

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

李 通, 金彩霞, 朱雯斐, 刘国光, 刘海津

(河南师范大学化学与环境科学学院, 河南省环境污染控制重点实验室, 黄淮水环境与污染防治省部共建教育部重点实验室, 河南 新乡 453007)

摘 要:采用急性毒性试验方法,研究了环丙沙星与 Cu 复合污染对 3 种作物(玉米、萝卜和小白菜)种子发芽、根伸长及芽伸长的影响。结果表明,在环丙沙星与 Cu 复合作用下,3 种作物根伸长抑制率和芽伸长抑制率与药物浓度显著相关($P < 0.05$);在不同 Cu 处理浓度下,3 种作物根伸长抑制率和芽伸长抑制率均随环丙沙星浓度的增大而增大。低 Cu 浓度($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)下,环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米根伸长和芽伸长的联合作用表现为拮抗作用,对萝卜根伸长和芽伸长表现为协同作用,对小白菜的根伸长表现为拮抗作用,而对小白菜的芽伸长表现为协同作用;在高浓度 Cu($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)胁迫下,二者复合污染对玉米的根伸长和芽伸长均起一定协同作用,而对萝卜和小白菜的根伸长起拮抗作用,芽伸长起协同作用。

关键词:环丙沙星;Cu;复合污染;芽伸长;根伸长;抑制率

中图分类号:X503.231 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)01-0015-06 doi:10.11654/jaes.2013.01.003

Joint Toxicity of CPFX and Cu on Seed Germination and Root Elongation of Corn, Radish and Chinese Cabbage

LI Tong, JIN Cai-xia, ZHU Wen-fei, LIU Guo-guang, LIU Hai-jin

(School of Chemistry and Environmental Sciences, Henan Normal University, Henan Key Laboratory of Environmental Pollution Control, Key Laboratory for Yellow River and Huaihe River Water Environmental and Pollution Control, Ministry of Education, Xinxiang 453007, China)

Abstract: Three vegetables, corn, radish and Chinese cabbage, were chosen to study on the acute toxic effects of ciprofloxacin (CPFX)-Cu pollutants on their germination percentage, root elongation and shoot elongation. The results showed that the inhibitory rates of germination percentage, root elongation and shoot elongation of the three vegetables had significant correlations to CPFX-Cu concentrations ($P < 0.05$). In three different Cu concentrations, the inhibitory of root elongation and shoot elongation of the three vegetables increased along with the CPFX concentration. With increasing concentration of CPFX, differences among three Cu concentration on the inhibitory rate of root (shoot) elongation of corn and radish were decreased. In the joint effects of CPFX and Cu, the interactive effects of the two pollutants on root and shoot elongation of the three vegetables were very complicated. When Cu concentration was low ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), CPFX-Cu showed antagonistic effect on corn's root elongation and shoot elongation, and synergistic effect on radish's. Furthermore, they showed antagonistic effect on root elongation of Chinese cabbage and synergistic effect on shoot elongation. When Cu concentration was high ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), CPFX-Cu showed some synergistic effect on root elongation and shoot elongation of corn. On the other hand, they showed antagonistic effect on root elongation of radish and Chinese cabbage, and synergistic effect on shoot elongation.

Keywords: CPFX; Cu; joint toxicity; shoot elongation; root elongation; inhibitory rate

收稿日期:2012-06-15

基金项目:国家自然科学基金“不同植物根-土界面磺胺类药物环境行为及生物有效性”项目(21107023);河南省基础与前沿项目(112300413218)

