

土壤中的抗生素污染及其生态毒性研究进展

王 敏,唐景春

(南开大学环境科学与工程学院/环境污染过程与基准教育部重点实验室,天津 300071)

摘 要:越来越多的抗生素被广泛应用于畜牧业和水产养殖业,这些抗生素大部分不能完全被机体吸收,而是以原形或代谢物形式经由粪便排出体外,经不同途径最终进入土壤环境,在土壤中累积造成污染。抗生素污染已成为一种新型土壤污染。为确切评估抗生素在土壤环境中的危害,对该物质在土壤中的污染状况、行为归趋和生态毒性进行了综述,旨在为土壤污染防治和修复提供依据。

关键词:抗生素;污染;土壤环境;生态毒性

中图分类号:X53 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2010)增刊-0261-06

Research of Antibiotics Pollution in Soil Environments and Its Ecological Toxicity

WANG Min, TANG Jing - chun

(College of Environmental Science and Engineering, Nankai University; Key Laboratory of Pollution Processes and Environmental Criteria, Ministry of Education, Tianjin 300071, China)

Abstract: An increasing number of antibiotics were used as food additives and veterinary medicines in stockbreeding and fishery. Most of these antibiotics could not be absorbed by animals and were discharged through dejecta in the original shape or metabolized forms. At last these antibiotics entered into soil environments in different routes and accumulated in soil. Antibiotics have become the emerging contaminants of soil. To evaluate the potential impacts of antibiotics released into soil environments, this paper reviewed the pollution levels, fate and ecological toxicity of antibiotics in soils to provide basis for prevention and remediation of antibiotics polluted soils.

Keywords: antibiotics; pollution; soil environments; ecological toxicity

近年来,土壤中新型污染物日渐受到关注。这些污染物主要有各种兽药和抗生素、个人护理用品污染物、溴化阻燃剂、全氟有机化合物、人造纳米材料等^[1]。新型污染物具有很高的稳定性,在环境中往往难以降解并易于在生态系统中富集,因而对生态系统中包括人类在内的各类生物均具有潜在的危害^[2]。土壤新型污染中比较重要的一种是抗生素污染。抗生素是世界上用量最大、使用最广泛的药物之一,全球抗生素年均使用总量为 100 000 ~ 200 000 t,我国每年有成千上万吨的抗生素类药物被用于畜禽养殖

业和人的医疗中。大部分抗生素不能完全被机体吸收,有高达 85% 以上抗生素以原形或代谢物形式经由病人和畜禽粪尿排入环境,经不同途径对土壤和水体造成污染。土壤是抗生素重要的归属场所,虽然抗生素在环境中存在浓度极低,但其对环境的影响不容忽视。抗生素及其代谢产物在土壤环境中能维持很长时间的活性,对土壤中的微生物、植物、动物均产生不同程度的影响。为评估抗生素在土壤环境中的危害,并为土壤抗生素污染防治和修复提供依据,本文对该物质在土壤中的污染状况、行为归趋和生态毒性进行了综述。

1 土壤中抗生素污染状况

抗生素是一种以低微浓度即能抑制或影响它种生物机能的化学物质,在人类保健及动植物病虫害防治方面发挥了巨大的作用。但是,随着其大量生产及

收稿日期:2009-09-09

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)重点项目(2007AA061201);天津市应用基础及前沿技术研究计划(09JCYBJC08800);中国科学院知识创新工程项目(kzcx1-yw-06-03)

作者简介:王 敏(1987—),女,山东临沂人,硕士生,研究方向为污染环境生态修复。E-mail: wangmin51605160@163.com

通讯作者:唐景春 E-mail: tangjch@nankai.edu.cn

应用,污染问题也变得越来越严重。抗生素污染已成为目前国际上的研究热点之一,但在我国还没有引起足够重视,相关研究开展得还不够。

近年来,抗生素用量呈现逐年递增趋势,在美国作为促生长用的抗生素的使用量在近40年内增加了80倍,其他国家促生长用抗生素用量也在增加^[3]。大量抗生素的使用造成了土壤中严重的抗生素类污染问题。近年来的资料表明,抗生素在我国许多地区的污染相当严重。

