

兽药污染土壤对小麦和白菜根伸长抑制的毒性效应

金彩霞, 刘军军, 陈秋颖, 周庆祥

(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: 含有残留兽药的粪便作为有机肥施入农田, 可造成农业土壤污染, 对人类健康和生态系统产生潜在危害。为评价兽药污染的潜在生态影响, 本试验采用室内生长箱培养的方法, 测定了黄潮土在 2 种常用兽药土霉素、伊维菌素污染条件下, 对 2 种作物(小麦和白菜)根伸长、芽伸长的抑制率, 以及复合污染毒性效应。结果表明, 土壤中土霉素、伊维菌素浓度与作物根伸长及芽伸长抑制率呈显著线性相关($P < 0.01$)。2 种兽药对植物根、芽伸长抑制强度为: 伊维菌素 \gg 土霉素; 在药物的胁迫下, 作物的根伸长较芽伸长敏感, 2 种作物的敏感性为: 小麦 $>$ 白菜, 小麦为兽药污染的敏感植物。土霉素和伊维菌素的复合污染产生明显的协同作用。

关键词: 土壤污染; 兽药; 根伸长; 芽伸长; 抑制率; 复合污染

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2009)07-1358-05

Toxicological Effects of Veterinary Drugs in Soil on the Inhibition of Root Elongation of Wheat and Chinese Cabbages

JIN Cai-xia, LIU Jun-jun, CHEN Qiu-ying, ZHOU Qing-xiang

(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: The animal excrements containing veterinary drugs manured into field soils would result in agricultural soil pollution, and which drew an important potential threat on the human health and ecosystem. To evaluate the potential toxicological effects of veterinary drugs, the inhibition rates of two kinds of veterinary drugs (oxytetracycline, ivermectin) on two crops (wheat and Chinese cabbages) were determined in the yellow moist soil by indoor cultivating, and the toxic effect of combined pollution was investigated. Results indicated that there was a significant linear relationship between the concentration of oxytetracycline and ivermectin and the inhibition rates of crops ($P < 0.01$). The inhibition of those two veterinary drugs on plant elongation was ivermectin \gg oxytetracycline. Under the stress of the drugs, root elongation of crops was more sensitive than shoot elongation, the sensitivity of wheat was larger than that of Chinese cabbages. According to IC_{50} (half inhibition concentration), for oxytetracycline, the order of sensitivity was wheat root elongation $>$ Chinese cabbages root elongation $>$ wheat shoot elongation $>$ Chinese cabbages shoot elongation; For ivermectin, the order was wheat root elongation $>$ wheat shoot elongation $>$ Chinese cabbages root elongation $>$ Chinese cabbages shoot elongation. The results indicated that root elongation of the wheat was the most sensitive under the stress of the veterinary drugs. When oxytetracycline and ivermectin were combined, a markedly synergistic effect was observed.

Keywords: soil pollution; veterinary drugs; root elongation; shoot elongation; inhibition rate; combined pollution

随着集约化、规模化畜禽养殖业的快速发展, 禽养禽疾病也越来越复杂, 在这种情况下, 使用兽药的数量和种类也呈现出逐年增加的趋势。在美国, 1996 年使用在动物健康上的药物总花销为 33 亿美元, 每

年抗生素类兽药的使用量为 11 000 t^[1], 欧共体每年抗生素的消耗量达 5 000 t^[2]。然而研究表明, 抗生素类药物一般有 60%~90% 随动物粪便排出体外, 含有大量兽药的养殖场粪尿作为有机肥施入农田后可造成农业土壤污染^[3-6], 并且这些兽药很可能在土壤中积累, 进而影响其中的植物、动物和微生物的正常生命活动, 最终将影响人类的生命健康。因而, 近年来, 兽药对生态环境的影响成为研究热点^[7-8]。利用高等植物的生长状况监测土壤污染, 是从生态学角度诊断土壤质量的重要方法之一^[9-12]。目前已建立的高等植物毒理

收稿日期: 2008-10-28

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(20877022); 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资助

作者简介: 金彩霞(1976—), 女, 黑龙江哈尔滨人, 博士, 副教授, 主要从事土壤污染生态学方面的研究。
E-mail: heartjin0509@yahoo.com.cn