作者简介:李 通(1987—),男,河南驻马店人,在读硕士,研究方向为土壤生物修复。E-mail:yitian30821@163.com

由于抗生素在生物体内停留时间短(几到十几小时)、代谢率低(25%~75%),大量的抗生素以母体的形式从生物体排出,并通过各种途径进入环境。目前在土壤、水体和河湖沉积物中都检测到各种类型的抗生素,抗生素对生态系统的潜在危害已经引起人们的广泛关注。Migliore 等^[1]已经在生长于恩诺沙星污染土壤的农作物中检测到了代谢产物环丙沙星。这些结果都显示环丙沙星对生态系统有危害。另一方面,重金属也通过工业排放、污水灌溉等多种途径进入农田系统,对作物的生长发育产生不良影响^[2-3]。重金属 Cu 是中国农田土壤环境质量标准评价指标之一,一、二、三级土壤的 Cu 含量分别为 35、100、400 mg·kg⁻¹。随着现代工业的迅速发展和含 Cu 农药的大量使用,Cu 污染土壤的面积逐年扩大,污染土壤中 Cu 的含量也越来越高,有的甚至超过 1000 mg·kg⁻¹,严重影响粮食产量甚至危害人体健康^[4-6]。农田生态系统中普遍存在抗生素类药物与重金属的复合污染,而目前针对此类新型复合污染开展的生态毒理学实验较少,因此有必要展开相关方面的研究。

目前已建立的高等植物毒理实验方法主要有三种:根伸长实验、种子发芽试验和植物幼苗早期生长实验^[7-9]。目前重金属对植物生长的毒性响应已有很多研究^[10-12],但重金属与环丙沙星的联合作用对农作物的毒性效应尚未见文献报道。

本实验测定了环丙沙星与重金属(Cu)复合污染对玉米、白菜、萝卜种子根伸长和芽伸长的影响。通过作物幼苗生长受抑制程度,旨在揭示环丙沙星与 Cu 复合污染的生态毒性效应,以及这种复合污染可能对农业生产带来的生态风险。

1 材料与方法

1.1 实验材料

(1)供试药品:环丙沙星盐酸盐一水合物,纯度>98%,梯希爱(上海)化成工业发展有限公司;CuSO₄·5H₂O 分析纯,广州化学试剂厂生产。

(2)供试种子和土壤:小白菜(*Pakchoi Cabbage*, 品种为上海青),发芽率为 98%;萝卜(*Raphanus Sativus* L., 盛丰二号),发芽率 80%;玉米(*Indian Corn*, 郑单 958),发芽率为 98%。以上 3 种种子均购自新乡市种子分公司。供试土壤采自河南师范大学校内生物实验田 0~20 cm 表土。

1.2 实验方法

(1)预备试验:称取 50 g 风干土壤置于直径 90

mm 的玻璃培养皿中,加入不同剂量的环丙沙星与铜离子,搅拌均匀,并用去离子水调节土壤含水量至田间最大持水量的 60%,用镊子将植物种子均匀播种于土壤中(种子放置时,保持种子胚根末端和生长方向呈直线),盖好玻璃培养皿,并置于恒温培养箱中 25℃下暗处培养。当对照种子的发芽率>90%,根长度为 20 mm 时,结束实验。确定种子根和芽伸长抑制浓度,使其抑制率在 10%~70%之间,开始正式试验,抑制率按下式计算:

抑制率=

$$\frac{\text{处理浓度下根(芽)伸长}-\text{对照根(芽)伸长}}{\text{对照根(芽)伸长}} \times 100\%$$

(2)正式试验:根据预备试验结果,在种子芽根伸长抑制率 10%~70%范围内,设置环丙沙星的不同处理浓度。环丙沙星的处理浓度如下:玉米为 0.5、1、2、5、10、20 mg·kg⁻¹;萝卜为 0.5、1、2、3、5 mg·kg⁻¹;小白菜为 0.1、0.5、1、2、4 mg·kg⁻¹。Cu 的浓度设置为 0、100、400 mg·kg⁻¹。每个处理 20 粒种子,3 次重复。在与预备试验相同条件下进行作物种子发芽和生长培养实验。试验结束后,测定各处理浓度下种子的根伸长、芽伸长,计算根长度和芽长度的平均值和标准偏差,绘制浓度-抑制率曲线,进行回归分析,并计算 ID_{50(环)}(抑制率为 50%时,土壤中环丙沙星的浓度)。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2003 和 Origin7.5 数据处理软件(美国 Microcal Software 公司)对数据进行方差分析及回归分析,计算出 ID_{50(环)},对剂量-效应曲线进行拟合并作图。本实验差异显著性水平为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米种子芽伸长及根伸长的影响

