

方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

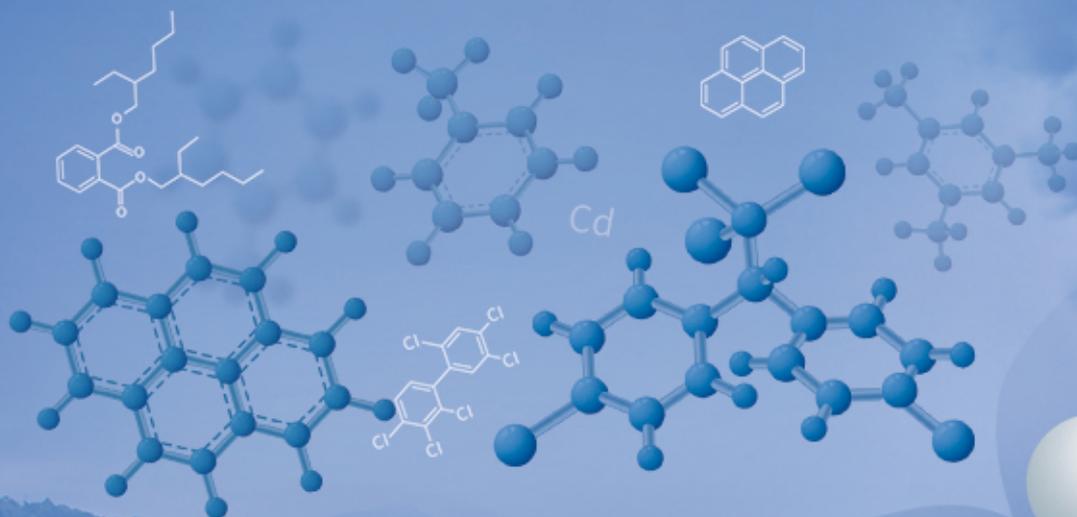
ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

HUANJING KEXUE

## 升金湖水体优先污染物筛选与风险评价

龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华



PAHs

VOCs

HMs

PCBs

OCPs

PAEs

ANTs

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年10月

第42卷 第10期

Vol.42 No.10

目次

PM<sub>2.5</sub>化学组分连续观测在污染事件源解析中的应用 ..... 蔡凡涛, 尚玥, 戴维, 谢鸣捷 (4575)

汾渭平原 PM<sub>2.5</sub>空间分布的地形效应 ..... 黄小刚, 赵景波, 孙从建, 汤慧玲, 梁旭琦 (4582)

华中地区冬季灰霾天气下 PM<sub>2.5</sub>中重金属污染特征及健康风险评价: 以湖北黄冈为例 .....  
..... 李星谕, 毛瑶, 陈展乐, 刘威杰, 程铖, 石明明, 许安, 苏业旺, 胡天鹏, 祁士华, 邢新丽 (4593)

华北区域大气中羰基化合物体积分数水平及化学反应活性 ..... 黄禹, 陈曦, 王迎红, 刘子锐, 唐贵谦, 李杏茹 (4602)

成都市春季 O<sub>3</sub> 污染特征及关键前体物识别 ..... 韩丽, 陈军辉, 姜涛, 徐晨曦, 李英杰, 王成辉, 王波, 钱骏, 刘政 (4611)

基于边界观测的长三角某工业区 O<sub>3</sub> 来源特征 ..... 黄晴, 黄银芝, 张珊, 金丹, 高松, 修光利 (4621)

廊坊开发区 8~9月 O<sub>3</sub> 污染过程 VOCs 污染特征及来源分析 ..... 张敬巧, 王宏亮, 方小云, 刘锐泽, 丁文文, 凌德印, 王淑兰 (4632)

广东省家具行业基于涂料类型的 VOCs 排放特征及其环境影响 .....  
..... 曾春玲, 邵霞, 刘锐源, 姚懿娟, 李银松, 侯墨, 刘洋, 范丽雅, 叶代启 (4641)

厦门湾空气质量对新冠疫情管控的响应 ..... 徐超, 吴水平, 刘怡婧, 钟雪芬 (4650)

北京平原和延庆地区山谷风异同及对污染的影响 ..... 吴进, 李琛, 马志强, 孙兆彬, 韩婷婷, 邱雨露, 马小会, 李颖芳, 朱晓婉 (4660)

两湖盆地冬季区域大气颗粒物污染特征及独特的风场和下垫面影响 .....  
..... 朱燕, 赵天良, 白永清, 徐家平, 孙晓芸, 胡未央, 常嘉成, 杨婕, 朱从祯 (4669)

燃煤电厂颗粒物中硫酸根与硝酸根离子的转化规律 ..... 杨柳, 何晴, 盛重义 (4678)

长江流域主要干/支流化学特征及外源酸的影响 ..... 王琪, 于爽, 蒋萍萍, 孙平安 (4687)

土地利用对太湖入流河道营养盐的影响 ..... 连心桥, 朱广伟, 杨文斌, 康丽娟, 朱梦圆, 许海 (4698)

基于 eDNA 技术的渭河浮游动物多样性及关键种生态位特征 .....  
..... 梁东, 夏军, 宋进喜, 常剑波, 吴琼, 程丹东, 张怡暄, 孔飞鹤, 任源鑫 (4708)

三亚市水体中 PPCPs 的污染水平、分布特征及生态风险评价 ..... 任丙南, 耿静 (4717)

升金湖水体优先污染物筛选与风险评价 ..... 龚雄虎, 丁琪琪, 金苗, 薛滨, 张路, 姚书春, 王兆德, 卢少勇, 赵中华 (4727)

天目湖沙河水库水生态安全状况长期变化及影响因素 ..... 杨文斌, 段文秀, 崔扬, 朱广伟, 吴天浩, 许海, 朱梦圆 (4739)

华中地区供水水库抗生素抗性基因的季节变化及影响因素 ..... 张凯, 辛蕊, 李观家, 王倩, 王亚南, 许智恒, 崔向超, 魏巍 (4753)

快速城镇化进程中珠江三角洲硝酸型地下水赋存特征及驱动因素 ..... 吕晓立, 刘景涛, 韩占涛, 朱亮, 张玉玺 (4761)

盐城地区地表水化学空间特征及控制因素分析 ..... 王建, 张华兵, 许君利, 彭俊 (4772)

基于沉积物中总氮和总磷垂向分布与吸附解吸特征的白洋淀清淤深度 .....  
..... 周亚婷, 陈兴宏, 李立青, 张伟军, 张美一, 王东升, 王洪杰 (4781)

硼酸和磷酸对 PMS/Co<sup>2+</sup> 均相催化氧化有机物的影响因素与机制 ..... 万琪琪, 陈铸昊, 曹瑞华, 王静怡, 李刚 (4789)

磁性生物炭负载 α-MnO<sub>2</sub> 活化过一硫酸盐降解 2,2',4,4'-四溴联苯醚 ..... 李鑫, 尹华, 罗昊昱, 欧阳晓芳, 刘航, 祝铭韩 (4798)

紫外活化过硫酸钠灭活水中噬菌体 MS2 的特性及机制 ..... 张崇森, 杨昊明, 王真 (4807)

铈改性水葫芦生物炭对磷酸盐的吸附特性 ..... 王光泽, 曾薇, 李帅帅 (4815)

低温地下水净化工艺中氨氮去除性能及机制 ..... 李冬, 刘孟浩, 张瑞苗, 曾辉平, 张杰 (4826)

我国城市污泥中重金属的赋存形态与生态风险评价 ..... 耿源濛, 张传兵, 张勇, 黄豆豆, 闫姝骁, 孙腾飞, 程柳, 王静, 毛宇翔 (4834)

不同气候类型下污水厂活性污泥中微生物群落比较 ..... 杨思航, 秦泽生, 梁漫春 (4844)

部分亚硝化-厌氧氨氧化协同反硝化处理生活污水脱氮除碳 ..... 秦彦荣, 袁忠玲, 张明, 张民安, 刘安迪, 付雪, 马娟, 陈永志 (4853)

同步短程硝化-厌氧氨氧化-短程反硝化颗粒污泥培育过程及其性能 ..... 周峰, 刘勇弟, 厉巍 (4864)

多种微塑料提取方法在中国典型土壤中的应用 ..... 赵小丽, 刘子涵, 从辰宇, 韩剑桥 (4872)

柴达木盆地表土重金属污染与来源分析 ..... 陈亮, 张西营, 唐启亮, 耿盛, 王二龙, 李姜瑶 (4880)

快速城市化区域不同用地类型土壤重金属含量分布特征及生态风险 ..... 李梦婷, 沈城, 吴健, 黄沈发, 李大雁, 王敏 (4889)

广西都安县典型水田晒地球化学特征及影响因素 ..... 刘飞, 杨柯, 徐仁廷, 唐世琪 (4897)