试验方法主要有根伸长试验、种子发芽试验和植物幼苗早期生长试验^[13-15]。有关兽药对植物的毒性响应已受到研究者的关注^[16-17]。但兽药对农作物的生态毒性效应报道很少,有必要加强相关方面的研究。

土霉素和伊维菌素是目前使用较为广泛的两种兽药抗生素。其中土霉素属于广谱抑菌剂,是我国生产及使用最多的抗生素之一。土霉素在动物体内消除较慢,代谢生成物少,主要以原药形式排出体外,且在土壤中吸附能力强并持久存在,随粪肥施用至土壤后,在其中可积累成为持久性较强的土壤污染物^[18-20]。伊维菌素是阿维菌素的衍生物,属于半合成大环内酯农用抗生素类杀虫剂,在农牧业上应用比较广泛,一般来说,伊维菌素在动物体内吸收率较低,在动物喂食药物 5~6 d 内随粪便排泄到环境中的药物竟达到 90%以上,Halley 等研究发现在室温避光条件下,混有粪便和土壤中的伊维菌素降解半衰期为 93~240 d^[21]。张树清等对我国 7 省、市、自治区的典型规模化养殖场畜禽粪便的主要成分分析结果表明,猪粪中土霉素含量可高达 134.75 mg·kg⁻¹^[22]。据 Herd 报道,干燥的动物粪便中伊维菌素含量高达 18.5 mg·kg⁻¹^[23]。因此,在生态环境中这 2 种兽药残留相对来说比较严重,对土壤生态系统会造成一定的危害,尤其是在大量使用厩肥的地区。

黄潮土广泛分布于黄淮海平原、长江中下游平原、辽河下游平原以及汾渭河谷平原,本文选其作为供试土壤,研究了土霉素、伊维菌素单一及复合污染情况下,对小麦和白菜根、芽伸长抑制率的影响。通过作物根伸长、芽伸长受抑制程度,确定 2 种兽药对这 2 种比较典型的作物生态毒性的敏感性。本试验旨在通过了解兽药对作物的生态毒性效应,从而为评价兽药污染的潜在生态影响提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土霉素、伊维菌素注射液

土霉素注射液(Oxytetracycline Injection),主要成分:土霉素,浓度为 200 mg·mL⁻¹;伊维菌素注射液(Ivermectin Injection),主要成分:伊维菌素,浓度为 10 mg·mL⁻¹。2 种药物均购自江西创导动物保健品有限公司。

1.1.2 供试土壤和种子

供试土壤采自河南师范大学校内生物试验田 0~20 cm 表土,其理化性质见表 1。小麦(*Triticum aestivum* L) 泛麦 5 号,发芽率为 98%;白菜(*Brassica*

表 1 供试土壤理化性质

Table 1 The physical-chemical properties of test soil

干容重/ g·cm ⁻³	pH	有机质/ %	CEC ¹⁾ / cmol·kg ⁻¹	T-P ²⁾ / mg·kg ⁻¹	T-K ³⁾ / mg·kg ⁻¹	K-N ⁴⁾ / mg·kg ⁻¹
1.41	8.31	2.01	12.26	0.04	0.18	0.09

注:1)为阳离子交换量 2)为总磷 3)为总钾 4)为凯氏氮。

pekimensis)甜嫩黄金,发芽率为 98%,均购自新乡市种子公司。

1.1.3 主要仪器设备

恒温培养箱 硬质玻璃培养皿 定性滤纸 移液器。

1.2 方法

1.2.1 预备试验

参照龚平等人的试验方法^[24]称取 50 g 风干土壤于 90 mm 直径的玻璃培养皿中,将以几何级数配制的土霉素、伊维菌素水溶液均匀地加入培养皿中,用去离子水调节土壤含水量至最大持水量的 60%,并将其置于恒温培养箱中 25 °C 下平衡 48 h 后,用医用镊子将植物种子均匀播种于土壤中(放置种子时,保持种子胚根末端和生长方向呈直线),盖好玻璃培养皿,置于恒温培养箱中 25 °C 暗处培养。当对照种子发芽率>90%,根长度为 20 mm 时,试验结束。确定种子根和芽伸长抑制浓度(Inhibition Concentration, IC),使其抑制率在 10%~50%之间,开始正式试验。