环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米根伸长和芽伸长的影响见图 1。在 3 个不同 Cu(0、100、400 mg·kg⁻¹)的胁迫下,土壤中环丙沙星浓度与玉米根(芽)伸长抑制率之间具有显著的相关性($P<0.05$),相关回归方程见表 1。

由图 1 可以看出,在不同 Cu 处理浓度下,玉米根伸长与芽伸长抑制率均随着环丙沙星浓度的增大而增大。当土壤中环丙沙星浓度为 2 mg·kg⁻¹,Cu 的加入量为 0、100、400 mg·kg⁻¹时,对玉米芽伸长抑制率分别为 20.75%、-9.51%、47.56%,对玉米根伸长的抑制率分别为 38.65%、33.64%、45.92%;随着环丙沙星

浓度增加,当土壤中环丙沙星的浓度达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,3 个不同 Cu(0 、 100 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)浓度下,玉米芽伸长抑制率分别为 48.01% 、 34.34% 、 69.61% ,玉米根伸长的抑制率分别为 66.84% 、 62.73% 、 78.44% 。另外,从图 1 呈现的趋势可以看出,随着环丙沙星浓度的增大,3 个不同 Cu 处理浓度对玉米根(芽)伸长抑制率之间的差异是逐渐减小的。

从图 1 不难看出,在相同环丙沙星浓度下,随着 Cu 加入量的增加,其对玉米根(芽)伸长抑制率呈现先降低后升高的趋势。高 Cu($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理对玉米根(芽)伸长的影响要大于低 Cu(0 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理,但 Cu($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理对玉米根(芽)伸长的抑制率却小于 Cu($0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)处理,即小于未添加 Cu 的单一的环丙沙星污染。当土壤中环丙沙星浓度为 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高 Cu($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对玉米根伸长抑制率为 51.47% ,而低 Cu(0 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对玉米的根伸长抑制率分别为 47.23% 和 20.88% 。这说明在低量的 Cu 作用下,环丙沙星对玉米根(芽)伸长的影响相对较小,二者对玉米生长产生了一定的拮抗作用。随着 Cu 添加量的增大,当土壤中 Cu 的量达到 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,二者对玉米根伸长与芽伸长不再是拮抗作用,其

联合毒性效应要大于单一环丙沙星毒性效应。

由表 1 可知,当 Cu 的添加量为 0 、 100 、 $400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,玉米根伸长与芽伸长 $\text{ID}_{50(\text{环})}$ 值呈先增大后减小的趋势,分别为 4.81 、 8.28 、 $4.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 9.27 、 12.54 、 $5.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 环丙沙星与 Cu 复合污染对萝卜种子芽伸长及根伸长的影响

由图 2 和表 2 可知,环丙沙星与 Cu 复合污染

表 1 环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米生长抑制的回归方程和 $\text{ID}_{50(\text{环})}$

Table 1 Regression equation of CPFX-Cu on inhibitory rate of root elongation and shoot elongation of corn

Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	回归方程	R^2	P	$\text{ID}_{50(\text{环})}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
0	$RI=3.414 \ 7X+24.68$	0.840 5	<0.05	4.81
	$SI=3.783X+8.977 \ 4$	0.868 7	<0.01	9.27
100	$RI=4.105 \ 2X+15.998$	0.878 6	<0.01	8.28
	$SI=5.666 \ 1X-21.084$	0.955 4	<0.01	12.54
400	$RI=6.059 \ 8X+23.947$	0.851 6	<0.01	4.29
	$SI=2.975 \ 2X+35.918$	0.945 4	<0.01	5.02

注:RI 为根伸长抑制率(Inhibitory rate of root elongation);SI 为芽伸长抑制率(Inhibitory rate of shoot elongation);X 为环丙沙星的浓度。下表同。