炭化苹果枝通过减少土壤 DTPA-Cd 降低苹果砷木镉积累和镉伤害 ..... 邓波, 荀咪, 张玮玮, 杨洪强 (4908)

海南省集约化种植园中谷物、蔬菜和水果中重金属累积程度及健康风险 .....  
..... 杨剑洲, 王振亮, 高健翁, 严慧, 胡树起, 唐世新, 龚晶晶 (4916)

环境中抗生素抗性基因丰度与抗生素和重金属含量的相关性分析: 基于 Web of Science 数据库检索 ..... 苗荪, 陈磊, 左剑恶 (4925)

银川市农田土壤中四环素类抗生素的污染特征及生态风险评估 ..... 张小红, 陶红, 王亚娟, 马志义, 周泽英 (4933)

施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响 ..... 李斌绪, 朱昌雄, 宋婷婷, 马金莲, 张治国, 李红娜 (4942)

我国典型森林土壤微生物驱动的氮代谢途径特征解析 ..... 吕雪丽, 赵永鹏, 林清火, 彭显龙, 尹云锋, 蒋先军 (4951)

青藏高原高寒湿地春夏两季根际与非根际土壤反硝化速率及 nirS 型反硝化细菌群落特征分析 .....  
..... 李玉倩, 马俊伟, 高超, 霍守亮, 夏星辉 (4959)

松嫩平原芦苇湿地退化与修复过程中土壤细菌和甲烷代谢微生物的群落结构 .....  
..... 王秋颖, 王娜, 刘颖, 陈功, 何辉, 高婕, 庄绪亮, 庄国强 (4968)

不同轮作休耕下潮土细菌群落结构特征 ..... 南镇武, 刘柱, 代红翠, 张磊, 王娜, 徐杰, 刘开昌, 孟维伟, 王旭清 (4977)

稻田土壤光合细菌群落对镉污染的响应 ..... 罗路云, 金德才, 王殿东, 陈昂, 张德咏, 曾军, 匡炜, 张卓, 刘勇 (4988)

铁尾矿芦苇根际微生物和根内生菌群落分布及其限制性因子解析 ..... 曹曼曼, 王飞, 周北海, 陈辉伦, 袁蓉芳 (4998)

有机无机氮配施对不同程度盐渍土硝化和反硝化作用的影响 ..... 周慧, 史海滨, 张文聪, 王维刚, 苏永德, 闫妍 (5010)

水稻产量、稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放对长期大气 CO<sub>2</sub> 浓度升高的响应 ..... 于海洋, 宋开付, 黄琼, 王天宇, 张广斌, 马静, 朱春梧, 徐华 (5021)

原料和热解温度对生物炭中可溶性有机质的影响 ..... 闫代红, 马亚培, 宋凯悦, 马红亮, 高人, 尹云锋 (5030)

中国 84 个主要城市大气热岛效应的时空变化特征及影响因素 ..... 李宇, 周德成, 闫章美 (5037)

室内建筑装饰装修材料气味物质及其释放研究进展 ..... 张万众, 张彭义 (5046)

《环境科学》征订启事 (4814) 《环境科学》征稿简则 (4871) 信息 (4907, 5009, 5029)

# 施用不同来源粪肥对土壤中抗生素淋溶的影响

李斌绪<sup>1</sup>, 朱昌雄<sup>1</sup>, 宋婷婷<sup>1</sup>, 马金莲<sup>2</sup>, 张治国<sup>1</sup>, 李红娜<sup>1\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2. 湖北省荆州市公安县水利和湖泊局, 荆州 434300)

**摘要:** 含有抗生素的粪肥进入农田土壤中对土壤生态系统和水体环境产生危害, 同时也会造成抗生素耐药性的传播, 对环境和人体健康存在威胁. 本研究采用土柱淋溶法, 以添加四环素类抗生素(四环素、土霉素和金霉素)的猪粪(PM-T)、牛粪(CM-T)、鸡粪(CHM-T)及空白处理(CK-T)为实验组, 未添加抗生素的处理为对照组, 研究了模拟淋溶条件下施用不同来源粪肥对土壤理化指标和细菌丰度的影响, 阐述不同处理四环素类抗生素的迁移规律. 结果表明, 相比于CHM-T和CM-T处理组, 四环素类抗生素更容易在PM-T处理中累积, 残留量为 $0.90 \sim 6.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 明显高于其他处理( $0.33 \sim 4.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ); 相比于表层土壤( $0 \sim 4 \text{ cm}$ ), 四环素类抗生素在下层土壤( $16 \sim 24 \text{ cm}$ )的浓度更高. PM-T处理土壤中TN和 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量分别增加 $44 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $14.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 明显高于其他处理. 在抗生素的抑制作用下土壤中细菌丰度减少, PM-T处理土壤中的细菌丰度降低39.66%, 高于其他添加抗生素处理组(12.38%~35.26%). CHM-T处理中抗生素更容易从土壤中淋出, 淋出总量为9.91 mg, 明显高于其他粪肥处理组( $P < 0.05$ ). TN、 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 、四环素、土霉素和金霉素等指标为第一主成分因子, 解释量为54.55%, 其土壤中的含量与土层深度正相关. 总结得出, 以猪粪为原料的粪肥处理中四环素类抗生素更容易累积在土壤中, 特别是土壤下层, 同时更容易造成土壤中微生物环境的改变; 而以鸡粪为原料的粪肥施用后抗生素更容易淋出土壤, 增加水体污染的风险.

**关键词:** 淋溶; 土壤; 粪肥; 抗生素; 迁移

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)10-4942-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202101112

## Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil

LI Bin-xu<sup>1</sup>, ZHU Chang-xiong<sup>1</sup>, SONG Ting-ting<sup>1</sup>, MA Jin-lian<sup>2</sup>, ZHANG Zhi-guo<sup>1</sup>, LI Hong-na<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Water Resources Bureau of Gong'an County, Jingzhou 434300, China)

**Abstract:** Antibiotic residues in farmland soils resulting from the application of livestock manure poses risks to the soil and water ecology associated with the spread of antibiotic resistance, thereby threatening environmental safety and human health. Here, a leaching experiment was carried out using soil (CK-T), pig manure (PM-T), cow manure (CM-T), and chicken manure (CHM-T) with the addition of tetracyclines (tetracycline, oxytetracycline, and chlortetracycline) and a control group (without antibiotics). The effects of different sources of manure on soil physical and chemical indicators and bacterial abundance under simulated leaching conditions were studied, while the migration of tetracyclines in the different treatments were also determined. The results showed that compared with the CHM-T and CM-T treatments, the tetracyclines in the PM-T treatment were more easily accumulated in the soil (residual amounts =  $0.90 \sim 6.91 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  compared to the other treatments =  $0.33 \sim 4.42 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ). Compared with the surface soil ( $0 \sim 4 \text{ cm}$ ), higher concentrations of tetracyclines were detected at soil depths of  $16 \sim 24 \text{ cm}$ . Consistent with the residues of antibiotics, the concentrations of TN and  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  in the soil with the PM-T treatment were increased by  $0.044 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  and  $14.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively, which were significantly higher than other treatments. The abundance of bacteria in the soil was reduced due to the bactericidal effect of antibiotics, by 39.66% in the PM-T treatment, which was significantly higher than in the other treatments (12.38%~35.26%). Compared with other treatments, the antibiotics in the CHM-T treatment were more easily leached from the soil, with 9.91 mg of antibiotics in the leachate, which was significantly higher than the other treatments ( $P < 0.05$ ). TN,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ , tetracycline, oxytetracycline, and chlortetracycline were the first principal component factors, accounting for 54.55% of the variation, and corresponding concentrations increased with soil depth. Based on these results, tetracyclines in pig manure tended to accumulate in soil and transfer vertically along with variations in the soil microbial community. For chicken manure, relatively high concentrations of tetracyclines were detected in the soil leachate, increasing the risk of water pollution.