抗生素大量存在于在畜禽粪便和施用粪肥的土壤中。王冉等^[4]的研究结果表明,肉鸡经饲料服用金霉素后有较高比例金霉素以原形形式随排泄物排出,且不易被降解,排泄物中高含量金霉素残留存在着较大的环境风险。在德国西北部液体粪肥施用后的土壤中已发现了四环素和磺胺甲噁唑残留,在0~30 cm的土层中土霉素、四环素、氯四环素、磺胺甲噁唑的含量分别达27、443、93、4.5 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。Martinez - Carballo E等^[5]测定了猪粪、鸡粪以及施有粪肥的土壤样品中磺胺类药物、甲氧苄氨嘧啶、四环素、氟喹诺酮类药物等的浓度情况,检测到猪粪中金霉素浓度46 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、土霉素29 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、四环素23 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;在鸡粪中检测到大量磺胺嘧啶;在土壤样品中也检测到金霉素、环丙沙星等抗生素的存在。Campagnolo等^[6]检测到土壤中抗生素类兽药浓度为10 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,在德国土壤中检测到四环素类抗生素的含量为450~900 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[3]。在我国检测到土壤中含有土霉素高达200 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。李彦文等^[7]测定5种磺胺类抗生素在土壤中的检出限为0.24~3.3 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

有关菜地土壤的抗生素污染问题应引起关注。李彦文等^[8]分析了广州、深圳等地菜地土壤中3种四环素类和6种磺胺类抗生素的污染特征。结果表明,四环素类单个化合物检出率为19.35%~96.77%,平均含量为9.6~44.1 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,以四环素为主;磺胺类单个化合物检出率为25.81%~93.50%,平均含量为4.9~51.4 $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,以磺胺甲噁唑、磺胺-5-甲氧嘧啶、磺胺二甲嘧啶为主。菜地土壤中抗生素的含量与国外的相当,但检出率较高。同一蔬菜基地种植不同蔬菜的土壤中抗生素的种类与含量有较大差异。赵娜^[9]分析了珠三角地区养猪场菜地、普通蔬菜基地、无公害蔬菜基地、绿色蔬菜基地4种不同类型的菜地土壤中四环素类、磺胺类抗生素污染特征,检测发现所有土壤样品中均检出一种以上抗生素,不同类型菜地土壤中抗生素的总含量高低顺序为:养猪场菜

地>无公害蔬菜基地>普通蔬菜基地>绿色蔬菜基地。说明菜地大量施加含有抗生素的有机肥后,加重了土壤抗生素污染。土壤中四环素类抗生素的平均含量高于磺胺类,这与四环素类是人畜共用药,磺胺类只用于畜禽养殖有关。有关抗生素在土壤环境中的存在和污染水平的报道仍然较少,还需要进一步进行基础研究。

2 抗生素在土壤中的归趋

土壤是抗生素等污染物质的最终归宿。在土壤中,抗生素将发生一系列的物理、化学和生物反应,其中一部分降解或转化为无害物质;一部分被土壤所吸附,长期存在于土壤环境中,并将在土壤中积累,进而对环境产生长期和深远的影响。

2.1 来源

土壤环境中抗生素来源主要有以下两方面:

(1)农用抗生素。抗生素进入土壤的最主要途径是通过向耕作土壤施入畜禽粪便。大量未经无害化处理或经简单堆肥处理的含有抗生素残留的禽畜粪便作为有机肥施于农田,是土壤环境中抗生素的主要来源之一,由于抗生素在土壤中长期滞留性和应用的广泛性,必将对土壤环境造成更大的潜在威胁。在水产养殖中使用抗生素后,当鱼塘污泥用做土壤调节剂施入农田土壤后也造成抗生素的污染。

(2)医用抗生素。这被认为是土壤中抗生素的另一个主要来源^[10],在某些地区甚至成为土壤中抗生素污染的主要来源。除了农用抗生素和医用抗生素外,抗生素生产过程损失和废弃的抗生素也是土壤中抗生素污染的一个来源。

2.2 吸附

抗生素通过施用动物粪便等方式进入农业土壤后,其去向及其对土壤微生物等的影响与土壤对其的吸附强弱密切相关。吸附是抗生素在土壤环境中迁移和转化的重要过程,其很大程度上取决于抗生素和土壤的特性。影响抗生素在土壤中吸附的主要外因有土壤pH值、土壤矿物质和有机质等^[11-12]。