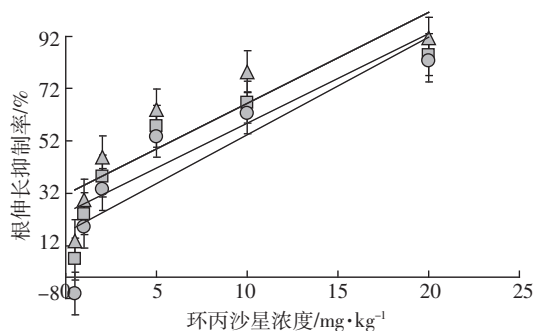
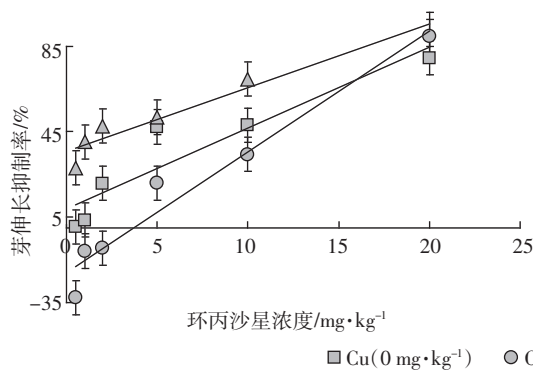


图 1 环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米根伸长和芽伸长的抑制效应

Figure 1 Toxic effects of CPFX-Cu on the elongation of root and shoot of corn

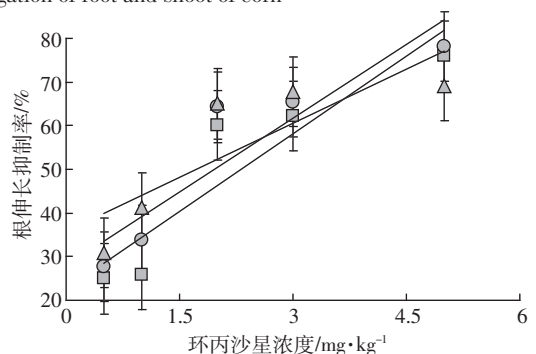
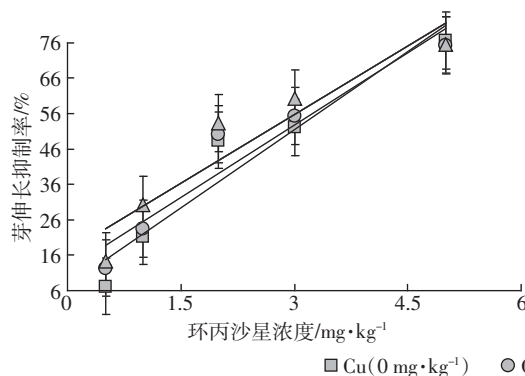


图 2 环丙沙星与 Cu 复合污染对萝卜根伸长和芽伸长的抑制效应

Figure 2 Toxic effects of CPFX-Cu on the elongation of root and shoot of radish

时,萝卜根伸长和芽伸长抑制率与土壤中环丙沙星浓度之间具有相关性。在 3 个不同 Cu(0、100、400 mg·kg⁻¹)处理浓度下,土壤中环丙沙星浓度与萝卜芽伸长抑制率之间的相关性($P<0.01$)均好于根伸长抑制率的相关性($P<0.05$)。

从图 2 看出,在高、低环丙沙星浓度下,随着 Cu 浓度的增加,其对萝卜芽伸长的抑制率均相应增大。但是,随着环丙沙星浓度增大,3 个不同 Cu 处理浓度下芽伸长抑制率之间的差异却逐渐减小。如图 2,当土壤中环丙沙星浓度为 0.5 mg·kg⁻¹ 时,3 个不同 Cu(0、100、400 mg·kg⁻¹)处理浓度下的芽伸长抑制率分别为 7.17%、12.38%、14.26%,最高相差 7.09%;当土壤中环丙沙星浓度达到 5 mg·kg⁻¹ 时,3 个不同 Cu(0、100、400 mg·kg⁻¹)处理浓度下的芽伸长抑制率分别为 74.64%、75.32%、75.43%,最高仅相差 0.79%。