**Key words:** leaching; soil; manure; antibiotics; migration

四环素类抗生素(tetracyclines, TCs)被广泛用于保护人类健康、减少疾病、促进牲畜和家禽的生长<sup>[1]</sup>. 据统计进入动物体内的TCs大约30%~90%以母体或代谢物的形式排出体外<sup>[2]</sup>. 含有抗生素的畜禽粪便以粪肥的形式进入土壤环境中, 经过淋溶作用迁移到更远的土壤和水体环境中<sup>[3]</sup>. 抗生素经常能在土壤和废水中检测到, 特别是那些与集中动物饲养操作相关的地区<sup>[4]</sup>. 在长期施用粪便有机肥的土壤中检测到四环素(tetracycline, TC)、土霉素(oxytetracycline, OTC)和金霉素(chlortetracycline,

CTC)的含量高达1 079、2 683和 $105 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[5]</sup>. 与其他抗生素相比, TCs在土壤环境中持久性强、残留量高, 在土壤中的污染形势也更加严峻, 其原药和代谢产物均会严重危害土壤环境. 土壤中TCs不仅

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2021-03-11

基金项目: 中国科学技术协会青年人才托举工程项目(2018QNRC001); 北京市自然科学基金项目(6192029); 国家水体污染控制治理科技重大专项(2017ZX07401002)

作者简介: 李斌绪(1989~), 男, 博士研究生, 主要研究方向为污染环境修复, E-mail: libinxu123@163.com

\* 通信作者, E-mail: lihongna828@163.com

影响土壤中微生物的种群数量、群落结构及其功能,而且还会诱导产生抗生素耐药菌以及相应的抗性基因,对动植物的生长和人类健康产生不利影响<sup>[6]</sup>.同时土壤中的 TCs 会在雨水的淋溶作用下迁移到地下水中,对地下水安全产生严重危害.因此,研究抗生素在土壤中的迁移转化规律,对评估抗生素对环境危害具有重要的意义.

对于抗生素在土壤中的迁移吸附情况,前人已对此开展相关研究.郭欣妍等<sup>[7]</sup>研究了在相同淋溶条件下 5 种磺胺类抗生素在潮土、黄棕壤、红壤、水稻土和黑土中的迁移规律,结果表明磺胺类抗生素在黑土中的淋溶性能最小,在潮土中最大.赵玲等<sup>[8]</sup>研究了相同淋溶量下 OTC 在赤红壤、红壤和黑钙土的迁移能力,结果表明 OTC 在赤红壤迁移能力最强,在黑钙土最弱,同时 OTC 迁移能力随着淋溶溶液的 pH 值增大而减小.有研究发现土壤对抗生素的吸附能力与土壤有机质含量呈正相关,同时与土壤性质、有机质组分以及抗生素种类相关<sup>[9,10]</sup>.Pan 等<sup>[11]</sup>研究相同淋溶条件下鸡粪中不同浓度抗生素在土壤中的迁移规律,结果表明随着抗生素的浓度增大迁移深度越深.罗芳林<sup>[12]</sup>的研究表明猪粪中 DOM 通过共吸附机制增加紫色土壤中弱疏水型抗生素的残留量,减少其在土壤中的迁移淋溶.李舒涵等<sup>[13]</sup>的研究发现鸡粪 DOM 对土壤中弱

吸附性抗生素淋溶迁移具有显著阻滞作用. Kay 等<sup>[14]</sup>的研究发现猪粪浆对土壤中 TCs 迁移没有显著影响,可能与土壤性质和猪粪浆中有机物的组成相关.目前对于抗生素在土壤中的行为研究多集中于吸附规律的影响,且多针对某一种粪肥进行研究,而对于不同种类的粪肥施用后土壤中抗生素的淋溶迁移规律还缺乏系统研究.基于此,本研究采用土柱淋溶法研究施用猪粪、牛粪和鸡粪这 3 种不同粪肥对土壤理化指标和细菌丰度的影响,阐述不同处理中四环素类抗生素的迁移规律,以期了解施用不同粪肥对土壤中抗生素的淋失的影响及抗生素对水体污染的风险评价提供依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 实验材料

标准抗生素 CTC (99%), OTC (98%) 和 TC (99%) 购自 Sigma-Aldrich (St. Louis, MO) 公司. 甲醇(色谱纯)购自 Fisher Scientific (Houston, TX) 公司,其他试剂购自北京化学试剂公司(北京). 实验土壤取自中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所顺义实验基地的表层土,土壤风干过 2 mm 筛备用. 腐熟猪粪、牛粪和鸡粪粪肥取自顺义基地的养殖场,腐熟粪肥经风干磨细后备用. 供试土壤和粪肥的基本理化性质见表 1.

表 1 供试土壤和粪肥的基本理化性质

Table 1 Basic properties of the studied soils and manures

项目	pH	EC/ $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	TN/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	TOC/%	CTC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	OTC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	TC/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
土壤	8.61	124.7	0.23	0.504	0	0	0
猪粪	7.70	2545	23.03	25.38	3.091	0.254	0.893
牛粪	7.96	1892	13.12	21.24	0.012	0.009	0.061
鸡粪	8.84	1827	3.41	9.36	0.009	0.015	0.412

### 1.2 实验方法

本实验按照大田农作物每  $\text{hm}^2$  施用 12 t 农家肥的标准进行实验,取 10 g 猪粪粪肥、牛粪粪肥、

鸡粪粪肥分别与 2.5 kg 土壤充分混匀. 添加 TC、OTC、CTC 最终含量各为  $4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 本实验各处理如表 2 所示,各处理重复 3 次.

表 2 各实验处理组成

Table 2 Experimental processing composition

实验处理	CK-T	CK	PM-T	PM	CM-T	CM	CHM-T	CHM
粪肥种类	无	无	猪粪	猪粪	牛粪	牛粪	鸡粪	鸡粪
TCs 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4	0	4	0	4	0	4	0

本实验采用模拟雨水为淋溶液,其组成为:  $\text{CaCl}_2$   $0.0375\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $\text{MgCl}_2$   $0.0417\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$   $0.0776\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $\text{K}_2\text{CO}_3$   $0.0228\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ . 土壤淋溶柱高度为 30 cm、内径为 10 cm. 为了去除土柱内的空气,实验开始前把淋溶柱的下端浸没于淋溶液中放置 12 h,使土壤的含水率接近饱和. 实验过程中,淋溶液以  $0.5\text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$  的

速度淋洗 10 h,相当于 1 d 180 mm 的降雨量<sup>[7]</sup>. 结束后将土柱平均分成 6 段进行取样,测定土壤含水率、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 以及细菌丰度、土壤全氮(TN)和 TCs 含量. 淋洗液每小时收集一次,测定 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 和 TCs 含量.

### 1.3 分析方法

土壤中全氮(TN)测定采用凯氏定氮法<sup>[15]</sup>. 称

取 12 g 鲜土样放入 250 mL 三角瓶中,加入 0.01 mol·L<sup>-1</sup> CaCl<sub>2</sub> 浸提液 100 mL,振荡 1 h 后过滤,滤液用连续流动分析仪 (Skalar San ++, The Netherlands) 测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度. 淋溶液直接采用连续流动分析仪测定 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 浓度. 土样中的 TCs 浓度采用 Zhou 等<sup>[16]</sup> 的方法测定,土样经冷冻干燥粉碎后,使用甲醇-乙腈-乙酮(2:2:1, 体积比)进行超声萃取,萃取液经 Oasis HLB cartridges (6 mL, 500 mg, Waters, Milford, MA) 富集后使用高效液相色谱仪测定. 淋溶液经 Oasis HLB cartridges 富集后利用高效液相色谱仪测定. 土壤中的细菌丰度采用牛肉膏蛋白胨培养基 (pH = 7.2), 以平板表面涂抹法计数.

#### 1.4 数据分析方法

本实验结果用平均值和标准差来表示,利用 Origin 9.0 软件作图并对实验数据进行显著性等统

计分析.

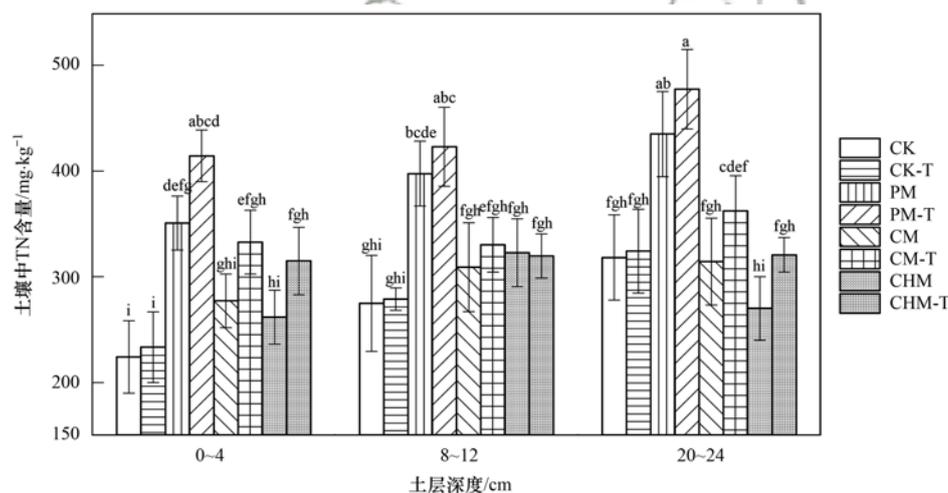
## 2 结果与分析

### 2.1 土壤中 TN 的变化情况

如图 1 所示,随着土壤深度的增加土壤 TN 含量增加,例如 CK 处理 0~4、8~12 和 20~24 cm 土层中 TN 含量为 220、270 和 320 mg·kg<sup>-1</sup>,其他处理表现出相同的趋势(CHM 处理除外). CK-T、PM-T、CM-T、CHM-T 处理与相应未添加 TCs 处理相比土壤中 TN 平均含量的增加量为 6.5、44、41 和 34 mg·kg<sup>-1</sup>,添加粪肥处理土壤中 TN 平均含量的增加量明显高于 CK-T 处理.