抗生素种类和土壤性质不同,吸附作用存在很大的差异。土壤对恩诺沙星具有较强的吸附作用,残留在土壤中的低量恩诺沙星主要被吸附在固体颗粒上,不易释放和随水迁移。土壤对泰乐菌素的吸附明显高于对磺胺二甲嘧啶的吸附;土壤对泰乐菌素的吸附主要与粘粒和氧化铁含量有关,而对磺胺二甲嘧啶的吸附主要与土壤有机质和氧化铁含量相关^[13]。土壤

对土霉素的吸附能力明显高于泰乐菌素^[14],土霉素和泰乐菌素在粘质农业土壤剖面中的迁移能力较弱;但泰乐菌素在砂质土壤中较易迁移,有较大的环境风险。黄土对四环素有较强的吸附能力,添加可溶性腐植酸可减少土壤对四环素的吸附量,四环素在黄土表面的吸附以阳离子交换作用为主,离子强度不同对四环素的吸附量也不同,随着离子强度的增大,四环素在土壤上的吸附量减小。土壤酸度对四环素的吸附有非常重要的影响,随着pH的升高黄土对四环素的吸附能力逐渐减弱^[15]。

土壤有机质和阳离子类型影响着抗生素在土壤中的吸附和解吸。鲍艳宇等^[16]研究结果表明,去除有机质能够降低土霉素在土壤中的吸附容量,但增加了吸附强度;土霉素在土壤上的解吸过程存在明显的滞后现象,去除有机质后的褐土和红壤对土霉素的解吸滞后现象显著增强;土霉素在土壤中发生强烈的吸附作用,土壤有机碳含量为0~4%时,土壤质地、阳离子交换量和铁氧化物含量似乎是影响土霉素吸附的最重要因素。因此,这三种土壤特性是土霉素吸附等行为的關鍵影响因素^[17]。鲍艳宇等^[18]还研究了不同阳离子 Ca^{2+} 、 K^{+} 、 Na^{+} 对土霉素在2种土壤(褐土和红壤)中的吸附-解吸影响,结果表明,3种阳离子对土霉素在2种土壤中的吸附行为的影响存在较大的差异,同一土壤中阳离子类型对土霉素的吸附容量无显著影响,而与 K^{+} 和 Na^{+} 相比, Ca^{2+} 的存在显著降低溶液中土霉素在土壤上的吸附强度。

影响抗生素的吸附的因素还有土壤pH值和粘土矿物等。张从良等^[19]研究表明,粘土矿物含量是影响磺胺嘧啶土壤吸附的最重要因子,且温度升高和pH值过高或过低均不利于磺胺嘧啶的吸附。磺胺嘧啶和磺胺噻唑在土壤中的吸附量随溶液pH值的升高而减小,与溶液中磺胺嘧啶和磺胺噻唑阳离子的含量呈正相关,磺胺嘧啶和磺胺噻唑的最大吸附量与土壤有机质的含量和土壤粉粒的含量呈显著正相关。因此,磺胺嘧啶和磺胺噻唑更容易吸附在有机质的含量比较高的泥炭土和黑土中^[20]。

2.3 迁移

抗生素在土壤中的迁移主要取决于其自身的光稳定性、键合、吸附特性、淋洗和降解速率等。一般来讲,弱酸、弱碱性和亲脂性类抗生素与土壤有较好的亲和力,在土壤中不易迁移。土壤淋溶实验发现土霉素和泰乐菌素在土壤中的迁移率较低,泰乐菌素在粘沙壤土中的移动距离为5 cm,在沙壤土中的移动距离可

达25 cm。Kay等^[21]进行了磺胺类、四环素类和大环内酯类兽用药物的土柱淋溶实验,结果表明,磺胺氯哒嗪在4个月的淋溶过程中损失量不超过0.00015%,淋出液中浓度可达 $0.77\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$;而土霉素和泰乐菌素可被完全降解。Aga等^[22]也做了相似的试验,每天喂给每头牛75 mg土霉素,喂养约5个月后,将牛粪便作为氮肥施入土壤,结果表明,粪便施入土壤22 d后0~5 cm土壤中四环素类抗生素及其代谢产物总含量为 $281.34\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,70 d后总含量为 $67.25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,144 d后为 $3.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。因此,动物-粪便-土壤系统中抗生素药物的迁移转化是一个值得关注的环境问题。