1.2.2 正式试验

根据预备试验结果,在种子发芽和根伸长抑制浓度 IC 达到抑制率 10%~50%范围内,设置 6 个不同处理。每个处理 20 粒种子,3 次重复。在与预备试验相同的温度和水分条件下,进行作物种子发芽与生长培养试验。试验结束时,测定各处理土壤的种子根伸长、芽伸长(根长的测定以胚轴与根之间的过度点开始),计算根长度和芽长度的平均值及标准偏差,并以浓度-抑制率绘制曲线,进行回归分析。

2 结果与讨论

2.1 土霉素对小麦和白菜根伸长、芽伸长的抑制效应

以小麦、白菜 2 种作物根伸长、芽伸长抑制率对土霉素浓度作图,并将所得结果进行回归分析。由图 1 和表 2 可见,2 种作物的根和芽伸长抑制率与土霉素的浓度均呈极显著正相关($P<0.01$)。同一浓度下,土霉素对小麦及白菜根伸长的抑制大于对芽伸长的抑制。当土壤中土霉素浓度为 100 mg·kg⁻¹时,小麦的根和芽伸长抑制率分别为 25.8%和 11.9%,白菜的根和芽伸长抑制率分别为 31.9%和 23.8%。这一结果

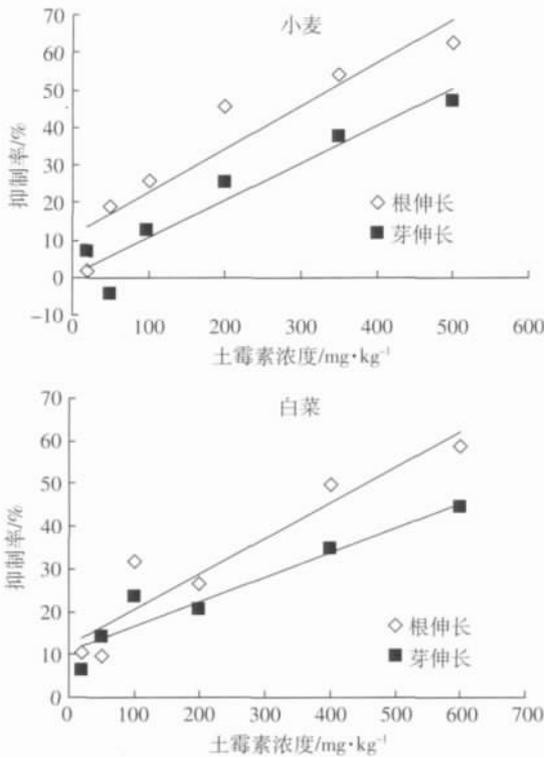


图1 土霉素对2种作物的根伸长、芽伸长抑制率的影响
Figure 1 Inhibition rates of oxytetracycline on root elongation and shoot elongation of two crops

表2 土霉素浓度与2种作物生长抑制的回归方程和IC₅₀
Table 2 Regression equation and IC₅₀ for growth of two crops to oxytetracycline

植物种类	回归方程	R ²	P	IC ₅₀ /mg·kg ⁻¹
小麦根伸长	y=0.114 8x+11.383	0.879 6	<0.01	336.4
小麦芽伸长	y=0.099 1x+0.620 5	0.915 7	<0.01	498.3
白菜根伸长	y=0.083 2x+12.225	0.890 9	<0.01	454.0
白菜芽伸长	y=0.057 7x+10.836	0.905 2	<0.01	678.8

可能与种子发芽和根伸长的生长过程有关,种子发芽伸长过程除了受外界环境影响外,还可从胚内获取养分。因此,植物种子在低浓度污染物的胁迫下,其芽伸长表现为不受抑制或部分抑制,只有土壤受到严重污染,种子发芽才能完全被抑制,而根从一开始就完全暴露于土壤中,其伸长发育全过程受土壤条件的影响较大,因此相对来说,根对土壤兽药污染的反应更直接、更敏感。这一结果与重金属对植物的毒性响应相似^[25-26]。

由图1可见,2种作物对不同浓度土霉素表现出的敏感程度不同。土壤中土霉素浓度较低(≤100 mg·kg⁻¹)时,白菜较小麦敏感。例如,当土霉素浓度为20 mg·kg⁻¹时,对小麦的根和芽伸长抑制率分别为2.0%和7.1%,对白菜根和芽伸长抑制率为10.3%和6.3%;

