

王磊, 王金花, 王军, 等. 四种抗生素对小麦玉米高粱三种作物种子芽与根伸长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(2): 216–222.

WANG Lei, WANG Jin-hua, WANG Jun, et al. Effects of four antibiotics on seed germination and root elongation of wheat, maize and sorghum[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(2): 216–222.

四种抗生素对小麦玉米高粱三种作物种子芽与根伸长的影响

王磊, 王金花*, 王军, 朱鲁生, 王兰君

(山东农业大学资源与环境学院, 山东泰安 271000)

摘要:为了探明土霉素(OTC)、强力霉素(DOX)、恩诺沙星(ENR)、氧氟沙星(OFL)四种典型兽用抗生素对三种常见田间作物(小麦、玉米、高粱)的生态毒理效应,为评价抗生素对作物的影响提供必要的基础数据,采用水培法,研究了不同浓度的四种抗生素对小麦、玉米、高粱种子萌发时根长和芽长的影响。结果显示:土霉素和强力霉素对三种作物种子的毒性作用相似,对作物的影响程度依次为小麦>高粱>玉米;恩诺沙星和氧氟沙星对三种作物种子的毒性作用相似,影响程度依次为小麦>玉米>高粱。对比作物根的生长和芽的生长结果可以看出,三种作物种子根长对环境中的抗生素更加敏感。三种作物对抗生素的敏感程度差异比较显著,小麦对四种抗生素的敏感程度为恩诺沙星>氧氟沙星>土霉素>强力霉素,玉米对四种抗生素的敏感程度为恩诺沙星>强力霉素>土霉素>氧氟沙星,高粱对四种抗生素的敏感程度为强力霉素>土霉素>恩诺沙星>氧氟沙星。

关键词:抗生素;小麦;玉米;高粱;发芽

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672–2043(2017)02–0216–07 doi:10.11654/jaes.2016–1120

Effects of four antibiotics on seed germination and root elongation of wheat, maize and sorghum

WANG Lei, WANG Jin-hua*, WANG Jun, ZHU Lu-sheng, WANG Lan-jun

(College of Resources and Environment, Shandong Agricultural University, Tai'an 271000, China)

Abstract: In order to explore four typical veterinary antibiotics' [oxytetracycline (OTC), doxycycline (DOX), enrofloxacin (ENR), ofloxacin (OFL)] biological toxicological effects toward three common field crops (wheat, corn, sorghum), four antibiotics' impacts with different concentration toward the length of root and bud for wheat, corn and sorghum were studied by Hydroponic method. The results show that oxytetracycline and doxycycline have similar toxic effects on the three crops, and the effective degree of crops is wheat>sorghum>corn; enrofloxacin and ofloxacin have similar toxic effects on the three crops, and the effective degree of crops is wheat>corn>sorghum. Comparison of growth of crop root and growth result of bud tells us, the root of the three crops is more sensitive to the antibiotics in environment. The difference in sensitivity degree of the three crops to antibiotic is significant. The sensitivity degree of wheat to four antibiotics is ENR>OFL>OTC>DOX. The sensitivity degree of corn to the four antibiotics is ENR>DOX>OTC>OFL. The sensitivity degree of sorghum to the four antibiotics is DOX>OTC>ENR>OFL. The experimental result provides necessary data base for evaluating influence of antibiotics on crops.

Keywords: antibiotic; wheat; corn; sorghum; burgeon

收稿日期:2016–08–30

作者简介:王磊(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为污染治理与修复。E-mail:wangleWY1@163.com

*通信作者:王金花 E-mail:wjh@sdaa.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(21377075, 41671320);国家科技重大专项(2016YFD0201203);山东省自然科学基金(ZR2016JL029);泰山学者工程专项

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(21377075, 41671320); The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of China(2016YFD0201203); The Natural Science Foundation of Shandong Province, China(ZR2016JL029); The Special Funds of Taishan Scholar of Shandong Province, China

抗生素作为广谱抗菌药物,大量地应用于人和动物的感染性疾病治疗,并添加在饲料中作为生长促进剂促进动物的生长发育^[1-2]。但有研究发现,抗生素被动物体摄入后,将有 30%~90%以原药和代谢产物的形式通过粪尿排出体外进入到环境当中^[3]。我国畜禽饲料中,存在超量添加抗生素的现象,导致粪便中抗生素的浓度一般较高,且集约化养殖场的动物排泄物中抗生素的残留量一般高于散养动物排泄物中抗生素残留量^[4-5]。