### 2.2 土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量变化

添加 TCs 处理组土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量明显高于未添加 TCs 处理组(图 2). CK 和 CK-T 处理土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 平均含量为 2.75 mg·kg<sup>-1</sup> 和 8.16 mg·kg<sup>-1</sup>,



不同小写字母代表所有处理间存在显著性差异 ( $P < 0.05$ ),下同

图 1 土壤中 TN 含量变化情况

Fig. 1 Changes in the TN content of soil

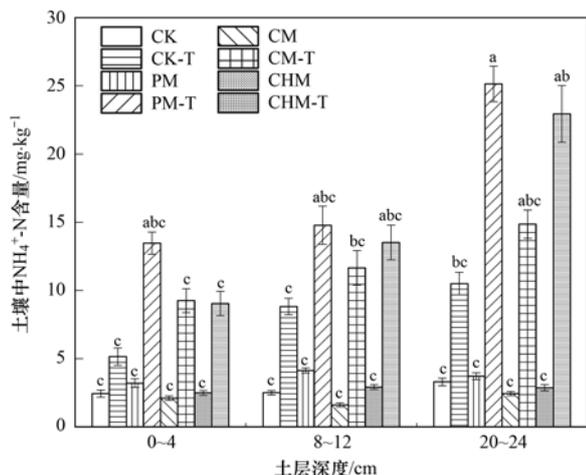


图 2 土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量变化情况

Fig. 2 Changes in NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content of soil

添加 TCs 后土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的增加量为 5.41 mg·kg<sup>-1</sup>. PM-T、CM-T 和 CHM-T 处理与 PM、CM 和 CHM 处理相比土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的增加量为 14.11、9.87 和 12.41 mg·kg<sup>-1</sup>,结果表明添加 TCs 后土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量明显增加. 在雨水的淋溶作用下,20~24 cm 土层 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量明显高于 0~4 cm 土层,例如 PM-T 处理 0~4 cm 和 20~24 cm 土层中土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量分别为 14.78 mg·kg<sup>-1</sup> 和 25.15 mg·kg<sup>-1</sup>,其他处理表现出相同的趋势,说明在淋溶条件下 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 更容易迁移到土壤下层.

### 2.3 土壤中 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量变化

如图 3 所示,实验结果表明添加抗生素实验组土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 平均含量明显高于未添加抗生素实验组,这与土壤中 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量变化具有相同的规律,

例如 CM 和 CM-T 处理土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 平均含量为  $0.129 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.172 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 与未添加 TCs 处理相比, CK-T、PM-T、CM-T 和 CHM-T 处理土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 的增加量为  $0.0488$ 、 $0.0226$ 、 $0.0433$  和  $0.0238 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 结果表明 PM-T 处理土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 增加量低于其他添加 TCs 处理组, 这与土壤  $\text{NH}_4^+$ -N 含量变化趋势不同.

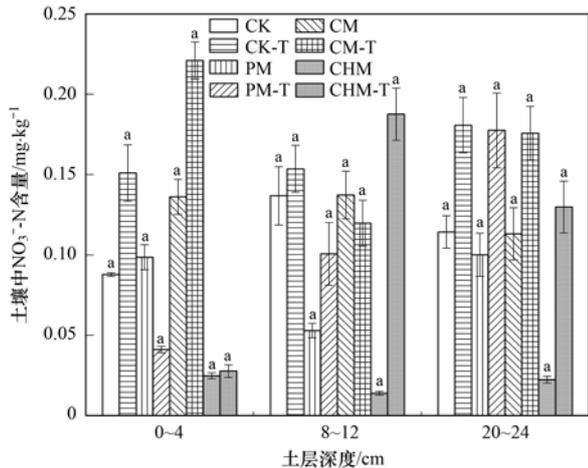


图3 土壤  $\text{NO}_3^-$ -N 含量变化情况

Fig. 3 Changes in  $\text{NO}_3^-$ -N content of soil

## 2.4 土壤中 TCs 含量变化

本实验结束时, 添加粪肥处理组土壤中 TCs 的残留量明显高于未添加粪肥处理组 (图 4). CK-T、PM-T、CM-T 和 CHM-T 处理中土壤 TCs 残留量为  $0.50 \sim 2.29$ 、 $0.90 \sim 6.91$ 、 $0.93 \sim 4.42$  和  $0.33 \sim 2.53 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . PM-T 处理土壤中 TCs 残留量明显高于 CM-T、CHM-T, 表明 TCs 更容易在添加猪粪粪肥的土壤中残留. CK-T 处理中土壤中 OTC、TC 和 CTC 残留量为  $1.20 \sim 2.83$ 、 $0.50 \sim 0.86$  和  $0.44 \sim 0.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ . OTC 在土壤中的残留量明显高于 TC 和 CTC, 其他处理表现出相同的趋势. CK-T、CM-T 和 CHM-T 处理中抗生素在  $8 \sim 24 \text{ cm}$  土层分布基本一致. 例如 CM-T 处理中 TC 在  $8 \sim 24 \text{ cm}$  土层残留量为  $1.30 \sim 1.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 其他处理呈现出相同的趋势, 说明  $10 \text{ h}$  淋溶结束土壤中的未被吸附的 TCs 随淋溶液迁移出土柱. 而 PM-T 处理  $16 \sim 24 \text{ cm}$  土壤的 TCs 残留量明显高于其他土层, 这表明实验结束后土壤中的 TCs 被淋溶到土壤中的底层, 还未被完全淋溶出土柱.

## 2.5 淋溶液中 $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 TCs 质量变化

本实验结束时不同实验处理淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 质量如表 3 所示. 添加粪肥处理组与 CK 处理相比淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 增加质量为  $0.08 \sim 0.37 \text{ mg}$ , 而 PM 处理增加质量多于其他处理. 与未添加抗生素处理

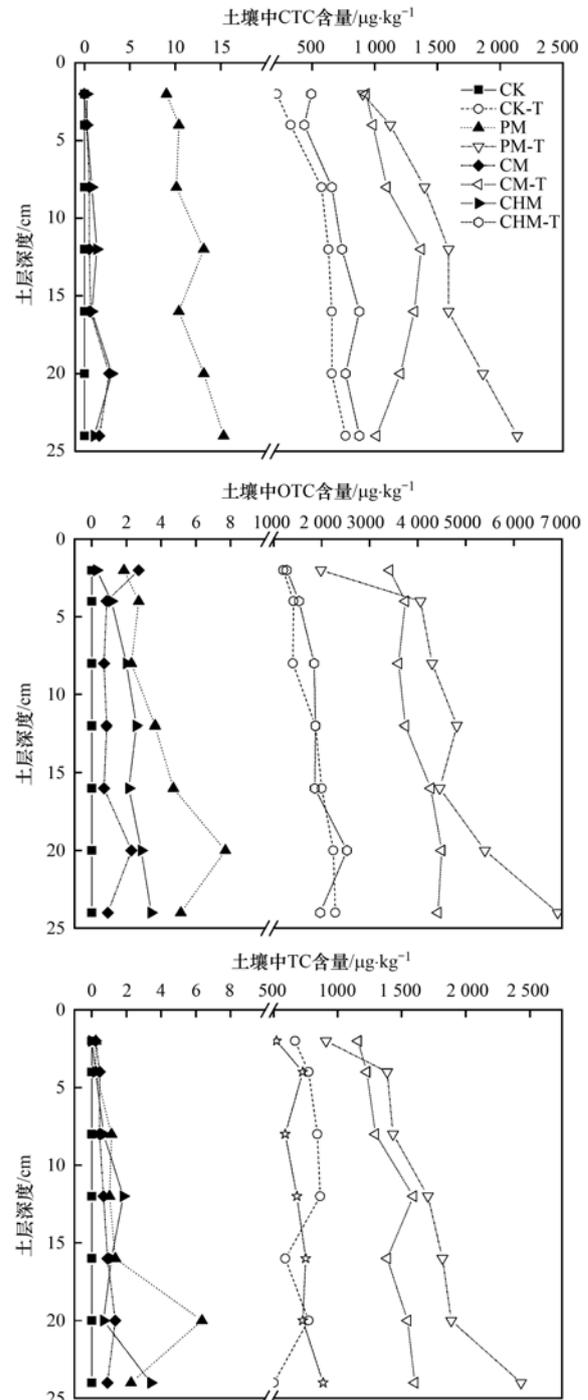


图4 土壤中 CTC、OTC 和 TC 含量

Fig. 4 CTC, OTC, and TC content of soil

相比, 添加抗生素处理淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 质量增加, PM-T 处理与 PM 处理相比淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 质量增加为  $0.27 \text{ mg}$ , 高于 CK-T、CM-T 和 CHM-T 处理.