2.4 降解

进入土壤中的抗生素会发生一系列的降解作用,主要有水解、光解和生物降解作用。一般认为,抗生素在环境中的降解与其化学特性(如水溶性、pH、挥发性和吸附性)、环境条件(如温度、土壤类型、pH等)和使用剂量有关。Yang J F等^[23]研究了磺胺嘧啶在3种土壤中的吸附、水解行为,结果表明,磺胺嘧啶在厌氧条件的土壤中存在更持久,厌氧条件下土壤微生物对磺胺嘧啶的降解起的作用不大,磺胺嘧啶在好氧贫瘠土壤中也发生降解,磺胺嘧啶的水解受pH影响,只在酸性条件下水解。Schlusener M P等^[24]研究了6种常用抗生素在土壤中的降解,降解半衰期红霉素20 d,竹桃霉素27 d,泰乐菌素8 d,泰妙菌素16 d,盐霉素5 d,罗红霉素的浓度在整个实验期间基本不发生变化。土霉素在施有粪便的土壤中降解半衰期33 d,而在未施粪便的土壤中需要56 d,表明土霉素在土壤环境中具有很强的持久性,不易发生降解^[25]。

不同抗生素的降解作用不同。鸡排泄物中金霉素的降解方式主要是微生物降解和光解,并且与排泄物中金霉素含量有关,金霉素含量越高,降解半衰期越长^[4]。盐霉素在粪便中的降解主要是微生物降解,光降解和化学降解只占很小比例,灭菌组的降解速率明显低于未灭菌组,而光照对盐霉素的降解速率影响不大;盐霉素的降解速率随粪便中盐霉素起始浓度增加而降低,表明粪便中降解微生物对盐霉素的浓度敏感^[26]。磺胺二甲嘧啶在土壤中的降解主要是光降解和化学降解,微生物降解只占很小的比例;土壤含水量的增加明显加快磺胺二甲嘧啶残留的降解速率,因此可以通过提高土壤含水量等方法加速磺胺二甲嘧啶的降解,以降低其对环境土壤的污染风险^[27]。

2.5 植物吸收

土壤中的抗生素极易向植物体内富集,富集率可高达万倍以上^[3]。综合近年来的研究成果,多种作物可吸收抗生素,例如:大麦、玉米、马铃薯、莴苣、豌豆、菜豆、萝卜、胡萝卜、黄瓜等。植物对抗生素的吸收与富集依抗生素、植物和土壤类型不同而有很大差异。氟喹诺酮类、磺胺类和氯四环素等可直接被植物吸收。Kumar等^[28]研究表明,玉米、叶用洋葱和甘蓝等3种农作物能够吸收氯四环素,但不吸收泰乐菌素,且3种作物体内氯四环素的含量随着肥料(畜禽粪便)中氯四环素含量的增加而增加。生菜和胡萝卜均可吸收土壤中的氟苯尼考和甲氧苄啶,但生菜吸收左旋咪唑,而不吸收恩诺沙星,胡萝卜却与之相反。Grote M等^[29]在施有含金霉素、磺胺嘧啶和甲氧苄啶的猪粪的土壤上种植冬小麦发现,金霉素和磺胺嘧啶能被植物根部吸收,并转移至植物的茎叶,金霉素甚至可以进入果实中。研究表明,用小麦、莴苣和胡萝卜等植物可以吸收土壤中的抗生素,为抗生素污染土壤的修复开辟了新的道路。国彬等^[30]通过施用畜禽废物和抗生素污染进行芥菜盆栽试验,盆栽后土壤中抗生素残留量为:喹诺酮类>四环素类>磺胺类。这4种药物在盆栽芥菜中均被检出,其中土霉素检出率最高,而磺胺甲恶唑则未检出,施加猪粪会造成芥菜抗生素污染。

有些研究尝试探讨了植物吸收富集抗生素的机理。紫花苜蓿吸收土霉素的过程为主动吸收,且主要累积在根部,土霉素主要通过影响紫花苜蓿根系生理过程而显著抑制紫花苜蓿的生长^[31]。Boxall等^[32]认为,抗生素的疏水性与胡萝卜对兽药抗生素的吸收无相关性,说明兽药抗生素的植物吸收行为并非依赖于疏水性。植物对抗生素的吸收富集研究还较少,其影响因素和吸收富集机理还有待进一步研究。