随着兽用抗生素和畜禽粪便的大量使用,在土壤和水体中,越来越多的抗生素被检测出来,威胁生态系统安全和人类健康^[6-7]。抗生素等兽药进入生态环境后,不仅对陆生植物、土壤微生物造成影响,还影响土壤动物、原生生物,以及水生生物中的浮游类生物、微生物、鱼虾及水体甲壳动物等^[8-10]。尹春燕等^[11]分析了山东省某设施菜地的 20 个蔬菜大棚,并在所有土样中均检测出抗生素,其中四环素类抗生素是检测地区主要的抗生素种类,总含量 $\Sigma(\text{TCs})$ 为 26.79~1 010.11 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,喹诺酮类抗生素总含量 $\Sigma(\text{QNs})$ 在 0~1 017.06 $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤环境中高含量的抗生素可以显著减少土壤中微生物的数量和种类,导致土壤中生物群落的改

变^[12],从而间接影响植物的生长。抗生素进入农田,还可以与植物之间发生迁移^[13-14],有研究表明抗生素可以引起植物根尖细胞微核率大幅度升高,造成细胞遗传物质损伤,影响植物的生长^[15]。

本实验选取畜禽粪便中检测频率比较高的土霉素、强力霉素、恩诺沙星、氧氟沙星作为供试化合物,以小麦、玉米、高粱三种农作物为研究对象,研究不同种类的抗生素在不同浓度下对三种主要田间农作物种子发芽的影响。通过对比抗生素作用下作物芽长和根长的受抑制程度,评价和分析不同抗生素对作物生长以及对环境的影响程度,以期对畜禽粪便的处理和使用提供理论支持,保证农产品的安全。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试药品

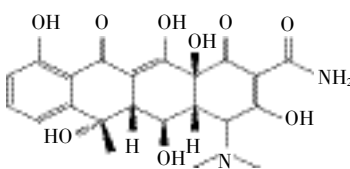
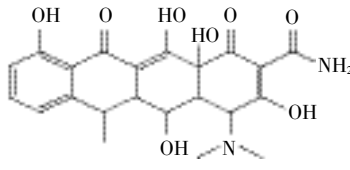
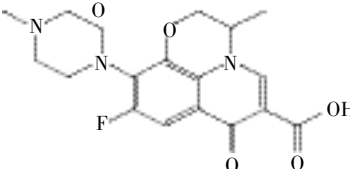
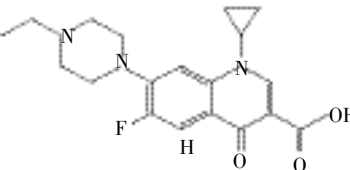
实验所选用的四种抗生素的结构式、分子式和正辛醇-水分配系数如表 1 所示。

1.1.2 供试种子

实验所用小麦为山农优麦 3 号,玉米为郑单 958、高粱为红星二号。

表 1 4 种抗生素的结构式、分子式、正辛醇-水分配系数

Table 1 Structural formula, molecular formula and octanol-water partition coefficient of the four antibiotics

抗生素	CAS number	化学式	结构式	$\lg K_{ow}$
OTC	79-57-2	$\text{C}_{22}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_9$		3.74
DOX	564-25-0	$\text{C}_{22}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_8$		-0.26
OFL	82 419-36-1	$\text{C}_{18}\text{H}_{20}\text{FN}_3\text{O}_4$		0.446
ENR	93 106-60-6	$\text{C}_{19}\text{H}_{22}\text{FN}_3\text{O}_3$		4.45

1.2 方法

1.2.1 种子消毒与催芽

实验前,把三种作物种子用纱布包起来,置于0.2%的次氯酸钠溶液中浸泡10 min左右,目的是给种子消毒,排除微生物等对种子萌发的影响。然后,用去离子水仔细冲洗干净,直至没有次氯酸钠的味道即可,在40℃的温水中浸泡2~3 h直至水温降至常温,共浸泡两次。将种子转移至消毒的纱布内,放入培养皿中,在(25±1)℃的培养箱里培养至露白备用。

1.2.2 实验方法

在直径9 cm的玻璃培养皿中平整的放入三层滤纸,分别加入10 mL不同浓度的抗生素溶液,将挑选出的大小一致、颗粒饱满的小麦、玉米、高粱三种作物的种子均匀放在培养皿中,每个培养皿放入消毒后露白的种子10粒。保持种子胚根末端与生长方向呈直线,盖好玻璃培养皿,培养皿用保鲜膜封口,以保持滤纸的湿润。将培养皿置于(25±1)℃的恒温培养箱中避光培养72 h,再调节光照为66%继续培养24 h,然后取出观察,用刻度尺量出并记录种子芽长以及主根的长度。当对照的种子发芽率>90%,且确定种子芽长和根长抑制率达到10%~60%时,开始正式实验^[7]。