由图 2 可知,不同 Cu 浓度下,萝卜根伸长抑制率与芽伸长抑制率所呈现的趋势有些不同,高 Cu 作用下,环丙沙星对萝卜根伸长的影响相对较小,二者对萝卜的生长产生了一定的拮抗效应。当萝卜根伸长抑制率高于 70% 时,在相同环丙沙星的浓度下,高 Cu(400 mg·kg⁻¹)处理对萝卜根伸长的影响小于低 Cu(0、100 mg·kg⁻¹)处理。土壤中环丙沙星浓度为 5 mg·kg⁻¹ 时,高 Cu(400 mg·kg⁻¹)对萝卜根伸长抑制率为 69.15%,而低 Cu(0、100 mg·kg⁻¹)对萝卜的根伸长抑制率分别为 76.02% 和 78.13%。

由表 2 可知,Cu 的浓度为 0、100、400 mg·kg⁻¹ 时,其 ID_{50(环)} 分别为 2.34、1.96、1.21 mg·kg⁻¹ 和 2.90、2.79、2.28 mg·kg⁻¹。可以看出,随着 Cu 浓度增加,其 ID_{50(环)} 值逐渐减小,从总体趋势上可以说明 Cu 的加入,增加了环丙沙星对萝卜根伸长及芽伸长的毒性,二者对萝卜的生长起到一定的协同作用。

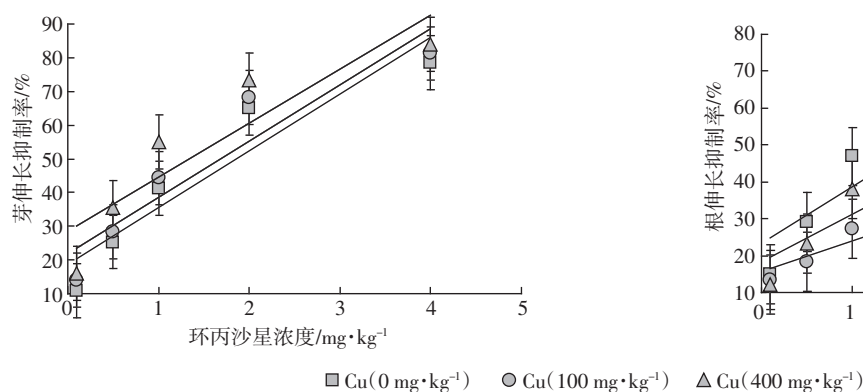


图 3 环丙沙星与 Cu 复合污染对小白菜根伸长和芽伸长的抑制效应

Figure 3 Toxic effects of CPFX-Cu on the elongation of root and shoot of Chinese cabbage

表 2 环丙沙星与 Cu 复合污染对萝卜生长抑制的

回归方程和 ID_{50(环)}

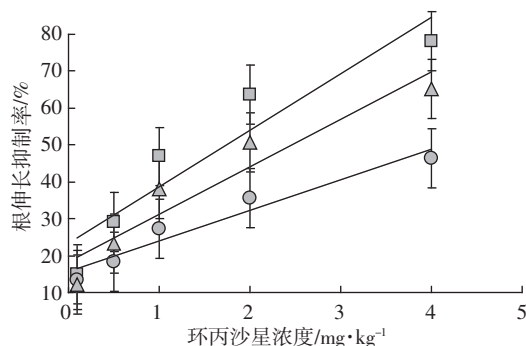
Table 2 Regression equation of CPFX-Cu on inhibitory rate of root elongation and shoot elongation of radish

Cu/mg·kg ⁻¹	回归方程	R ²	P	ID _{50(环)} /mg·kg ⁻¹
0	RI=11.897X+22.469	0.846 4	<0.05	2.34
	SI=14.712X+7.293	0.928 9	<0.01	2.90
100	RI=11.211X+28.065	0.841 9	<0.05	1.96
	SI=13.611X+12.043	0.924 2	<0.01	2.79
400	RI=8.219 6X+35.921	0.704 2	<0.01	1.21
	SI=12.874X+17.117	0.893 2	<0.01	2.28

2.3 环丙沙星与 Cu 复合污染对小白菜种子芽伸长及根伸长的影响

在不同处理浓度的 Cu 胁迫下,土壤中环丙沙星的浓度与小白菜芽伸长和根伸长之间的剂量-效应关系如图 3 所示,相关回归方程见表 3。由图 3 和表 3 可知,小白菜根伸长和芽伸长抑制率与土壤中环丙沙星的浓度之间具有相关性($P<0.05$)。从总体趋势上来看,土壤中环丙沙星浓度与小白菜根伸长抑制率之间的相关性要好于芽伸长抑制率。