而当土壤中土霉素浓度较高(>100 mg·kg⁻¹)时,小麦对其表现出的胁迫效应则比白菜大得多,例如,当土霉素浓度为350 mg·kg⁻¹时,对小麦的根和芽伸长抑制率分别为53.8%和37.7%,而当土霉素浓度为400 mg·kg⁻¹对白菜根长和芽长抑制率分别为49.9%和34.9%。由表2,当2种作物根、芽伸长抑制率达到50%时的浓度,即IC₅₀来看,小麦比白菜低得多。

2.2 伊维菌素对小麦和白菜根伸长、芽伸长的抑制效应

由图2及表3可见,2种作物根、芽伸长抑制率与伊维菌素浓度显著相关(P<0.01)。植物受害的毒性阈值(抑制率>10%)的浓度,小麦明显低于白菜。当小麦和白菜根伸长抑制率分别为16.1%和16.2%时,相对应的土壤中伊维菌素浓度分别为3 mg·kg⁻¹和5 mg·kg⁻¹。根伸长抑制率为50%时土壤中伊维菌素的浓度,小麦也低于白菜(IC₅₀小麦=15.9 mg·kg⁻¹, IC₅₀白菜=24.9 mg·kg⁻¹)。由剂量-效应关系曲线可见,小麦较白菜敏感得多。该结果与宋玉芳等的研究结果一致^[27]。她们在进行菲、芘、1,2,4-三氯苯对植物根伸长抑制的生态毒性效应试验中发现,小麦对有机污染物胁迫表现得最为敏感。

由图2可见,同一浓度下,2种作物的根较芽敏感,这与土霉素的毒性效应相同,但随着伊维菌素浓

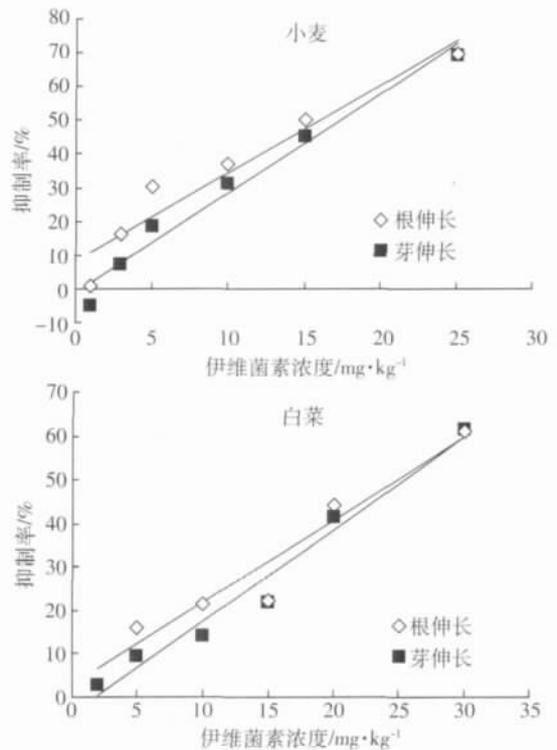


图2 伊维菌素对2种作物的根伸长、芽伸长抑制率的影响
Figure 2 Inhibition rates of ivermectin on root elongation and shoot elongation of two crops

表 3 伊维菌素浓度与 2 种作物生长抑制的回归方程和 IC_{50}
Table 3 Regression equation and IC_{50} for growth of two crops to ivermectin

作物种类	回归方程	R^2	P	$IC_{50}/mg \cdot kg^{-1}$
小麦根伸长	$y=2.614 4x+8.321 9$	0.929 3	<0.01	15.9
小麦芽伸长	$y=2.952 3x+1.262 6$	0.974 2	<0.01	17.4
白菜根伸长	$y=1.897 4x+2.794$	0.925 6	<0.01	24.9
白菜芽伸长	$y=2.125 4x-3.886 3$	0.970 2	<0.01	25.4

度的增大,根、芽伸长抑制率的差异逐渐减小。当伊维菌素浓度达到 $25 mg \cdot kg^{-1}$ 时,对小麦的根、芽伸长抑制率分别为 69.7% 和 69.3%,二者基本相等,对白菜亦有相似结果。这可能是由于伊维菌素浓度较高时,土壤污染程度严重,土壤的渗透压增加,致使部分伊维菌素渗透到种皮内部,这种情况下种皮对芽的保护作用丧失,从而较大程度地抑制了芽的伸长。