根据预实验结果和参考相关文献,设置合理的正式实验浓度,其中土霉素、强力霉素的浓度设置为10、20、40、80、160 mg·L⁻¹,氧氟沙星和恩诺沙星的浓度设置为20、40、80、160、320 mg·L⁻¹^[16-17]。每个浓度梯度下设置三个平行实验,同时设置三组空白对照。在与预实验相同的水分、温度和操作条件下,进行正式实验。实验结束后,测定不同抗生素作用下不同作物种子的芽长和主根的长度。

1.3 数据处理

运用Excel 2010计算各处理组的平均值、方差和标准偏差,绘制不同抗生素浓度下作物芽长柱状图和根长柱状图。运用SPSS 22.0进行各处理组的差异显著性分析(差异显著水平为 $P<0.05$),并运用概率单位回归(Probit regression)进行曲线拟合,计算抗生素对作物根长的半数抑制浓度^[18]。

2 结果与分析

2.1 土霉素对三种作物种子芽长和根长的影响

从图1可以看出,土霉素对三种作物芽长的影响主要为抑制作用。与空白对照相比,土霉素的浓度达到10 mg·L⁻¹时,小麦的芽长出现明显缩短,浓度达到20 mg·L⁻¹时,玉米的芽长出现明显缩短,而浓度达到

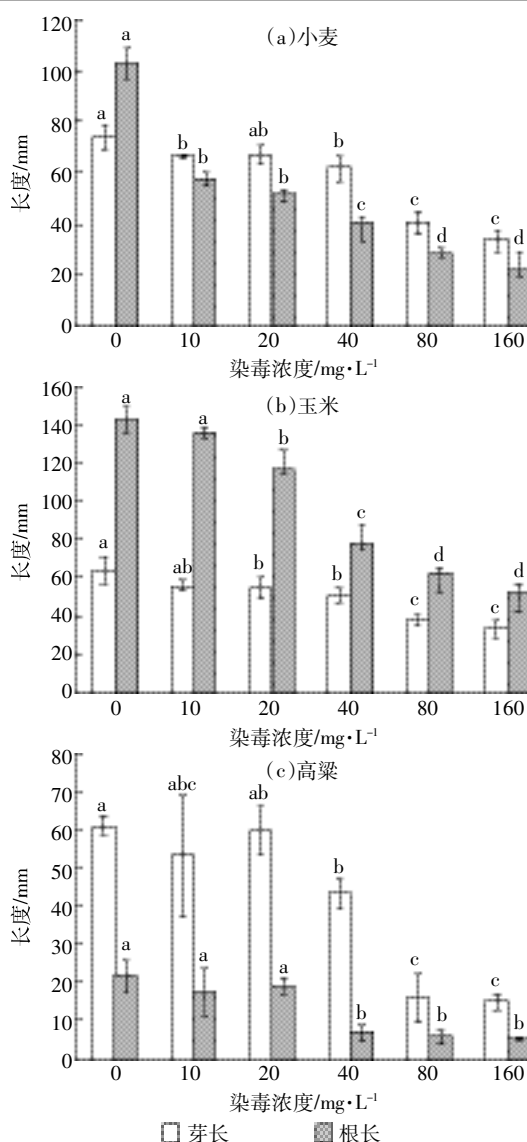


图1 土霉素对三种作物种子芽长和根长的影响

Figure 1 Effect of OTC on the root length of three kinds of crops

40 mg·L⁻¹时,高粱的芽长才出现明显的缩短;在浓度达到80 mg·L⁻¹时,小麦芽长从40 mg·L⁻¹时的62.1 mm减少到40.3 mm;玉米芽长从40 mg·L⁻¹时的50.4 mm减少到37.7 mm;高粱芽长从40 mg·L⁻¹时的43.5 mm减少到16.1 mm;在80、160 mg·L⁻¹两个浓度下,抗生素对3种作物芽长的抑制作用差异不明显。

土霉素对三种作物根长的影响随抗生素浓度的提高而逐渐增大,且呈显著抑制作用。与空白相比,小麦的根长从103.1 mm减少到10 mg·L⁻¹时的57.7 mm;对玉米根长的抑制作用也很明显,从10 mg·L⁻¹时的135.6 mm减少到20 mg·L⁻¹时的116.5 mm;在80、160 mg·L⁻¹的高浓度下,对小麦根长和玉米根长抑制作用最大,但两浓度间无明显差异。与空白对照相比,10 mg·L⁻¹和20 mg·L⁻¹浓度下的土霉素对高粱根长

的抑制作用并不显著,根长分别为 17.6、19.2 mm,当浓度达到 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,才有明显抑制作用,根长为 6.9 mm。