从图 3 可以看出,同环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米根伸长影响相似,在相同环丙沙星浓度下,随着 Cu 加入量的增加,其对小白菜根伸长抑制率也呈现先降低后升高的趋势。低浓度 Cu 加入,降低了环丙沙星对小白菜根伸长的毒性,二者对小白菜根伸长起拮抗作用,与玉米不同的是,在高 Cu 作用下,二者对小白菜根伸长的拮抗作用相比于低 Cu 有所降低,但二者的联合作用仍小于单一污染。此外,同环丙沙星与 Cu 复合污染对玉米根伸长影响存在的最大的不同之处是在低环丙沙星浓度胁迫下,随着 Cu 浓度的增加,其对小白菜根伸长抑制率之间的差异不大。当



土壤中环丙沙星的浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, Cu 的浓度为 $0, 100, 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 小白菜根伸长抑制率分别为 13.82% 、 13.29% 、 12.10% , 抑制率差异最高为 1.72% 。而当土壤中环丙沙星的浓度为 $2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 3 个不同 Cu 处理浓度下小白菜根伸长抑制率分别为 63.63% 、 35.12% 、 50.82% , 差异最高达到 28.51% 。

另外, 由图 3 可知, 环丙沙星与 Cu 复合污染对小白菜芽伸长的影响与萝卜相一致。在低环丙沙星浓度胁迫下, 随着 Cu 加入量增大, 其对小白菜芽伸长抑制率也相应地增大, 且差异较大。而在高环丙沙星浓度下, 随着 Cu 加入量增大, 其对小白菜芽伸长的抑制率虽然也表现出增大的趋势, 但抑制率之间的差异却逐渐减小。

由表 3 可知, 当 Cu 的浓度为 $0, 100, 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 小白菜根伸长 $ID_{50(\text{环})}$ 值分别为 $1.75, 4.15, 2.46 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 小白菜芽伸长 $ID_{50(\text{环})}$ 值分别是 $1.86, 1.69, 1.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。相比于 Cu 浓度为 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时的小白菜根伸长 $ID_{50(\text{环})}$ 值, 浓度为 $100, 400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时的小白菜根伸长 $ID_{50(\text{环})}$ 值呈现增大趋势, 这说明 Cu 的加入, 降低了环丙沙星对小白菜根伸长的毒性效应, 二者对小白菜根伸长起拮抗作用。随着 Cu 浓度增加, 小白菜芽伸长 $ID_{50(\text{环})}$ 值逐渐减小, 这说明环丙沙星与 Cu 对小白菜芽伸长起协同作用。

3 讨论

Liu 等^[11]研究了农药氯氰菊酯(CPM)与 Cu 复合污染对白菜种子发芽的影响, 其结果表明, 土壤中 CPM-Cu 复合污染对白菜根伸长的影响要小于单一 Cu 的作用。本实验中, 环丙沙星和 Cu 复合污染对小白菜根伸长的抑制作用整体上要小于环丙沙星单一作用, 而对小白菜的芽伸长和萝卜的根(芽)伸长抑制作用整体上却强于环丙沙星单一作用。这可能与污染

物和作物之间的作用机制有关。Cheng 等^[12]研究了水溶液中染料活性红 X-3B 与 Cd 的复合污染对小麦的生态毒性效应, 其研究结果显示, 当 Cd 浓度较低 ($\leq 10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) 时, 其联合毒性较强, 对小麦根伸长抑制作用强, 但随着 Cd 浓度升高, 二者的联合毒性减弱, 当活性红 X-3B 与 Cd 的浓度都较高时, 对小麦根伸长产生拮抗作用。