2.3 土霉素和伊维菌素的生态毒性效应比较

由图 3 土霉素和伊维菌素对 2 种作物根和芽伸长的 IC_{50} 值可知,小麦根伸长抑制率为 50% 时,伊维菌素浓度为 $15.9 mg \cdot kg^{-1}$,而土霉素则为 $336.4 mg \cdot kg^{-1}$,土霉素浓度为伊维菌素的 21 倍,因此,伊维菌素对作物的毒性远远大于土霉素。本试验研究结果表明,在一定药物作用下,抑制率与药物在水中的溶解度二者之间不存在相关关系。这与宋玉芳等人的研究结果不一致,她们通过研究 3 种有机物对植物的毒害作用得出,植物的根伸长抑制率与污染物在水中的溶解度显著相关,即溶解度越大,对植物的毒害效应越强^[27]。在本试验中,土霉素易溶于水,易被植物种子吸收^[28],而伊维菌素难溶于水(溶解度为 $0.01 mg \cdot mL^{-1}$),但土霉素对小麦和白菜根伸长和芽伸长表现出的抑制作用却远远小于伊维菌素,这可能与药物本身在作物种子内的作用机制、药物毒性、药物吸收机制以及作物对此种药物敏感性大小有关,但其具体的作用机制仍不是很明确,需要作进一步试验加以验证和研究。

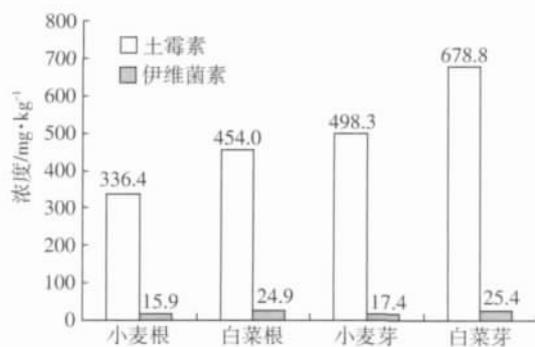


图 3 2 种药物对作物的 IC_{50} 值比较

Figure 3 IC_{50} of the two drugs on root elongation and shoot elongation of crops

由图 3 根据药物对作物的 IC_{50} 值可知,对土霉素其敏感顺序为:小麦根>白菜根>小麦芽>白菜芽,对伊维菌素其敏感顺序为:小麦根>小麦芽>白菜根>白菜芽。因此,小麦根伸长受兽药胁迫最敏感,白菜芽伸长最不敏感。

2.4 土霉素、伊维菌素复合污染对 2 种植物的生态毒性效应

以土霉素、伊维菌素单一污染对小麦和白菜根伸长抑制率为 25% 时的浓度为复合污染最高浓度,进行土霉素、伊维菌素复合污染对植物根伸长、芽伸长抑制毒理效应的研究。

由表 4 可见,当小麦根伸长抑制率为 25.1% 时,土霉素、伊维菌素的浓度 (40 和 $2 mg \cdot kg^{-1}$) 比单一污染达到相同抑制率的浓度 (100 和 $5 mg \cdot kg^{-1}$) 降低了约 2.5 倍。以白菜进行复合效应试验,其结果与此基本相同(表 5)。例如,当白菜根伸长抑制率为 22.6% 时,伊维菌素单一污染浓度为 $10 mg \cdot kg^{-1}$,而复合污染时仅为 $4 mg \cdot kg^{-1}$ 。这说明在 2 种兽药的复合污染胁迫下,对小麦和白菜根伸长和芽伸长存在明显的协同效应。

3 结论

(1) 以土霉素、伊维菌素 2 种常用兽药对小麦和

表 4 土霉素、伊维菌素复合污染对小麦根伸长和芽伸长抑制率的影响

Table 4 Inhibition rates of combined pollution of oxytetracycline and ivermectin on the root and shoot elongation of wheat