添加 TCs 处理组淋溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 质量高于未施加 TCs 处理组. 例如 PM-T 和 PM 处理淋溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 质量为  $28.17 \text{ mg}$  和  $27.81 \text{ mg}$ , 其他处理表现出相同的趋势. 实验结束以后 CK-T、PM-T、CM-T 和 CHM-T 处理与未添加 TCs 处理相比较淋溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 质量增加量为  $0.781$ 、 $0.366$ 、 $0.766$  和  $0.377 \text{ mg}$ . PM-T 处理淋溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 质量增加量

小于其他处理,这与 PM-T 处理土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 变化趋势相同。

本实验结束时,添加 TCs 处理淋溶液中 TCs 的质量分别为 7.26 ~ 10.20 mg,而 PM-T 处理 TCs 质量明显低于其他添加 TCs 处理,表明 PM-T 处理中 TCs 更容易在土壤中富集,随淋溶液迁出土壤的

量小于其他处理.本实验结果表明,随着粪肥中有机的含量的增加土壤中 TCs 的残留量增加,迁出土壤的 TCs 量减少.与 PM-T 和 CM-T 处理相比 CHM-T 处理淋溶液中 TCs 含量高,说明 CHM-T 处理中 TCs 更容易迁出土壤造成地下水的污染。

表 3 淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N、 $\text{NO}_3^-$ -N 和 TCs 质量<sup>1)</sup>

Table 3 Mass of  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{NO}_3^-$ -N, and TCs in leachates

项目	CK	CK-T	PM	PM-T	CM	CM-T	CHM	CHM-T
$\text{NH}_4^+$ -N/mg	0.72 ± 0.02e	0.81 ± 0.02d	1.09 ± 0.02b	1.36 ± 0.05a	0.82 ± 0.00d	0.92 ± 0.02c	0.80 ± 0.01d	0.89 ± 0.01c
$\text{NO}_3^-$ -N/mg	13.92 ± 1.14e	14.71 ± 0.63d	27.81 ± 2.07a	28.17 ± 1.22a	25.47 ± 1.11c	26.25 ± 1.21b	12.87 ± 0.84f	13.25 ± 0.17f
TC/μg	0 ± 0g	4 428 ± 31.1a	0.10 ± 0.01e	3 096 ± 9.49d	0.05 ± 0.00f	4 280 ± 15.92c	0.01 ± 0.00g	4 385 ± 15.96b
CTC/μg	0 ± 0f	3 673.2 ± 17.07a	0.22 ± 0.01e	2 799.8 ± 22.79d	0.01 ± 0.00f	3 240.8 ± 24.68c	0.01 ± 0.00f	3 564.9 ± 55.08b
OTC/μg	0 ± 0h	2 102.4 ± 32.28a	0.39 ± 0.02e	1 367.4 ± 63.66d	0.13 ± 0.01f	1 553.6 ± 39.75c	0.09 ± 0.00g	1 955.2 ± 79.77b
TCs/μg	0 ± 0h	10 203.6 ± 20.67a	0.71 ± 0.02e	7 263.2 ± 30.65d	0.19 ± 0.00f	9 054.4 ± 9.97c	0.11 ± 0.00g	9 905.1 ± 66.77b

1) 数值(平均值 ± 标准差, n=3)后的不同小写字母表示同一行存在显著性差异 ( $P < 0.05$ )

## 2.6 土壤中的细菌丰度变化

本实验结束时土壤中细菌丰度变化情况如图 5 所示.添加 TCs 处理组土壤中细菌丰度明显低于未添加 TCs 处理组,例如 CK 和 CK-T 处理土壤中细菌平均丰度为  $1.29 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $1.13 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其他处理也表现出相同的趋势,结果显示 TCs 对土壤中微生物的生长繁殖具有抑制作用.在未添加 TCs 处理组,20 ~ 24 cm 土层中细菌丰度明显高于 0 ~ 4 cm 土层.例如 PM 处理中 0 ~ 4 cm 和 20 ~ 24 cm 土层细菌的丰度为  $3.04 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $3.77 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其他处理组表现出相同的趋势. CK 和 CK-T 处理土壤中细菌的平均丰度为  $1.29 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$  和  $1.13 \times 10^5 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,添加 TCs 后土壤细菌丰度的减少量为  $1.67 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,减少率为 12.90%.添加 TCs 后 PM、CM 和 CHM 处理土壤细菌丰度的减少量为  $1.35 \times 10^5$ 、 $4.83 \times 10^4$  和  $2.12 \times 10^4 \text{ CFU} \cdot \text{g}^{-1}$ ,其丰度降低 39.66%、35.26% 和 12.38%,结果表明 PM-T 处理土壤中细菌丰度减少率高于其他处理. CK-T、PM-T、CM-T 和 CHM-T 处理 20 ~ 24 cm 土层中细菌丰度降低 31.98%、51.99%、41.34% 和 27.16%,明显高于 0 ~ 4 cm 土层 (-10.87% ~ 28.00%).

## 2.7 主成分分析(PCA)

第一主成分所占的解释量达到 54.55%,其贡献因子为 TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、TC、OTC 和 CTC(表 4),以上指标与土层的深度呈现正相关,例如 CK-T 处理中 0 ~ 4、8 ~ 12 和 20 ~ 24 cm 土层中  $\text{NH}_4^+$ -N 含量为 5.15、8.83 和 10.50  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其他处理指标表现出相同的趋势.第二主成分的解释量为 19.42%,其主要的贡献因子为土壤细菌丰度和  $\text{NO}_3^-$ -N,其中  $\text{NO}_3^-$ -N 与土层深度呈现负相关的关系.第一主成分

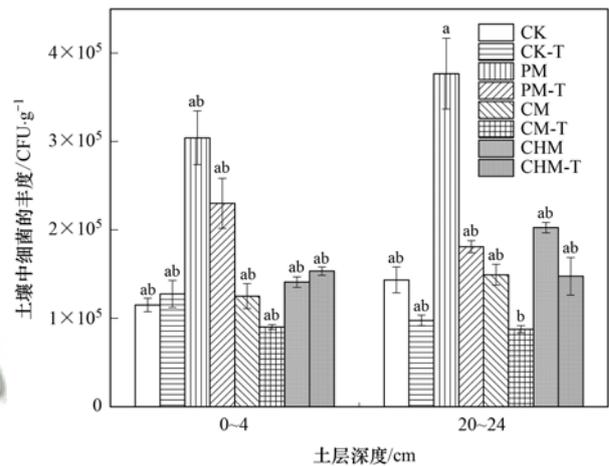


图 5 土壤中细菌丰度变化情况

Fig. 5 Total bacterial abundance in soil

主要以土壤中理化指标为主,第二主成分主要以土壤中微生物指标为主,而土壤中硝态氮含量由于多方面因素的影响,其含量与土层深度呈现负相关的关系。

表 4 各成分得分系数矩阵

Table 4 Coefficient matrix for each component

项目	成分	
	1	2
TN	0.73	0.57
$\text{NH}_4^+$ -N	0.91	-0.10
$\text{NO}_3^-$ -N	0.30	-0.53
细菌丰度	-0.03	0.94
TC	0.96	-0.20
CTC	0.98	-0.15
OTC	0.96	-0.22

对照 8 个处理在第一主成分得分见表 5,分别各处理 PC1 得分排序为: PM-T > CM-T > CHM-T > CK-T > PM > CM > CHM > CK,证明了在对第一主成分贡献率上的差异,即土壤中 TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、TC、

OTC 和 CTC 等的含量在 PM-T、CM-T、CHM-T、CK-T、PM、CM、CHM 和 CK 处理中依次降低. 对于第二主成分 PC2 得分排序为: PM > PM-T > CHM-T > CHM > CM > CK > CK-T > CM-T. PM 处理中细菌的丰度高于其他处理, 添加 TCs 以后 PM-T 处理土壤细菌丰度减少, 但其细菌丰度依然高于其他处理组.