3 抗生素的生态毒理效应

在土壤环境中的抗生素残留,尽管其环境浓度较低,但对环境中的微生物抗性、动物和植物产生的生态毒性效应及其在环境中引起的耐药性也是不容忽视的。抗生素对土壤环境中微生物、动物、植物的生长发育均具有明显的抑制作用。抗生素对水生生物的毒性效应的研究已有很多^[33-34],但对于土壤生物的毒性作用研究却不多。

3.1 对土壤植物的毒性

将含有抗生素药物的动物排泄物作为肥料施入

土壤后,将会影响到植物的生长发育。与大多数已研究较清楚的污染物相似,低浓度抗生素可促进植物生长,高浓度则抑制植物生长,但在不同土壤或生长基质上,抗生素对不同植物的影响差异非常大。Kong等^[35]的研究结果表明,当培养液中土霉素浓度高于 $0.002\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,土霉素即对紫花苜蓿生长产生显著的抑制作用,在 $0.002 \sim 0.20\text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度范围内,土霉素对紫花苜蓿茎和根生长的抑制率分别达61%和85%。

抗生素对植物生长发育的影响取决于抗生素的类型、植物种类和土壤性质等因素。Boxall等^[32]研究发现,土培条件下 $1\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 浓度土霉素、保泰松和恩诺沙星显著抑制胡萝卜和莴苣生长,而相同浓度的阿莫西林、磺胺嘧啶、泰乐素、甲氧苄啶和氟苯尼考等对这两种蔬菜生长没有影响。鲍艳宇等^[36]报道四环素、土霉素在土壤中对小麦根伸长的 IC_{50} 值分别为 $12\ 709$ 和 $14\ 818\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。刘吉强等^[37]研究了油菜种植条件下不同浓度的外源青霉素对油菜品质的影响。收获期时,油菜叶片中可溶性糖与蛋白质含量分别下降78%~86.2%和5.2%~34.2%,且可溶性糖与蛋白质含量的降低程度与处理浓度成负相关。金彩霞等^[38]研究了2种常用兽药磺胺嘧啶钠、环丙沙星对小麦、白菜和番茄种子发芽、根伸长、芽伸长的影响,比较分析了小麦、白菜和番茄对2种兽药胁迫的敏感性。结果表明,根长抑制率和芽长抑制率与兽药浓度显著相关,种子发芽抑制率与2种兽药浓度不相关;2种兽药对根伸长和芽伸长的抑制明显强于对种子发芽的抑制;3种作物对磺胺嘧啶钠胁迫的敏感性依次为小麦>白菜>番茄,对环丙沙星胁迫的敏感性依次为白菜>番茄>小麦;磺胺嘧啶钠对3种作物的毒性效应明显高于环丙沙星。

3.2 对土壤动物的毒性

关于土壤动物对抗生素的效应研究较少,目前的研究表明土霉素和泰乐菌素对土壤动物的毒性较低。Baguer A J等^[39]测试了两种抗生素对土壤动物蚯蚓、跳虫和线蚓的效应发现,土霉素和泰乐菌素在环境相应浓度下对蚯蚓等没有显著效应,最低观察效应浓度是 $3\ 000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,大多数情况下即使在最高测试浓度 $5\ 000\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时也未观察到效应。高玉红等^[40]检测了不同剂量的兽药阿苯哒唑对蚯蚓皮肤和肠道超显微结构的影响。结果表明,蚯蚓暴露于不同剂量的阿苯哒唑时,皮肤角质层和表皮细胞的超微结构发生了明显变化, $600\text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时角质层变薄、表皮细

胞分泌物减少;暴露于生长不受影响的 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时皮肤超微结构发生了代偿性变化,角质层增厚以及网状粘液细胞分泌功能增加。蚯蚓暴露于阿苯哒唑时,肠粘膜上皮细胞的超微结构受到损伤,且随着暴露剂量的增加损伤加剧。