2.2 强力霉素对三种作物种子芽长和根长的影响

从图 2 可知,强力霉素对小麦和玉米芽长的抑制作用在 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度时才出现显著差异,从 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 64.0、54.2 mm 减少到 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时的 47.4、41.6 mm,且浓度越高,抑制作用越大。与空白对照相比, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下强力霉素对高粱芽长有一定的促进作用,从 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 61.0 mm 伸长到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 71.0 mm,但是浓度从 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 增至 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,抗生素浓度越高,强力霉素对高粱芽长的抑制作用越明显。

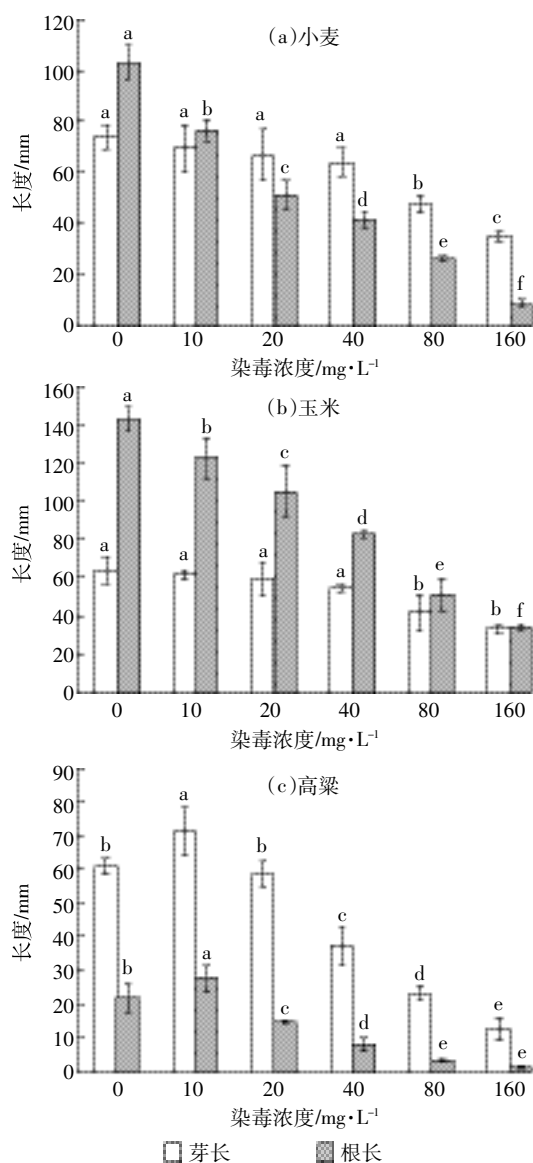


图 2 强力霉素对三种作物种子芽长和根长的影响

Figure 2 Effect of DOX on the root length of three kinds of crops

强力霉素对小麦和玉米根长的影响均表现出显著的抑制作用,且随浓度的提高,抑制作用增大。与空白对照相比,强力霉素对高粱根长的影响与对芽长的影响相似, $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下强力霉素对高粱根长有一定的促进作用,从 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 21.7 mm 伸长到 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 27.5 mm,随浓度从 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 升高到 $160 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,强力霉素对高粱根长的抑制作用越来越明显。

2.3 恩诺沙星对三种作物种子芽长和根长的影响

从图 3 中可知,恩诺沙星对小麦芽长和玉米芽长的抑制作用在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度时就出现显著性差异。而在 $20 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 到 $320 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,随着浓度的升高,恩诺沙星对玉米芽长的抑制作用无显著性差异。在 $0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 到 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,恩诺沙星对