表 5 各处理综合得分

Table 5 Comprehensive score for each treatment

项目	PC1	PC2
CK	-1.74	-0.69
CK-T	-0.65	-1.86
PM	-0.68	3.93
PM-T	3.63	1.42
CM	-1.58	-0.53
CM-T	1.71	-2.13
CHM	-1.68	-0.25
CHM-T	0.57	-0.12

### 3 讨论

粪肥中具有许多极性官能团能够吸附 TCs, 例如腐殖酸中的羧基、酚羟基、羰基、氨基和甲氧基等<sup>[17]</sup>. 土壤添加粪肥以后对 TCs 吸附量增加, 致使土壤中 TN 含量增加. 土壤中含氮化合物在淋溶液的作用下迁移到土柱底层, 致使下层土壤 (20 ~ 24 cm) TN 含量高于表层土壤. 与其他处理比较, 添加猪粪的处理组土壤中 TN 含量最高, 这主要与猪粪中 TN 背景含量最高有关 (表 1). 与未添加 TCs 处理组相比, 添加 TCs 处理组土壤中 TN 含量增加, 主要由于添加 TCs 以后增加土壤中 TN 的含量. 与未添加抗生素处理组相比, PM-T 处理土壤中 TN 增加量高于其他粪肥处理组, 主要原因是猪粪粪肥中有机质含量高于其他粪肥处理 (表 2), 对 TCs 吸附能力强于其他添加粪肥处理组<sup>[12]</sup>.

添加 TCs 后土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 含量明显增加, 主要原因是 TCs 在自然条件 (光解、水解和微生物作用等) 下降解产生  $\text{NH}_4^+$ -N<sup>[18]</sup>. PM-T 处理土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 增加量高于其他处理, 其原因一方面是土壤中残留 TCs 量高于其他处理, 降解产生的  $\text{NH}_4^+$ -N 高于其他处理; 另一方面猪粪粪肥中微生物丰度高于其他粪肥处理, 微生物分解 TCs 产生较多的  $\text{NH}_4^+$ -N<sup>[18]</sup>, 同时土壤中有机质增多, 增强对  $\text{NH}_4^+$ -N 吸附效果<sup>[19]</sup>. PM 处理淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 增加量多于其他处理, 主要原因是 PM 处理土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 增加量高于其他处理, 随淋溶液迁移出土壤的量高于其他处理, 而 CM、CHM 处理土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 含量相对较少, 迁移出土壤的量少. 添加 TCs 以后淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 质量增加, 其主要原因是土壤中 TCs 分解产生  $\text{NH}_4^+$ -N, 在淋溶液的作用下迁移出土壤, 其次是

随淋溶液迁移出土壤的 TCs 发生自然降解 (光解和水解等), 产生  $\text{NH}_4^+$ -N<sup>[18]</sup>. 土壤黏粒团聚体以及有机质的吸附作用、范德华力和离子吸附作用等因素影响下土壤中  $\text{NH}_4^+$ -N 不易随淋溶液迁移出土壤, 导致随淋溶液迁移出土壤的  $\text{NH}_4^+$ -N 质量少<sup>[19]</sup>. PM-T 处理与 PM 处理相比淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 质量增加为 0.27 mg, 高于 CK-T、CM-T 和 CHM-T 处理, 其原因是 PM-T 处理中土壤微生物丰度高于其他添加 TCs 处理, 微生物降解抗生素产生  $\text{NH}_4^+$ -N 多于其他处理,  $\text{NH}_4^+$ -N 随淋溶液迁移出土壤多于其他处理. 土壤中 TCs 降解产生的  $\text{NH}_4^+$ -N 在微生物的作用下发生硝化作用产生  $\text{NO}_3^-$ -N<sup>[20]</sup>. PM-T 处理土壤中残留的 TCs 高于其他处理, 抑制微生物的硝化作用, 致使 PM-T 处理土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 增加量低于其他添加 TCs 处理组<sup>[21]</sup>. 同时 PM-T 处理土壤中微生物丰度高于其他处理, 反硝化作用增强, 致使土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 增加量低于其他处理. 由于淋溶液中含有  $\text{NO}_3^-$ -N 离子, 在淋溶以及微生物的作用下致使土壤中  $\text{NO}_3^-$ -N 在土壤中分布不均匀. TCs 降解产生的  $\text{NH}_4^+$ -N 在微生物的作用下发生硝化作用产生  $\text{NO}_3^-$ -N, 随淋溶液迁移出土壤. 相比于淋溶液中  $\text{NH}_4^+$ -N 质量, 淋溶液中  $\text{NO}_3^-$ -N 质量明显增多, 主要原因是  $\text{NO}_3^-$ -N 离子带负电, 不易被土壤中电荷吸附, 容易随淋溶液迁移出土壤<sup>[22]</sup>.

添加粪肥后土壤有机质含量增加, 增大了对抗生素的吸附力<sup>[9]</sup>. TCs 为两性有机化合物, 当土壤溶液的 pH 低于其解离系数 ( $\text{p}K_a$ ) 值时, TCs 会以阳离子的形式存在, 这些阳离子有机化合物与土壤团聚体表面产生静电作用, 吸附在土壤表面<sup>[10,23]</sup>. 有研究表明 TCs 中的羧基、醛基和氨基等功能团与粪肥中芳香胺和芳香环, 以及基团中的羟基和羧基形成络合物或螯合物被吸附在土壤中, 导致土壤中 TCs 吸附量增加<sup>[24,25]</sup>. 有研究发现, 抗生素在土壤中的吸附能力与土壤有机质含量呈正相关<sup>[26,27]</sup>. 猪粪粪肥中有机质的含量明显高于牛粪、鸡粪等粪肥, 对抗生素的吸附力强于其他粪肥, 致使 PM-T 处理中 TCs 的残留量明显高于其他粪肥处理. 同时猪粪粪肥中含有大量的 Cu 和 Zn 等金属离子, 金属阳离子能在土壤黏土矿物表面、土壤有机质的配位基团和抗生素之间形成多元络合物, 增加土壤对抗生素的吸附量<sup>[12,28-30]</sup>. 陈薇薇等<sup>[31]</sup>的研究发现  $\text{Cu}^{2+}$  能促进黑土对 TOC 的吸附能力. 而 CHM-T 处理与 CK-T 处理相比土壤中抗生素的残留量一致, 这有可能与鸡粪中有机质的含量以及组分有关. 有研究发现土壤中有机质的含量达到一定程度时, 才能显著影响土壤对抗生素的吸附<sup>[32]</sup>. 鸡粪中有机质的含量

低,对土壤中抗生素的吸附能力弱,致使 CHM-T 处理土壤中抗生素的残留量低于 PM-T 和 CM-T 处理.同时鸡粪中可溶性有机质覆盖或者屏蔽矿物以及金属氧化物表面的吸附点位,减少土壤对抗生素的吸附量,增加抗生素的淋溶迁移能力<sup>[33,34]</sup>.粪肥中可溶性有机碳对土壤中抗生素迁移行为的影响与畜禽粪便的来源与成分特征、土壤性质及水分条件等因素相关.

OTC 在土壤中的残留量明显高于 TC 和 CTC,这与以前的研究结果一致<sup>[35]</sup>.刘玉芳<sup>[23]</sup>的研究表明,在相同的淋溶条件下 OTC 相比于 CTC 和 TC 更容易富集在土壤中,淋溶液中 OTC 的含量明显少于 TC 和 CTC. OTC 的  $pK_a$  大于 TC 和 CTC,致使 OTC 所带的正负电荷数明显高于 TC 和 CTC,更容易被土壤中有有机质和土壤团聚体吸附<sup>[36]</sup>.而 CTC 分子中含有氯离子,导致亲水性增强,在实验过程中更容易淋溶出土壤.实验结束时土壤中 CTC 和 TC 残留量一致,其主要原因是 CTC 和 TC 两种抗生素的解离系数一致,同时与土壤中有有机质含量、pH 值和阳离子交换量大小等有关<sup>[14,37]</sup>.抗生素的淋溶速率与土壤中有有机质含量呈现负相关性,主要与土壤中有有机质的吸附性相关<sup>[23]</sup>.郭欣妍等<sup>[7]</sup>的研究表明,磺胺类抗生素在有机质含量高的东北黑土的淋溶速率明显小于其他土壤.赵玲等<sup>[8]</sup>的研究表明,在相同淋溶条件下 TCs 在有机质含量高的黑钙土中迁移深度明显小于有机质含量少的红壤土.猪粪粪肥有机质含量高于其他处理,TCs 在 PM-T 处理中迁移速率小于其他处理,致使 TCs 积累在 16 ~ 24 cm 土壤中.