土霉素/ $mg \cdot kg^{-1}$	$R_{\pm}/\%$	$S_{\pm}/\%$	伊维菌素/ $mg \cdot kg^{-1}$	$R_{\mp}/\%$	$S_{\mp}/\%$	土霉素+伊维菌素/ $mg \cdot kg^{-1}$	$R_{\pm,\mp}/\%$	$S_{\pm,\mp}/\%$
20	2.0	7.1	1	0.9	-4.9	20+1	10.7	16.2
40	15.9	4.6	2	13.6	7.2	40+2	25.1	21.6
70	19.4	7.9	4	18.8	13.1	70+4	51.4	41.7
100	25.8	11.9	6	30.4	18.4	100+6	51.6	42.3

注 R_{\pm} 、 S_{\pm} 表示土霉素单一污染对小麦的根伸长、芽伸长抑制率; R_{\mp} 、 S_{\mp} 表示伊维菌素单一污染对小麦的根伸长、芽伸长抑制率; $R_{\pm,\mp}$ 、 $S_{\pm,\mp}$ 表示土霉素和伊维菌素复合污染对小麦的根伸长、芽伸长抑制率。下同。

表 5 土霉素、伊维菌素复合污染对白菜根伸长和芽伸长抑制率的影响

Table 5 Inhibition rates of combined pollution of oxytetracycline and ivermectin on the root and shoot elongation of cabbages

土霉素/ $mg \cdot kg^{-1}$	$R_{\pm}/\%$	$S_{\pm}/\%$	伊维菌素/ $mg \cdot kg^{-1}$	$R_{\mp}/\%$	$S_{\mp}/\%$	土霉素+伊维菌素/ $mg \cdot kg^{-1}$	$R_{\pm,\mp}/\%$	$S_{\pm,\mp}/\%$
20	10.3	6.2	2	6.6	2.7	20+2	13.3	16.2
40	15.6	13.1	4	10.4	4.6	40+4	22.6	18.6
70	18.1	14.9	8	18.0	13.1	70+8	30.7	29.9
100	31.9	23.8	10	21.6	13.9	100+10	47.0	46.0

白菜生态毒性效应的研究结果显示,作物根和芽伸长抑制率与2种兽药浓度呈显著剂量-效应关系;伊维菌素对作物的抑制程度远远大于土霉素。

(2)不同作物对兽药污染的毒性响应有差异,同一作物根伸长较芽伸长更为敏感。小麦根伸长对污染物响应最敏感。

(3)土霉素、伊维菌素复合污染将产生明显协同效应,使兽药对作物的毒性作用显著增强。

参考文献:

- [1] Animal Health Institute. Market research report [R]. Alexandria VA :U. S. Animal Health Product Industry, 1997 :59.
- [2] Hirsch R, Terles T, Haberer K. Occurrence of antibiotics in the aquatic environment[J]. *Sci Total Environ*, 1999, 36 :3573-3593.
- [3] Halling-Sørensen B, Nors Nielsen S, Lanzky P F, et al. Occurrence, fate and effects of pharmaceutical substances in the environment—a review[J]. *Chemosphere*, 1998, 36(2) :357-393.
- [4] Spaepen K R I, Van Leemput L J J, Wislocki P G, et al. A uniform procedure to estimate the predicted environmental concentration of the residues of veterinary medicines in soil[J]. *Environ Toxicol Chem*, 1997, 16 :1977-1982.
- [5] Montforts M H M M, Kalf D F, Van Vlaardingen P L A, et al. The exposure assessment for veterinary medicinal products[J]. *Sci Total Environ*, 1999, 225 :119-133.
- [6] Meyer M T, Bumgarner J E, Varns J L, et al. Use of radioimmunoassay as a screen for antibiotics in confined animal feeding operations and confirmation by liquid chromatography/mass spectrometry[J]. *Sci Total Environ*, 2000, 248(2-3) :181-187.
- [7] Boxall A B A, Kolpin D W, Halling-Sørensen B, et al. Are veterinary medicines causing environmental risks?[J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37 :286A-294A.
- [8] Thiele S. Pharmaceutical antibiotic compound in soils—a review[J]. *J Plant Nutr Soil Sci*, 2003, 166 :145-167.
- [9] 张建新, 纳明亮, 徐明岗. 土壤 Cu Zn Pb 污染对蔬菜根伸长的抑制及毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3) :945-949.
ZHANG Jian-xin, NA Ming-liang, XU Ming-gang. Inhibition and toxicity of Cu, Zn, Pb on root elongation of vegetable in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3) :945-949.
- [10] 宋玉芳, 许华夏, 任丽萍, 等. 重金属对土壤中萝卜种子发芽与根伸长抑制的生态毒性[J]. 生态学杂志, 2001, 4(2) :4-8.
SONG Yu-fang, XU Hua-xia, Ren Li-ping, et al. Eco-toxicology of heavy metal on the inhibition of seed germination and root elongation of turnip in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, 4(2) :4-8.
- [11] Ince N H, Assessment of toxic interactions of heavy metals in binary mixtures—a statistical approach[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1999, 36(4) :365-372.
- [12] Knoke K, Marwood T M, Cassidy M B, et al. A comparison of five bioassays to monitor toxicity during bioremediation of pentachlorophenol-contaminated soil [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1999, 110 :157-169.
- [13] International Organization for Standardization(ISO). Soil quality—determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 1 method for the measurement of inhibition of root growth. ISO, 1993 :11269-1.
- [14] International Organization for Standardization(ISO). Soil quality—determination of the effects of pollutants on soil flora. Part 2 effects of chemicals on the emergence and growth of higher crops. ISO, 1993 :11269-2.
- [15] Greene J C. Protocols for short-term toxicity screening of hazardous waste sites[S]. US Environmental Protection Agency, 1998, EPA/ 600/ 3—88/ 029.
- [16] Boxall A B A, Johnson P, Smith E J, et al. Uptake of veterinary medicines from soils into crops[J]. *J Agric Food Chem*, 2006, 54(6) :2288-2297.
- [17] Migliore L, Civitareale C, Cozzolino S, et al. Phytotoxicity to and uptake of enrofloxacin in crop crops[J]. *Chemosphere*, 2003, 52 :1233-1244.
- [18] The European Agency for the Evaluation of Medicinal Products. Committee for veterinary medicinal products oxytetracycline, tetracycline, chlorte tracycline surmnary report(3)[R].
- [19] 匡光伟, 孙志良, 陈小军, 等. 四环素类抗菌药物在鸡粪中的降解研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(5) :1784-1788.
KUANG Guang-wei, SUN Zhi-liang, CHEN Xiao-jun, et al. Degradation of tetracyclines in chicken feces[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(5) :1784-1788.
- [20] Rabølle M, Spliid N H. Sorption and mobility of metronidazole, olaquinoxid, oxytetracycline and tylosin in soil[J]. *Chemosphere*, 2000, 40(7) :715-722.
- [21] Halley B A, et al. The environmental impact of the use of ivermectin : environmental effects and fate[J]. *Chemosphere*, 1989, 18(7-8) :1543-1563.
- [22] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 规模化养殖畜禽粪主要有毒成分测定分析研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6) :822-829.
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Determination and analysis on main harmful composition in excrement of scale livestock and poultry feedlots[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(6) :822-829.
- [23] Herd R. Points in question ecotoxicity of the avermectins—a reply to Forbes[J]. *J Parasitol*, 1996, 26(5) :571-572.
- [24] Gong P, et al. Evaluation and refinement of a continuous seed germination and early seedling growth test for the use in the eco-toxicological assessment of soils[J]. *Chemosphere*, 2001, 44 :491-500.
- [25] 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抑制的生态毒性效应[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]. *Environment Science*, 2002, 23(1) :103-107.
- [26] Kjaer C, Pedersen N, Elmgaard N. Effects of soil copper on black bindweed (*Fallopia convovulus*) in the laboratory and in the field[J]. *Arch Environ Contam Toxicol*, 1998, 35 :14-19.
- [27] 宋玉芳, 周启星, 许华夏, 等. 菲、芘、1, 2, 4-三氯苯对土壤高等植物根伸长抑制的生态毒性效应[J]. 生态学报, 2002, 22(11) :1945-1950.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, XU Hua-xia, et al. Eco-toxicological effects of phenanthrene, pyrene and 1, 2, 4-trichlorobenzene in soils on the inhibition of root elongation of higher plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(11) :1945-1950.
- [28] Kong W D, Zhu Y G, Fu B J, et al. The veterinary antibiotic oxytetracycline and Cu influence functional diversity of the soil microbial community[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143 :129-137.