3.3 对土壤微生物的毒性

抗生素多为抗微生物药物,能直接杀死土壤环境中某些微生物或抑制其生长,影响环境中微生物群落的组成,进而降低了土壤微生物对其他污染物的固定或降解能力。

抗生素对微生物产生各种毒性效应,影响微生物活性。汤玮婧等^[41]探讨了土霉素对小麦根际土壤微生物数量及活性的影响。结果表明,土壤微生物数目较原始土样有了较大的变化,细菌数目随药物浓度的增大数目整体呈减少趋势,放线菌数目整体呈上升趋势。在不同土霉素浓度的作用下,碱性磷酸酶活性明显降低,对脱氢酶略有影响,对脲酶影响不大,其中碱性土壤中碱性磷酸酶活性比酸性土壤高。Kong 等^[31]将从土壤中提取的微生物群落暴露于含有土霉素的生理盐水溶液后,土壤微生物群落功能多样性随土霉素浓度升高显著降低,且土霉素与铜复合污染对土壤微生物群落功能的影响显著大于单一污染物。恩诺沙星残留对土壤三大类微生物影响强弱顺序为细菌 > 放线菌 > 真菌,其影响作用随浓度的增加而加大,但对真菌作用不明显。相对较低浓度的恩诺沙星残留不影响土壤微生物群落功能多样性,而相对较高浓度的恩诺沙星残留则降低了其微生物群落功能多样性^[42]。

抗生素影响土壤微生物的呼吸等活动。刘锋等^[43]测定了几种抗生素对水稻土土壤微生物呼吸的影响,其中以磺胺甲恶唑和甲氧苄啶对土壤呼吸影响最大;同一种抗生素随着浓度的增加对土壤呼吸的影响不同,磺胺甲恶唑与甲氧苄啶对土壤呼吸的影响表现出很好的剂量依赖效应。恩诺沙星残留影响土壤微生物功能,进而可影响土壤特性和土壤呼吸作用、纤维分解作用、氨化作用、硝化作用等生态过程^[44]。兽药抗生素安普霉素对不同土壤中微生物呼吸活动和对土壤中微生物种群生长的影响有所差异^[45]。

由于各种抗生素对土壤微生物群落结构的可能影响,应该谨慎使用各种兽药抗生素,对于抗生素的环境风险进行更详细的研究^[46]。

3.4 对细菌抗药性的影响

抗生素污染的另一个重要的潜在危害是土壤环

境中微生物抗药性的发展。田间兽药等抗生素往往随粪便被施入土壤,因此土壤微生物会很快获得群落抗性,从而对整个土壤系统产生潜在危害。部分土壤中吸附的兽药会逐渐释放出来,残留的兽药会在较长一段时间内存在于土壤中,必然会诱导土壤中大量抗性菌的生长。土壤中的抗生素长期存在极有可能导致土壤中大量抗药菌的出现^[47]。已有报道表明,兽药随有机物一起施入土壤时土壤中微生物群落抗性明显增加。Heuer H 等^[48]研究了磺胺嘧啶对土壤微生物中细菌群落的影响,经猪粪处理后土壤中的抗生素抗性细菌增加。汪勇等^[49]研究了长期施用新鲜鸡粪、新鲜猪粪后对土壤中四环素抗性细菌的影响,结果表明新鲜鸡粪、猪粪中四环素抗性细菌的数量及其占可培养细菌总数比例均远远高于施肥前的基础土样,长期施用粪肥后,土壤中四环素抗性菌数量及其占可培养细菌总数比对照均有明显增加,而且有沿土壤深度呈纵向增加的趋势。

4 结论与展望

综上所述,土壤环境中的抗生素污染作为一种土壤新型污染对环境和人类健康的危害日趋明显,已越来越多受到人们的关注。然而,目前关于抗生素的环境污染、行为和毒理效应的研究还处于起步阶段。大多数对抗生素的研究局限于水生生态系统,毒性研究也大多针对水生生物,而对相对复杂的土壤环境中抗生素的行为归趋、生态毒性研究不够。因此,当前形势下更深入开展抗生素在土壤环境中的分布、迁移、转化规律以及生态毒理研究十分必要。

目前残留抗生素的吸附、降解行为研究以及对土壤生物及潜在生态毒理学效应的研究仅局限于对一些表面现象的描述,还缺乏对机理的探索^[50]。抗生素与其他污染物之间的联合毒性效应研究尚很少见,抗生素污染土壤的修复研究也不多,应该在这些方面加强研究,得到更为详尽的基础资料。

参考文献:

- [1] 杨红莲,袁著革,闫峻,等. 新型污染物及其生态和环境健康效应[J]. 生态毒理学报, 2009, 4(1): 28-34.
- [2] Richardson S D. Water analysis: Emerging contaminants and current issues[J]. *Analytical Chemistry*, 2007, 79: 4295-4323.
- [3] Ajit K S, Michael T Meyer, Alistair B A Boxall. 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.
- [4] 王冉,魏瑞成,刘铁铮,等. 金霉素在鸡排泄物中的残留及降解动态[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(1): 85-89.