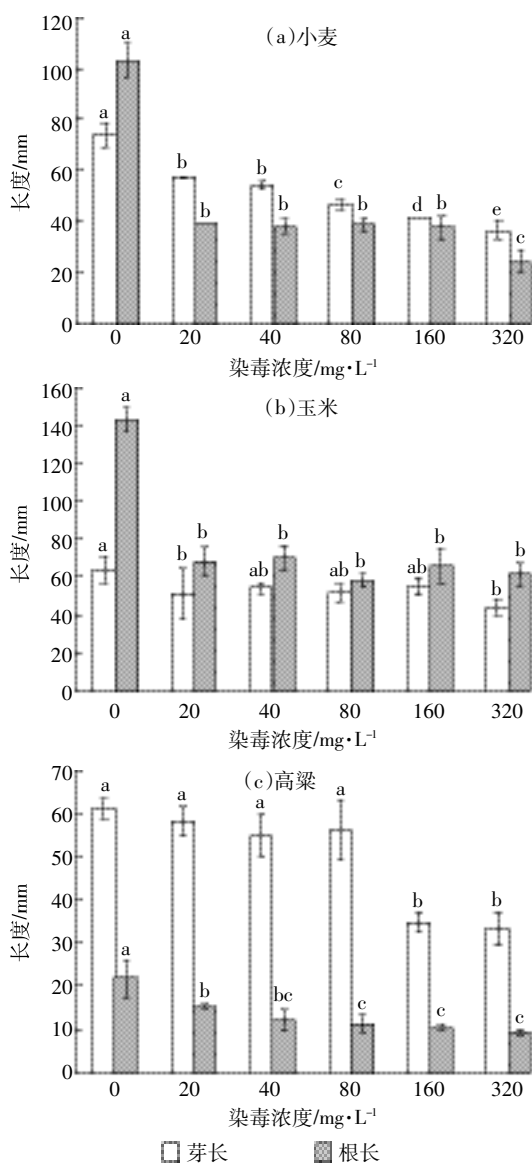


图 3 恩诺沙星对三种作物种子芽长和根长的影响

Figure 3 Effect of ENR on the root length of three kinds of crops

高粱芽长没有显著性抑制作用,在 80 mg·L⁻¹ 到 160 mg·L⁻¹ 浓度范围内,高粱的芽长从 56.2 mm 减少到 34.8 mm,但在 160 mg·L⁻¹ 到 320 mg·L⁻¹ 浓度范围内,恩诺沙星对高粱芽长的抑制作用无显著性差异。

恩诺沙星对三种作物根长在 20 mg·L⁻¹ 时已经有显著的抑制作用,小麦的根长从 0 mg·L⁻¹ 的 103.1 mm 减少到 20 mg·L⁻¹ 的 39.5 mm;玉米的根长从 0 mg·L⁻¹ 的 142.8 mm 减少到 20 mg·L⁻¹ 的 68.1 mm;高粱的根长从 0 mg·L⁻¹ 的 21.7 mm 减少到 20 mg·L⁻¹ 的 15.4 mm。在 20 mg·L⁻¹ 到 160 mg·L⁻¹ 浓度范围内,随着浓度的升高,恩诺沙星对小麦根长和玉米根长抑制作用没有显著性变化,当浓度在 320 mg·L⁻¹ 时,出现了对小麦芽长差异性显著的抑制作用。在 40 mg·L⁻¹ 到 320 mg·L⁻¹ 浓度范围内,恩诺沙星对高粱根长的抑制作用无显著性差异。

2.4 氧氟沙星对三种作物种子芽长和根长的影响

从图 4 可知,氧氟沙星对小麦芽长呈显著抑制作用,与抗生素的浓度呈正相关,与空白对照相比,在染毒浓度范围内,氧氟沙星对玉米芽长的影响没有显著性差异。在低浓度时,氧氟沙星对高粱芽长没有显著抑制作用,当浓度达到 320 mg·L⁻¹ 时,才出现显著的抑制作用,高粱的芽长从 160 mg·L⁻¹ 时的 57.9 mm 减少到 30.9 mm。

氧氟沙星对小麦和玉米根长整体呈现显著抑制作用,小麦的根长从 0 mg·L⁻¹ 时的 103.1 mm 减少到 20 mg·L⁻¹ 的 48.0 mm;玉米的根长从 0 mg·L⁻¹ 时的 142.8 mm 减少到 20 mg·L⁻¹ 时的 105.3 mm。在 40~320 mg·L⁻¹ 浓度范围内,氧氟沙星对小麦根长的抑制作用差异性不显著,而氧氟沙星对玉米根长的影响在各浓度下差异性显著。与空白对照相比,氧氟沙星对高粱根长的影响在低浓度并不显著,当浓度在 160 mg·L⁻¹ 和 320 mg·L⁻¹ 时,才出现显著抑制作用,高粱的根长从 80 mg·L⁻¹ 时的 20.3 mm 减少到 160 mg·L⁻¹ 时的 13.1 mm 和 320 mg·L⁻¹ 时的 11.4 mm。

2.5 四种抗生素对三种作物种子根长的半数抑制浓度

从上面的分析中可以看出,与三种作物的根长相比,三种作物种子芽长对抗生素的生态毒性敏感程度显著低于根长。有文章指出,根长的抑制程度是评价抗生素生态毒性较好的指示指标^[9];且有学者指出,根生长较为敏感,可作为抗生素对蔬菜生态毒性的敏感指标^[7]。因此,计算并整理出四种抗生素对三种作物种子根长的半数抑制浓度(IC₅₀)。通过表 2 可以看出,不同抗生素对作物种子根伸长的 IC₅₀ 有显著的不

