此可见,针对不同种类蔬菜对不同抗生素的耐受程度不同,应充分全面考虑土壤中粪肥施用和抗生素残留情况,合理种植蔬菜和施用粪肥,发展可持续农业,保障农产品安全,减少通过食物链危害人体健康的风险。

4 结论

(1)金霉素、诺氟沙星和磺胺对甲氧嘧啶对供试蔬菜各部分的生态毒性不同,其对根伸长的抑制效应大于芽伸长。因此,根伸长相对敏感,可作为指示三种抗生素对蔬菜生态毒性的敏感指标,反映土壤被抗生素污染的程度。

(2)在本试验所设浓度范围内,从抗生素对蔬菜芽长和根长抑制的强弱及 IC_{50} 值来看,磺胺对甲氧嘧啶对油菜和小白菜的生态毒性相对较强,而金霉素对黄瓜根长的抑制作用相对强一些。

(3)在被三种抗生素胁迫时,小白菜相对黄瓜更为敏感,而油菜表现出完全相反的趋势,对金霉素和磺胺对甲氧嘧啶最敏感,对诺氟沙星最不敏感。

参考文献:

- [1] WEN Bei, LIU Yu, WANG Peng, et al. Toxic effects of CTC on maize growth, reactive oxygen species generation and the antioxidant response [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2012, 24(6): 1099–1105.
- [2] 侯放亮. 饲料添加剂应用大全[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003. Hou F L. Application of feed additive[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.
- [3] Richardson B J, Lam P K, Martin M. Emerging chemicals of concern: Pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in Asia, with particular reference to Southern China[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(9): 913–920.
- [4] 李 通, 金彩霞, 朱雯雯, 等. 环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米萝卜和小白菜 3 种作物生态毒性研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1): 15–20. Li T, Jin C X, Zhu W W, et al. Joint toxicity of CPM and Cu on seed germination and root elongation of corn, radish and Chinese cabbage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(1): 15–20.
- [5] CHEN YongShan, ZHANG HaiBo, LUO YongMing, et al. Occurrence and dissipation of veterinary antibiotics in two typical swine wastewater treatment systems in east China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2012, 184(4): 2205–2217.
- [6] Kemper N. Veterinary antibiotics in the aquatic and terrestrial environment[J]. *Ecological Indicators*, 2008, 8(1): 1–13.
- [7] Alaboudi A, Basha E A, Musallam I. CTC and sulfanilamide residues in table eggs: Prevalence, distribution between yolk and white and effect of refrigeration and heat treatment[J]. *Food Control*, 2013, 33(1): 281–286.
- [8] YANG JiFeng, YING GuangGuo, ZHAO JianLiang, et al. Simultaneous determination of four classes of antibiotics in sediments of the Pearl Rivers using RRLC-MS/MS[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(16): 3424–3432.
- [9] 林 琳, 安 婧, 周启星. 土壤四环素污染对小白菜幼苗生长发育的生态毒性[J]. *环境科学*, 2011, 32(8): 2430–2435. Lin L, An J, Zhou Q X. Ecotoxicological effects of tetracycline on the seedling development of Chinese white cabbage (*Brassica rapa* L. Chinese Group.) in soil[J]. *Environmental Science*, 2011, 32(8): 2430–2435.
- [10] 周启星, 王美娥. 土壤生态毒理学研究进展与展望[J]. *生态毒理学报*, 2006, 1(1): 1–11. Zhou Q X, Wang M E. Researching advancement and prospect of soil ecotoxicology[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(1): 1–11.
- [11] 鲍艳宇, 周启星, 谢秀杰. 四环素类抗生素对小麦种子芽与根伸长的影响[J]. *中国环境科学*, 2008, 28(6): 566–570. Bao Y Y, Zhou Q X, Xie X J. Influence of tetracycline kind antibiotics on the control of wheat germination and root elongation[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(6): 566–570.
- [12] Herklotz PA, Gurung P, Vanden Henvel B, et al. Uptake of human pharmaceuticals by plants grown under hydroponic conditions [J]. *Chemosphere*, 2010, 78(11): 1416–1421.
- [13] Migliore L, Godeas F, De Filippis SP, et al. Hormetic effect(s) of tetracyclines as environmental contaminant on *Zea mays* [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158(1): 129–134.
- [14] 金彩霞, 陈秋颖, 刘军军, 等. 两种常用兽药对蔬菜发芽的生态毒性效应[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(3): 619–625. Jin C X, Chen Q Y, Liu J J, et al. The eco-toxicological effect of two common veterinary drugs on crop germination[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(3): 619–625.
- [15] 魏瑞成, 邵明诚, 陈 明, 等. 金霉素 4-差向金霉素对油菜生长的影响及其在幼苗体内的积累[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1289–1295. Wei R C, Shao M C, Chen M, et al. Effects of chlortetracycline and 4-epi-chlortetracycline on the growth of rape and its accumulation in seedling [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1289–1295.
- [16] ZHOU QiXing, ZHANG QianRu, LIANG JiDong. Toxic effects of ace-tochlor and methamidophos on earthworm *Eisenia foetida* in phaeozem, northeast China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2006, 18(4): 741–745.
- [17] 金彩霞, 刘军军, 鲍林林, 等. 磺胺间甲氧嘧啶-镉复合污染对蔬菜种子发芽的影响[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(6): 839–844. Jin C X, Liu J J, Bao L L, et al. Joint toxicity of sulfamonomethoxine and Cd on seed germination and root elongation of crops in soil[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(6): 839–844.
- [18] Karci A, Balcioglu IA. Investigation of the tetracycline, sulfonamide, and fluoroquinolone antimicrobial compounds in animal manure and agricultural soils in Turkey [J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(16): 4652–4664.
- [19] 邵义萍, 莫测辉, 李彦文, 等. 长期施用粪肥土壤中喹诺酮类抗生素的含量与分布特征[J]. *中国环境科学*, 2010, 30(6): 816–821. Tai Y P, Mo C H, Li Y W, et al. Concentration and distribution of quinolone antibiotics in long-term manure-amended soils[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(6): 816–821.