- [5] Martinez - Carballo E, Gonzalez - Barreiro C, Scharf S, et al. Environmental monitoring study of selected veterinary antibiotics in animal manure and soils in Austria[J]. *Environmental Pollution*, 2007, 148(2):570 - 579.
- [6] Campagnolo E R, Johnson K R, Karpati A, et al. Antimicrobial residues in animal waste and water resources proximal to large - scale swine and poultry feeding operations[J]. *Science of the Total Environment*, 2002, 299:89 - 95.
- [7] 李彦文, 莫测辉, 赵 娜, 等. 高效液相色谱法测定水和土壤中磺胺类抗生素[J]. 分析化学, 2008, 36(7):954 - 958.
- [8] 李彦文, 莫测辉, 赵 娜, 等. 菜地土壤中磺胺类和四环素类抗生素污染特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(6):1762 - 1766.
- [9] 赵 娜. 珠三角地区典型菜地土壤抗生素污染特征研究[D]. 广州:暨南大学, 2007:38 - 50.
- [10] 李兆君, 姚志鹏, 张 杰, 等. 兽用抗生素在土壤环境中的行为及其生态毒理效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2008, 3(1):15 - 20.
- [11] Lertpaitoonpan W, Ong S K, Moorman T B. Effect of organic carbon and pH on soil sorption of sulfamethazine[J]. *Chemosphere*, 2009, 76(4):558 - 564.
- [12] Zhang J Q, Dong Y H. Effect of low - molecular - weight organic acids on the adsorption of norfloxacin in typical variable charge soils of China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 151(2 - 3):833 - 839.
- [13] 王丽平, 章明奎. 土壤性质对抗生素吸附的影响[J]. 土壤通报, 2009, (2):420 - 423.
- [14] 章明奎, 王丽平, 郑顺安. 两种外源抗生素在农业土壤中的吸附与迁移特性[J]. 生态学报, 2008, 28(2):761 - 766.
- [15] 武庭瑄, 周 敏, 郭宏栋, 等. 四环素在黄土中的吸附行为[J]. 环境科学学报, 2008, 28(11):2311 - 2314.
- [16] 鲍艳宇, 周启星, 万 莹, 等. 土壤有机质对土霉素在土壤中吸附 - 解吸的影响[J]. 中国环境科学, 2009(6):651 - 655.
- [17] Jones A D, Bruland G L, Agrawal S G, et al. Factors influencing the sorption of oxytetracycline to soils[J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2005, 24(4):761 - 770.
- [18] 鲍艳宇, 周启星, 张 浩. 阳离子类型对土霉素在2种土壤中吸附 - 解吸影响[J]. 环境科学, 2009, 30(2):551 - 556.
- [19] 张从良, 王 岩, 文春波, 等. 磺胺嘧啶在不同类型土壤中的吸附研究[J]. 农机化研究, 2007, 9:143 - 146.
- [20] 孔晶晶, 裴志国, 温 蓓, 等. 磺胺嘧啶和磺胺噻唑在土壤中的吸附行为[J]. 环境化学, 2008, 27(6):736 - 741.
- [21] Kay P, Blackwell P A, Boxall A B A. A lysimeter experiment to investigate the leaching of veterinary antibiotics through a clay soil and comparison with field data[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 134:333 - 341.
- [22] Aga D S, O' Connor S, Ensley S, et al. Determination of the persistence of tetracycline antibiotics and their degradates in manure - amended soil using enzyme - linked immunosorbent assay and liquid chromatography - mass spectrometry[J]. *Agric Food Chem*, 2006, 53:7165 - 7171.
- [23] Yang J F, Ying G G, Yang L H, et al. Degradation behavior of sulfadiazine in soils under different conditions[J]. *Journal of Environmental Science and Health Part B - Pesticides Food Contaminants and Agricultural Wastes*, 2009, 44(3):241 - 248.
- [24] Schlusener M P, Bester K. Persistence of antibiotics such as macrolides, tiamulin and salinomycin in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(3):565 - 571.
- [25] Wang Q Q, Yates S R. Laboratory study of oxytetracycline degradation kinetics in animal manure and soil[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(5):1683 - 1688.