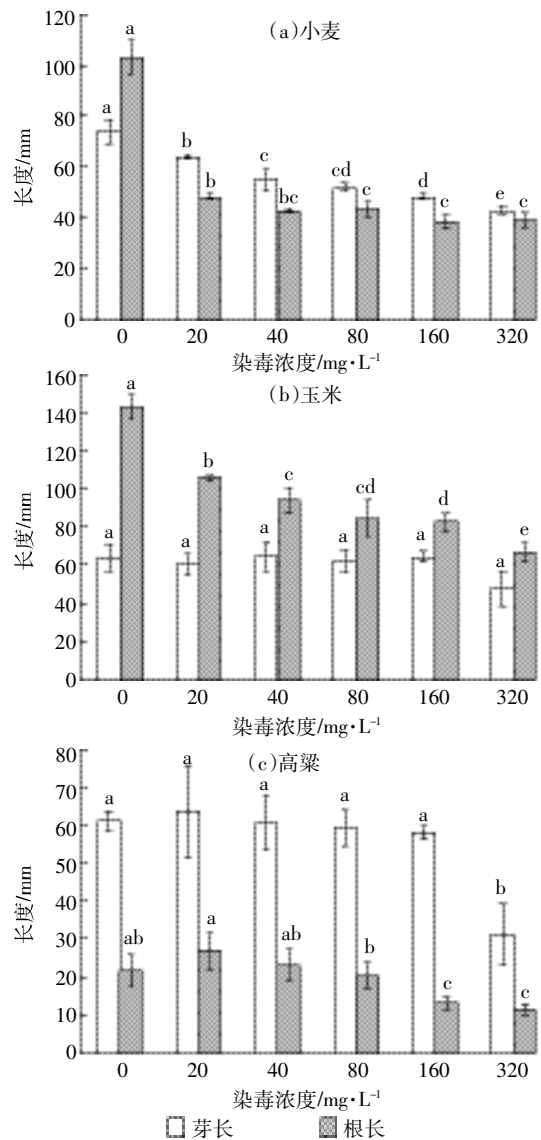


图 4 氧氟沙星对三种作物种子芽长和根长的影响

Figure 4 Effect of OFL on the root length of three kinds of crops

表 2 四种抗生素对三种植物根部长度的半数抑制浓度
Table 2 IC₅₀ values of four antibiotics on the root length of three crops

IC ₅₀ /mg·L ⁻¹	OTC	DOX	ENR	OFL
小麦	17.37	24.41	2.91	4.39
玉米	71.05	51.13	5.79	250.35
高粱	40.90	29.91	121.45	292.27

同,但是最低的浓度为 2.91 mg·L⁻¹,而对于大多数的农业土壤来说,抗生素残留浓度在 2 mg·L⁻¹ 以下^[11,20]。所以可以说明,在一般四环素类和喹诺酮类抗生素污染水平下,作物的生长不会受到影响,与徐秋桐等^[21]的研究结果一致。但是在作物播种时期,含有高浓度抗生素的生物粪便^[7]和制药废水的施用,可能会对作物种子芽和根伸长造成影响。

3 讨论

3.1 四种抗生素对农作物种子的毒性效应分析

由图1和图2可以看出,随着抗生素浓度的升高,两种四环素类抗生素对三种作物种子芽和根的生长均有抑制作用,且差异显著;由图3和图4可以看出,两种喹诺酮类抗生素对小麦和玉米的抑制作用在 $20\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时就出现了显著差异,但随着浓度的升高,抑制作用不再显著增加,说明抗生素对作物种子的生长是有明显毒性作用的。由表2可以看出,恩诺沙星和氧氟沙星对小麦的生态毒性大于土霉素和强力霉素,而对高粱正好相反。所以对不同作物来说,不同抗生素的生态毒性是不一样的。有研究表明, K_{ow} 决定了化合物在生物组织中的活性和毒性,是影响其通过扩散被吸收的重要因素,化合物的 $\lg K_{ow}$ 值在1~3.5之间时脂水溶解度达到平衡,具有被植物吸收的最大潜能^[2]。由表1可以看出,本实验所用四种抗生素的 $\lg K_{ow}$ 各不相同,所以对作物的生态毒性也有差别。且肖明月等^[23]的研究也表明,抗生素会对植物体内的三种抗氧化酶活性产生不良效应,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,给植物的正常生长造成一定的毒害作用。

3.2 作物的芽长和根长对抗生素敏感程度分析

从图1至图4可以看出,在同一抗生素浓度条件下,抗生素对芽长的毒性作用显著低于对根长的毒性作用。例如强力霉素对玉米芽长的影响,在 $0\sim 160\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的染毒浓度范围内,芽长分别为64.0、61.4、59.3、54.2、41.6、33.0 mm,而根长分别为142.8、122.4、105.0、83.0、51.0、33.6 mm。这与鲍艳宇等^[19]的研究相同,在不同介质中,小麦种子发芽率、根伸长和芽伸长对四环素和土霉素的生态毒性敏感顺序依次为:根伸长>发芽率>芽伸长。