目前关于复合污染的作用机理主要有竞争结合位点、影响生物酶的活性、干扰生物正常的生理过程、改变生物细胞结构和功能、螯合(或络合)和沉淀作用以及干扰生物大分子的结构和功能等几种学说^[13-14]。本实验中, 在低 Cu ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 作用下, 环丙沙星与 Cu 联合作用对玉米根伸长和芽伸长的毒害较单一环丙沙星作用弱, 二者联合作用体现为拮抗作用。这可能与药物之间的交互作用有关。一方面, 有机污染物与重金属的复合污染可能会降低重金属的活性^[15-17], 在环丙沙星的胁迫下, 土壤因吸附/解吸环丙沙星, 一些表面特性发生改变, 比如有机质含量等, 从而使土壤可能吸附更多的 Cu 而降低了其生物有效性, 减少了作物根对环丙沙星和 Cu 的吸收, 降低了二者复合污染对作物的毒害作用。另一方面, 喹诺酮类药物可与 Cu^{2+} 生成盐沉淀, 从而降低了 Cu 与环丙沙星的生物有效性。

在高 Cu ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 胁迫下, 当添加的环丙沙星浓度较高 ($> 3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 时, 环丙沙星与 Cu 复合污染对萝卜根伸长抑制率低于单一环丙沙星作用。另外, 在高 Cu 的作用下, 由于两种药物间的交互作用增强, 不同环丙沙星浓度对萝卜的根伸长抑制率之间的差异较小, 说明其联合毒性主要依靠 Cu 的作用而不是环丙沙星的作用。总之, 有机化学物质与重金属间的联合作用机制很复杂, 其毒性一般由药物的交互作用和物质间的浓度组合以及污染物本身的化学性质来决定, 在一定条件下, 污染物暴露的浓度组合关系甚至起决定作用^[18]。

4 结论

(1) 在环丙沙星与 Cu 复合污染下, 土壤中环丙沙星浓度与 3 种作物(玉米、萝卜和小白菜)的根伸长和芽伸长抑制率具有相关性 ($P < 0.05$)。

(2) 环丙沙星与 Cu 复合污染对 3 种作物生长的影响较复杂。低 Cu 浓度 ($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 下, 二者对玉米根伸长和芽伸长的联合作用表现为拮抗作用, 在高浓度 Cu ($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 胁迫下, 二者对玉米的联合作用毒性增强, 对玉米的根伸长和芽伸长起一定协同作用。

表 3 环丙沙星与 Cu 复合污染对小白菜生长抑制的

回归方程和 $ID_{50(\text{环})}$

Table 3 Regression equation of CPFX-Cu on inhibitory rate of root elongation and shoot elongation of Chinese cabbage

Cu/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	回归方程	R^2	P	$ID_{50(\text{环})}/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
0	$RI=15.542X+22.719$	0.878 1	<0.05	1.75
	$SI=16.831X+18.686$	0.889 1	<0.05	1.86
100	$RI=8.2942X+15.533$	0.903 1	<0.01	4.15
	$SI=16.737X+21.756$	0.886 4	<0.05	1.69
400	$RI=12.915X+18.275$	0.942 3	<0.01	2.46
	$SI=16.066X+28.413$	0.820 9	<0.05	1.10

(3)相对于环丙沙星与 Cu 复合污染对萝卜芽伸长的协同作用来说,环丙沙星与 Cu 复合污染对萝卜根伸长的影响要复杂得多,低浓度 Cu($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),二者对萝卜根伸长联合作用表现为协同作用。但在高浓度 Cu($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)胁迫下,随着土壤中环丙沙星浓度的增加,二者的联合毒性逐渐降低,当对根伸长抑制率达到 70%时,二者联合作用反而小于单一环丙沙星作用,表现出一定拮抗作用。

(4)对于小白菜来说,无论是在低浓度 Cu($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)还是高浓度 Cu($400 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)胁迫下,环丙沙星与其联合作用对小白菜的根伸长起拮抗作用,而对小白菜芽伸长均表现为协同作用。

参考文献:

- [1] Migliore L, Civitareale C, Cozzolino S, et al. Phytotoxicity to and uptake of enrofloxacin in crop plants[J]. *Chemosphere*, 2003, 52:1233–1244.
- [2] 林仁漳, 杜文超, 王晓蓉, 等. 土壤外源 Cd 胁迫对小麦幼苗生长自由基代谢及抗氧化酶活性的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(1):23–29.
LIN Ren-zhang, DU Wen-chao, WANG Xiao-rong, et al. Free radical metabolism and response of antioxidant enzymes in wheat seedlings (*Triticum aestivum* L.) exposed to soil cadmium [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(1):23–29.
- [3] Adams M L, Zhao F J, McGrath S P, et al. Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties[J]. *Environ Qual*, 2004, 33:532–541.
- [4] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, 35(3):365–370.
CUI De-jie, ZHANG Yu-long. Current situation of soil contamination by heavy metals and research advances on the remediation techniques [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(3):365–370.
- [5] 孙波, 周生略, 赵其国. 基于空间变异分析的土壤重金属复合污染研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(2):248–251.
SUN Bo, ZHOU Sheng-lu, ZHAO Qi-guo. Combined pollution of heavy metal in soil based on spatial variation analysis[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(2):248–251.
- [6] 徐应明, 李军幸, 等. 新型功能膜材料对污染土壤铅汞镉钝化作用研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1):86–89.
XU Ying-ming, LI Jun-xing, et al. Inactivation of Pb, Hg and Cd in-situ in contaminated soil by a functionalized monolayer material [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(1):86–89.
- [7] International Organization for Standardization(ISO). Soil quality–Determination of the effects of pollutants on soil flora[S]. Part 1: Method for the measurement of inhibition of root growth. China ISO, Beijing, 1993, 11269–1.
- [8] International Organization for Standardization(ISO). Soil quality–Determination of the effects of pollutants on soil flora[S]. Part 2: Effects of chemicals on the emergence and growth of higher crops. China ISO, Beijing, 1993, 11269–2.
- [9] Greene J C, Bartels G L, Warren-Hicks W J. Protocols for short-term toxicity screening of hazardous waste sites[S]. US Environmental Protection Agency. 1998, EPA/ 600/ 3–88/ 029.
- [10] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 等. 土壤重金属对白菜种子发芽与根伸长的生态毒性效应[J]. 环境科学, 2002, 23(1):103–107.
SONG Yu-fang, XU Hua-xia, REN Li-ping, et al. Eco-toxicological effects of heavy metals on the inhibition of seed germination and root elongation of Chinese Cabbages in soils [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2002, 23(1):103–107.
- [11] Liu T F, Wang T, Sun C, et al. Single and joint toxicity of cypermethrin and copper on Chinese cabbage (Pakchoi) seeds [J]. *J Hazard Mater*, 2009, 163: 344–348.
- [12] Cheng Y, Zhou Q X. Ecological toxicity of reactive X–3B red dye and cadmium acting on wheat (*Triticum aestivum*) [J]. *J Environ Sci*, 2002, 14:136–140.
- [13] Stewart A R, Malley D F. Effect of metal mixture(Cu, Zn, Pb and Ni) on cadmium partitioning in littoral sediments and its accumulation by the freshwater macrophyte *Eriocaulon septangulare* [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 1999, 18(3):436–447.
- [14] Inaba S, Takenaka C. Effects of dissolved organic matter on toxicity and bioavailability of copper for lettuce sprouts[J]. *Environ Int*, 2005, 31:603–608.
- [15] Chao L, Zhou Q X, Chen Su, et al. Single and joint stress of acetochlor and Pb on three agricultural crops in Northeast China[J]. *J Environ Sci*, 2007, 19:719–724.
- [16] Wang M E, Zhou Q X. Single and joint toxicity of chlorimuron-ethyl, cadmium, and copper acting on wheat *Triticum aestivum* [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2005, 60:169–175.
- [17] Ensenbach U, Nagel R. Toxicity of binary chemical mixtures: Effects on reproduction of zebrafish (*Brachydanio rerio*) [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 1997, 32(2):204–210.
- [18] Chauhan L K S, Gupta S K. Combined cytogenetic and ultrastructural effects of substituted urea herbicides and synthetic pyrethroid insecticide on the root meristem cells of *Allium cepa*, Pestic[J]. *Biochem. Physiol*, 2005, 82:27–35.