相比于未添加 TCs 处理组,添加 TCs 处理组土壤中细菌丰度明显减小,表明 TCs 对土壤中的微生物生长繁殖具有抑制作用,这与以前的研究结果一致<sup>[38~41]</sup>.有研究表明四环素类抗生素阻止细菌核糖体 30S 亚基 A 位点与酰氨基-tRNA 位点的结合,影响细菌的翻译转录过程,抑制菌体内蛋白质的合成,从而抑制细菌的生长繁殖<sup>[42]</sup>.与未添加 TCs 处理相比,PM-T 处理土壤中细菌丰度的减少率高于其他添加 TCs 处理,主要原因是 PM-T 处理土壤中 TCs 残留量高于其他添加 TCs 处理,对细菌抑制作用强于其他处理.未添加 TCs 处理组中 20 ~ 24 cm 土层中细菌丰度明显高于 0 ~ 4 cm 土层,主要原因是土壤中营养物质在淋溶液的作用下迁移到下部,促进微生物的生长.而添加 TCs 处理组中 20 ~ 24 cm 土层细菌丰度明显少于 0 ~ 4 cm 土层,其主要原因是 TCs 在淋溶液作用下迁移到土层下部,对土壤微生物产生抑制作用增强,致使下层土壤微生物丰度减

少.PM-T 处理 20 ~ 24 cm 土层 TCs 含量高于其他添加 TCs 处理,对土壤微生物的抑制作用增强,致使 PM-T 处理减少率高于其他添加 TCs 处理. CK-T 和 CHM-T 处理 0 ~ 4 cm 土层土壤细菌丰度高于 CK 和 CHM 处理,主要原因是在淋溶液的作用下 0 ~ 4 cm 土层中的抗生素迁移到下部,土壤中 TCs 对微生物的抑制作用减弱,其次低浓度 TCs 有助于刺激微生物的生长,微生物可以利用 TCs 作为碳源进行繁殖<sup>[43]</sup>. CHM-T 处理土壤中细菌减少率低于 CK-T,可能的原因是 CHM-T 处理中土壤 TCs 残留量少,对土壤微生物的抑制作用弱,其次是鸡粪中微生物可能对 TCs 有较强的抵抗作用.

随着土层深度的增加,土壤中 TN、 $NH_4^+-N$ 、TC、OTC 和 CTC 含量增加.在淋溶液的作用下,土壤中的 TCs 迁移到土壤下层.随着土层深度的增加,土壤中 TCs 残留量增加,致使土壤中 TN 含量增加.土壤中 TCs 在微生物、光解水解等作用下降解产生  $NH_4^+-N$ ,随着土壤中 TCs 残留量的增加土壤中  $NH_4^+-N$  含量增加,在淋溶液的作用下,土壤中的  $NH_4^+-N$  在土柱底层富集.在淋溶液的作用下未添加 TCs 处理组中土壤 TN、 $NH_4^+-N$  迁移到土柱下层,致使土柱下层土壤 TN、 $NH_4^+-N$  含量增加.由于  $NO_3^- -N$  不易被土壤团聚体吸附,容易流失,同时土壤中微生物的反硝化作用,以及淋溶液含有  $NO_3^- -N$  等因素就造成  $NO_3^- -N$  在土壤中分布不均匀.添加 TCs 处理组土壤中细菌丰度明显小于未添加 TCs 处理组,主要是 TCs 对土壤中细菌的抑制作用.添加 TCs 处理组随着土壤深度的增加土壤中细菌丰度减少.在淋溶液的作用下 20 ~ 24 cm 土壤中 TCs 残留量高于表层土壤,对微生物的抑制作用增强,致使 20 ~ 24 cm 土壤中细菌丰度的减少量高于表层土壤.在淋溶液作用下未添加 TCs 处理组中营养物质富集在下层土壤(20 ~ 24 cm),致使下层土壤中细菌丰度高于表层土壤.粪肥中有有机质的含量大小为: PM > CM > CHM,对 TCs 吸附能力不同,造成土壤中 TCs 残留量大小为: PM-T > CM-T > CHM-T > CK-T.随着 TCs 残留量的增加,土壤中 TN 和  $NH_4^+-N$  增加.粪肥中 TN 含量大小为: PM > CM > CHM > CK,致使本实验结束以后 PM 处理土壤中 TN 含量高于其他未添加 TCs 处理.

#### 4 结 论

(1) 相比于鸡粪和牛粪等粪肥,TCs 更容易在施用猪粪粪肥土壤中累积,猪粪粪肥中有有机质含量高于鸡粪和牛粪粪肥,更容易吸附土壤中 TCs,使其不

易迁移出土壤,同时土壤中 TN 和  $\text{NH}_4^+$ -N 的增加量高于鸡粪牛粪等粪肥. 鸡粪、牛粪粪肥中有机质含量少,对土壤中 TCs 吸附能力弱,土壤中 TCs 易于迁移出土壤,容易对地下水产生污染. 在淋溶液的作用下土壤中的 TCs 更容易积累在下层土壤(16 ~ 24 cm).

(2)相对于 TC 和 CTC,OTC 更容易被土壤中粪肥吸附.这是由于 OTC 的  $\text{p}K_a$  大于 TC 和 CTC,致使 OTC 所带的正负电荷数明显高于 TC 和 CTC,因而更容易被土壤中的有机质和土壤团聚体吸附.

(3)相比于鸡粪和牛粪,施用猪粪粪肥的土壤更容易累积 TCs,对土壤中细菌的抑制作用增强,致使土壤中细菌的丰度减少量高于牛粪、鸡粪等粪肥,对土壤原有的微生物群落具有更大的影响.

(4)TN、 $\text{NH}_4^+$ -N、TC、OTC 和 CTC 等指标为第一主成分因子,解释量为 54.55%,其含量与土层的深度呈现正相关性,在 PM-T、CM-T、CHM-T、CK-T、PM、CM、CHM 和 CK 处理中的含量依次降低.

#### 参考文献:

- [ 1 ] Kumar R R, Lee J T, Cho J Y. Fate, occurrence, and toxicity of veterinary antibiotics in environment [J]. *Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry*, 2012, **55** (6): 701-709.
- [ 2 ] Zhu Y G, Johnson T A, Su J Q, *et al.* Diverse and abundant antibiotic resistance genes in Chinese swine farms [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, **110** (9): 3435-3440.
- [ 3 ] 朱永官,陈青林,苏建强,等. 环境中抗生素与抗性基因组的研究[J]. *科学观察*, 2017, **12** (6): 60-62.
- [ 4 ] Yin X W, Qiang Z M, Ben W W, *et al.* Biodegradation of sulfamethazine by activated sludge: lab-scale study [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2014, **140** (7): 04014024.
- [ 5 ] Hu X G, Zhou Q X, Luo Y. Occurrence and source analysis of typical veterinary antibiotics in manure, soil, vegetables and groundwater from organic vegetable bases, northern China [J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158** (9): 2992-2998.
- [ 6 ] 王卫中,迟苏琳,徐卫红. 四环素类抗生素对土壤-生菜系统的生物效应及其迁移降解特性 [J]. *环境科学*, 2021, **42** (3): 1545-1558.
- Wang W Z, Chi S L, Xu W H. Biological effect of tetracycline antibiotics on a soil-lettuce system and its migration degradation characteristics [J]. *Environmental Science*, 2021, **42** (3): 1545-1558.
- [ 7 ] 郭欣妍,王娜,许静,等. 5 种磺胺类抗生素在土壤中的吸附和淋溶特性 [J]. *环境科学学报*, 2013, **33** (11): 3083-3091.
- Guo X Y, Wang N, Xu J, *et al.* Adsorption and leaching behavior of sulfonamides in soils [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, **33** (11): 3083-3091.
- [ 8 ] 赵玲,刘玉芳,尹平河,等. 土霉素在土壤中的垂直迁移及其影响因素研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2012, **31** (8): 1519-1524.
- Zhao L, Liu Y F, Yin P H, *et al.* Simulation of vertical transport and factors affecting transferability of oxytetracycline in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, **31** (8): 1519-1524.
- [ 9 ] 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.
- Zhang M K, Wang L P, Zheng S A. Adsorption and transport characteristics of two exterior-source antibiotics in some agricultural soils [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28** (2): 761-766.
- [ 10 ] Sassman S A, Lee L S. Sorption of three tetracyclines by several soils: assessing the role of pH and cation exchange [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, **39** (19): 7452-7459.
- [ 11 ] Pan M, Chu L M. Leaching behavior of veterinary antibiotics in animal manure-applied soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **579**: 466-473.
- [ 12 ] 罗芳林. 猪粪 DOM 对抗生素在紫色土中吸附迁移作用的影响 [D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
- Luo F L. Effects of dissolved organic matter from pig manure on sorption and migration of antibiotics in purple soil [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [ 13 ] 李舒涵,刘琛,唐翔宇,等. 果园生态养鸡鸡粪 DOM 的淋溶特征及其对抗生素迁移的影响 [J]. *农业工程学报*, 2020, **36** (14): 37-46.
- Li S H, Liu C, Tang X Y, *et al.* Leaching characteristics of dissolved organic matter in chicken manure and its effect on antibiotic migration in orchard [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36** (14): 37-46.
- [ 14 ] Kay P, Blackwell P A, Boxall A B A. Column studies to investigate the fate of veterinary antibiotics in clay soils following slurry application to agricultural land [J]. *Chemosphere*, 2005, **60** (4): 497-507.
- [ 15 ] Bonmati M, Ceccanti B, Nanniperi P. Spatial variability of phosphatase, urease, protease, organic carbon and total nitrogen in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1991, **23** (4): 391-396.
- [ 16 ] Zhou X, Qiao M, Wang F H, *et al.* Use of commercial organic fertilizer increases the abundance of antibiotic resistance genes and antibiotics in soil [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24** (1): 701-710.
- [ 17 ] Seliger H, Göldner E, Kittel I, *et al.* Two-carrier liquid-phase synthesis of main-chain liquid crystalline oligomers and characterization of the products [J]. *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 1995, **351** (2): 260-270.
- [ 18 ] Halling-Sørensen B, Lykkeberg A, Ingerslev F, *et al.* Characterisation of the abiotic degradation pathways of oxytetracyclines in soil interstitial water using LC-MS-MS [J]. *Chemosphere*, 2003, **50** (10): 1331-1342.
- [ 19 ] 和苗苗,田光明,梁新强. 施用有机物料土壤中氮、磷及重金属的短期淋失规律 [J]. *水土保持学报*, 2010, **24** (2): 1-5, 24.
- He M M, Tian G M, Liang X Q. Short-term leaching dynamics of nitrogen, phosphorous, and heavy metals after additions of organic materials into soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24** (2): 1-5, 24.
- [ 20 ] Leininger S, Urlich T, Schloter M, *et al.* Archaea predominate among ammonia-oxidizing prokaryotes in soils [J]. *Nature*, 2006, **442** (7104): 806-809.
- [ 21 ] Kotzerke A, Hammesfahr U, Kleineidam K, *et al.* Influence of difloxacin-contaminated manure on microbial community structure and function in soils [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, **47** (2): 177-186.
- [ 22 ] 沈晨,颜鹏,魏吉鹏,等. 生物质炭对土壤硝态氮淋洗的影