三种作物的芽长和根长对抗生素的敏感程度可能与种子发芽和根生长的过程有关。通常,在种子的发芽过程中,除了受外界环境的影响,其主要养分还是来自于种子自身,所以外界环境对种子芽长的影响在一定浓度下表现并不是很明显,只有当外界环境中的污染物达到一定浓度,种子的发芽过程才会被完全抑制。而根部在种子萌发的过程中就完全暴露在外界环境之中,其生长和发育过程受外界环境的影响较大,因此种子萌发出来的根部对外界环境的污染更加敏感。这一结果也与其他污染物对植物影响的研究相似^[24-25],也就是说,环境中不能降解的抗生素对种子

的萌发有显著的影响作用,尤其是对作物种子根部的生长。

3.3 三种农作物种子对不同抗生素的耐药性分析

从表2可以看出,三种作物的种子对不同抗生素的敏感程度有明显的差异,三种作物的种子对四环素类抗生素的敏感程度依次为小麦>高粱>玉米,而对于喹诺酮类抗生素的敏感程度依次为小麦>玉米>高粱。从总体来看,相对于玉米种子和高粱种子来说,小麦种子生长更容易受到抗生素的影响,尤其是喹诺酮类抗生素,高粱种子对各种抗生素的耐受限度都相对较高。有研究指出,不同植物对同一种抗生素胁迫下表现出的敏感性不同,可能与抗生素作用的靶分子和作物本身的抗性机理有关,也可能与不同种子的种皮对不同抗生素的阻碍作用不同有关^[26],其具体机制和作用机理还需要进一步深入研究和探讨。由于本文的研究结果是在水培实验处理下得到的,与土壤环境中抗生素对作物的毒性影响可能会有一定的差异,下一步有必要进行土壤环境中四种抗生素对大田常见作物种子毒性影响方面的研究。

4 结论

(1)四环素类抗生素和喹诺酮类抗生素对三种供试作物的生态毒性作用和抑制作用各不相同,但是都是随着抗生素浓度的增加而逐渐增加。在四环素类抗生素染毒实验的浓度设置范围内,以 IC_{50} 作为评价指标,则强力霉素对玉米和高粱的毒性要高于土霉素,而对小麦的毒性要低于土霉素。在喹诺酮类抗生素染毒实验的浓度设置范围内,氧氟沙星对三种作物的毒性显著低于恩诺沙星。

(2)四种抗生素对作物种子根长的抑制作用显著大于对种子芽长的抑制作用。因此,作物幼苗根的生长对环境中的残留抗生素更加敏感,可以作为指示抗生素对作物生态毒性的敏感指标,反映环境中抗生素的污染情况。

(3)三种作物在被环境中的四种抗生素胁迫时,玉米对四环素类抗生素有更好的适应性,而高粱则对喹诺酮类抗生素有更好的适应性,受抑制作用更小,小麦对四种抗生素的适应性均较差。

参考文献:

- [1] Halling-Sørensen B, Nielsen S N, Lanzky P F, et al. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment: A review [J]. *Chemosphere*, 1998, 36(2): 357-93.
- [2] Martinez J L. Environmental pollution by antibiotics and by antibiotic