- [26] 王 冉, 刘铁铮, 魏瑞成, 等. 猪粪便中兽药盐霉素残留的降解动态研究[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3):219 - 223.
- [27] 牛建平, 吴泽辉, 石起增. 磺胺二甲嘧啶在土壤中的降解动态研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(4):1767 - 1769.
- [28] Kumar K, Gupta S C, Chander Y, et al. Antibiotic use in agriculture and their impact on terrestrial environment[J]. *Advances in Agronomy*, 2005, 87:1 - 54.
- [29] Grote M, Schwake - Anduschus C, Michel R, et al. Incorporation of veterinary antibiotics into crops from manured soil[J]. *Landbauforschung Volkenrode*, 2007, 57(1):25 - 32.
- [30] 国 彬, 莫测辉, 张茂生, 等. 典型抗生素在土壤 - 水 - 蔬菜系统中迁移分布的研究[J]. 生态科学, 2009(2):169 - 173.
- [31] 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.
- [32] Boxall A B A, Johnson P, Smith E J, et al. Uptake of veterinary medicines from soils into plants[J]. *Journal of Agricultural Food Chemistry*, 2006, 54(6):2288 - 2297.
- [33] 聂湘平, 王 翔, 陈菊芳, 等. 三氯异氰尿酸与盐酸环丙沙星对蛋白核小球藻的毒性效应[J]. 环境科学学报, 2007, 27(10):1694 - 1701.
- [34] 王慧珠, 罗 义, 徐文青. 四环素和金霉素对水生生物的生态毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4):1536 - 1536.
- [35] Kong W D, Zhu Y G, Liang Y C, et al. Uptake of oxytetracycline and its phytotoxicity to alfalfa (*Medicago sativa* L.) [J]. *Environmental Pollution*, 2007, 147:187 - 193.
- [36] 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):313 - 318.
- [37] 刘吉强, 诸葛玉平, 崔丽娜. 外源青霉素对菜田土壤酶活性与油菜品质的影响[J]. 水土保持学报, 2009(1):202 - 206.
- [38] 金彩霞, 陈秋颖, 刘红军, 等. 两种常用兽药对作物发芽的生态毒性效应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(3):619 - 625.
- [39] Baguer A J, Jensen J, Krogh P H. Effects of the antibiotics oxytetracycline and tylosin on soil fauna[J]. *Chemosphere*, 2000, 40(7):751 - 757.
- [40] 高玉红, 孙振钧, 孙新胜, 等. 兽药阿苯哒唑对蚯蚓皮肤和肠道超显微结构的影响[J]. 环境科学学报, 2008, 28(12):2578 - 2582.
- [41] 汤玮婧, 杨清香. 土霉素对土壤微生物活性及群落的影响[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(1):70 - 73.
- [42] 王加龙, 刘坚真, 陈杖榴, 等. 恩诺沙星残留对土壤微生物数量及群落功能多样性的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, 11(1):86 - 89.
- [43] 刘 锋, 应光国, 周启星, 等. 抗生素类药物对土壤微生物呼吸的影响[J]. 环境科学, 2009, 30(5):1280 - 1285.
- [44] 王加龙, 刘坚真, 陈杖榴, 等. 恩诺沙星残留对土壤微生物功能的影响[J]. 生态学报, 2005, 25(2):279 - 282.
- [45] 刁晓平, 孙英健, 孙振钧, 等. 安普霉素对不同土壤中微生物活动的影响[J]. 生态环境, 2004, 13(4):565 - 568.
- [46] Schmitt, Heike, Martinali, et al. Antibiotics as environmental pollutants: Effects on soil microorganisms[J]. *Umweltwissenschaften und Schadstoff - Forschung*, 2006, 18(2):110 - 118.
- [47] 孔维株, 朱永官. 抗生素类兽药对植物和土壤微生物的生态毒理学效应研究进展[J]. 生态毒理学报, 2007, 2(1):1 - 9.
- [48] Heuer H, Smalla K. Manure and sulfadiazine synergistically increased bacterial antibiotic resistance in soil over at least two months[J]. *Environmental Microbiology*, 2007, 9(3):657 - 666.
- [49] 汪 勇, 林先贵, 王 - 明, 等. 长期施用粪肥对农田土壤中细菌四环素抗性水平的影响[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(14):5944 - 5945.
- [50] Boxall A B A, Kolpin D W, Halling - Sorensen B, et al. Are veterinary medicines causing environmental risks? [J]. *Environ Sci Technol*, 2003, 37:286A - 294A.