- resistance determinants[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(11): 2893–2902.
- [3] Hua F, Han Y, Yin Y, et al. Variations in dissipation rate, microbial function and antibiotic resistance due to repeated introductions of manure containing sulfadiazine and chlortetracycline to soil[J]. *Chemosphere*, 2014, 96(2): 51–56.
- [4] 王 瑞, 魏源送. 畜禽粪便中残留四环素类抗生素和重金属的污染特征及其控制[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1705–1719.
- WANG Rui, WEI Yuan-song. Pollution and control of tetracyclines and heavy metals residues in animal manure[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9): 1705–1719.
- [5] Li Y X, Zhang X L, Li W, et al. The residues and environmental risks of multiple veterinary antibiotics in animal faeces[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2013, 185(3): 2211–2220.
- [6] Sarmah A K, Meyer M T, Boxall 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.
- [7] Qian M, Wu H, Wang J, et al. Occurrence of trace elements and antibiotics in manure-based fertilizers from the Zhejiang Province of China[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 559: 174–181.
- [8] Liu F, Ying G G, Tao R, et al. Effects of six selected antibiotics on plant growth and soil microbial and enzymatic activities[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(5): 1636–1642.
- [9] Santos L H M L M, Araújo A N, Fachini A, et al. Ecotoxicological aspects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(1/2/3): 45–95.
- [10] Migliore L, Godeas F, Filippis S P D, et al. Hormetic effect(s) of tetracyclines as environmental contaminant on *Zea mays*[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 158(1): 129–34.
- [11] 尹春艳, 骆永明, 滕 应, 等. 典型设施菜地土壤抗生素污染特征与积累规律研究[J]. 环境科学, 2012, 33(8): 2810–2816.
- YIN Chun-yan, LUO Yong-ming, TENG Ying, et al. Pollution characteristics and accumulation of antibiotics in typical protected vegetable soils[J]. *China Environmental Science*, 2012, 33(8): 2810–2816.
- [12] Thiele-Bruhn S, Beck I C. Effects of sulfonamide and tetracycline antibiotics on soil microbial activity and microbial biomass[J]. *Chemosphere*, 2005, 59(4): 457–465.
- [13] Lillenberg M, Litvin S V, Nei L, et al. Enrofloxacin and ciprofloxacin uptake by plants from soil[J]. *Agronomy Research*, 2010, 8(1): 807–814.
- [14] Wu C, Spongberg A L, Witter J D, et al. Uptake of pharmaceutical and personal care products by soybean plants from soils applied with biosolids and irrigated with contaminated water[J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, 44(16): 6157–6161.
- [15] 王兰君, 王金花, 朱鲁生, 等. 4种典型PPCPs对蚕豆和大蒜根尖细胞微核率的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(4): 1568–1575.
- WANG Lan-jun, WANG Jin-hua, ZHU Lu-sheng, et al. Influence of four kinds of PPCPs on micronucleus rate of the root-tip cells of vicia-faba and garlic[J]. *China Environmental Science*, 2016, 37(4): 1568–1575.
- [16] 葛成军, 俞花美, 焦 鹏. 两种四环素类兽药抗生素对白菜种子发芽与根伸长抑制的毒性效应[J]. 生态环境学报, 2012, 21(6): 1143–1148.
- GE Cheng-jun, YU Hua-mei, JIAO Peng. Toxicological effects of two tetracycline antibiotics on the inhibition of seed germination and root elongation of Chinese cabbages[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(6): 1143–1148.
- [17] 魏子艳, 王金花, 夏晓明, 等. 三种抗生素对蔬菜种子芽与根伸长的生态毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 237–242.
- WEI Zi-yan, WANG Jin-hua, XIA Xiao-ming, et al. Ecotoxicity of three antibiotics to shoots and root elongation of cucumber, rape and Chinese cabbage[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2): 237–242.
- [18] 黄皓旻. 天然黄酮类化合物的抑藻活性-结构关系、作用机制及抑藻剂开发研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- HUANG Hao-min. Study on antialgal mechanism, structure-activity relationships and algistatic agent development of natural flavonoids[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016.
- [19] 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 Yan-yu, ZHOU Qi-xing, XIE Xiu-jie. Influence of tetracycline kind antibiotics on the control of wheat germination and root elongation[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(6): 566–570.
- [20] Li C, Chen J, Wang J, et al. Occurrence of antibiotics in soils and manures from greenhouse vegetable production bases of Beijing, China and an associated risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 521/522(1): 101–107.
- [21] 徐秋桐, 顾国平, 章明奎. 土壤中兽用抗生素污染对水稻生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(1): 60–65.
- XU Qiu-tong, GU Guo-ping, ZHANG Ming-kui. Effects of soil veterinary antibiotics pollution on rice growth[J]. *Journal of Agricultural Resources & Environment*, 2016, 33(1): 60–65.
- [22] Dodgen L K, Li J, Parker D, et al. Uptake and accumulation of four PPCP/EDCs in two leafy vegetables[J]. *Environmental Pollution*, 2013, 182C(6): 150–156.
- [23] 肖明月, 安 婧, 纪占华, 等. 六种常见抗生素对小白菜种子萌发及生理特性的影响[J]. 生态学杂志, 2014, 33(10): 2775–2781.
- XIAO Ming-yue, AN Jing, JI Zhan-hua, et al. Toxic effects of six typical antibiotics on seed germination and physiological characteristics of Chinese cabbage[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(10): 2775–2781.
- [24] 胡 斌, 王 丹, 王松山, 等. 铜、硒复合污染对小白菜生长及金属吸收和转运的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2033–2041.
- HU Bin, WANG Dan, WANG Song-shan, et al. Uptake and transport of exogenous Cu and Se in pakchoi and their effects on growth[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(9): 2033–2041.
- [25] Pan M, Chu L M. Phytotoxicity of veterinary antibiotics to seed germination and root elongation of crops[J]. *Ecotoxicology & Environmental Safety*, 2016, 126: 228–237.
- [26] 张乙涵, 伍 钧, 陈 莉, 等. 基于植物根伸长终点测试四环素对植物的毒性阈值及其敏感性分布(SSD)[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(2): 243–249.
- ZHANG Yi-han, WU Jun, CHEN Li, et al. Toxicity thresholds of tetracycline to plants as determined by root elongation and its species sensitivity distributions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(2): 243–249.