- 响[J]. 农业资源与环境学报, 2018, **35**(4): 292-300.  
Shen C, Yan P, Wei J P, *et al.* Effect of biochar amendment on nitrogen leaching in soils[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2018, **35**(4): 292-300.
- [23] 刘玉芳. 四环素类抗生素在土壤中的迁移转化模拟研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.  
Liu Y F. The study on environmental behavior of tetracycline antibiotics in soils[D]. Guangzhou: Jinan University, 2012.
- [24] Thiele-Bruhn S, Seibicke T, Schulten H R, *et al.* Sorption of sulfonamide pharmaceutical antibiotics on whole soils and particle-size fractions [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, **33**(4): 1331-1342.
- [25] Marschner B, Kalbitz K. Controls of bioavailability and biodegradability of dissolved organic matter in soils [J]. *Geoderma*, 2003, **113**(3): 211-235.
- [26] 段军波. 四环素类抗生素在设施土壤环境下的吸附降解及其植物毒性[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.  
Duan J B. Adsorption and degradation of tetracyclines in soil under the greenhouse factors and its phytotoxicity assessment [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [27] 罗芳林, 刘琛, 唐翔宇, 等. 猪粪溶解性有机物对紫色土中抗生素迁移的影响[J]. 中国环境科学, 2020, **40**(9): 3952-3961.  
Luo F L, Liu C, Tang X Y, *et al.* Effects of pig manure-derived dissolved organic matter on the transport of antibiotics in purple soils[J]. *China Environmental Science*, 2020, **40**(9): 3952-3961.
- [28] 李培培, 王建华, 张宝珣, 等. 山东省猪粪便和粪源重金属排放量估算及环境效应分析[J]. 养猪, 2019, (1): 81-83.
- [29] 提清清, 高增文, 季慧慧, 等. 抗生素在土壤中的吸附行为研究进展[J]. 土壤, 2017, **49**(3): 437-445.  
Ti Q Q, Gao Z W, Ji H H, *et al.* Adsorption of antibiotics in soils: a review[J]. *Soils*, 2017, **49**(3): 437-445.
- [30] Morel M C, Spadini L, Brimo K, *et al.* Speciation study in the sulfamethoxazole-copper-pH-soil system: implications for retention prediction [J]. *Science of the Total Environment*, 2014, **481**: 266-273.
- [31] 陈薇薇, 陈涛, 杨平, 等. 共存  $\text{Cu}^{2+}$  影响下土霉素在黑土上的吸附行为[J]. 江苏农业科学, 2017, **45**(18): 240-244.
- [32] MacKay A A, Canterbury B. Oxytetracycline sorption to organic matter by metal-bridging[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, **34**(6): 1964-1971.
- [33] Cox L, Celis R, Hermosín, M C, *et al.* Effect of organic amendments on herbicide sorption as related to the nature of the dissolved organic matter [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(21): 4600-4605.
- [34] Hou J, Pan B, Niu X K, *et al.* Sulfamethoxazole sorption by sediment fractions in comparison to pyrene and bisphenol A[J]. *Environmental Pollution*, 2010, **158**(9): 2826-2832.
- [35] 张婷. 四环素类抗生素在土壤中的吸附/解吸行为研究[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.  
Zhang T. Adsorption/desorption behavior of tetracycline antibiotics in soils[D]. Fuxin: Liaoning Technology University, 2015.
- [36] Qiang Z M, Adams C. Potentiometric determination of acid dissociation constants ( $\text{p}K_a$ ) for human and veterinary antibiotics [J]. *Water Research*, 2004, **38**(12): 2874-2890.
- [37] 张旭. 典型抗生素在土壤中的淋滤行为研究[D]. 广州: 暨南大学, 2012.  
Zhang X. The research on the leaching behavior of typical antibiotics in the soil[D]. Guangzhou: Jinan University, 2012.
- [38] Li H N, Li B X, Ma J L, *et al.* Fate of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes in the electrokinetic treatment of antibiotic-polluted soil [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, **337**: 584-594.
- [39] Li H N, Li B X, Zhang Z G, *et al.* Evolution of microbial communities during electrokinetic treatment of antibiotic-polluted soil [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **148**: 842-850.
- [40] Li H N, Li B X, Zhang Z G, *et al.* Factors influencing the removal of antibiotic-resistant bacteria and antibiotic resistance genes by the electrokinetic treatment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **160**: 207-215.
- [41] Li B X, Zhang Z G, Ma Y L, *et al.* Electrokinetic remediation of antibiotic-polluted soil with different concentrations of tetracyclines [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2019, **26**(8): 8212-8225.
- [42] Schnappinger D, Hillen W. Tetracyclines: antibiotic action, uptake, and resistance mechanisms [J]. *Archives of Microbiology*, 1996, **165**(6): 359-369.
- [43] Dantas G, Sommer M O A, Oluwasegun R D, *et al.* Bacteria subsisting on antibiotics [J]. *Science*, 2008, **320**(5872): 100-103.

## CONTENTS

Continuous PM <sub>2.5</sub> Composition Measurements for Source Apportionment During Air Pollution Events .....	CAI Fan-tao, SHANG Yue, DAI Wei, <i>et al.</i> (4575)
Orographic Influences on the Spatial Distribution of PM <sub>2.5</sub> on the Fen-Wei Plain .....	HUANG Xiao-gang, ZHAO Jing-bo, SUN Cong-jian, <i>et al.</i> (4582)
Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> Under Winter Haze Conditions in Central China: A Case Study of Huanggang, Hubei Province .....	LI Xing-yu, MAO Yao, CHEN Zhan-le, <i>et al.</i> (4593)
Concentration and Reactivity of Carbonyl Compounds in the Atmosphere of North China .....	HUANG Yu, CHEN Xi, WANG Ying-hong, <i>et al.</i> (4602)
Characteristics of O <sub>3</sub> Pollution and Key Precursors in Chengdu During Spring .....	HAN Li, CHEN Jun-hui, JIANG Tao, <i>et al.</i> (4611)
O <sub>3</sub> Source Characteristics of an Industrial Area in the Yangtze River Delta Based on Boundary Observations .....	HUANG Qing, HUANG Yin-zhi, ZHANG Shan, <i>et al.</i> (4621)
Characteristics and Source of VOCs During O <sub>3</sub> Pollution Between August to September, Langfang Development Zones .....	ZHANG Jing-qiao, WANG Hong-liang, FANG Xiao-yun, <i>et al.</i> (4632)
Coating-derived VOCs Emission Characteristics and Environmental Impacts from the Furniture Industry in Guangdong Province .....	ZENG Chun-ling, SHAO Xia, LIU Rui-yuan, <i>et al.</i> (4641)
Response of Air Quality to COVID-19 Lockdown in Xiamen Bay .....	XU Chao, WU Shui-ping, LIU Yi-jing, <i>et al.</i> (4650)
Similarities and Differences of Valley Winds in the Beijing Plain and Yanqing Areas and Its Impact on Pollution .....	WU Jin, LI Chen, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (4660)
Characteristics of Atmospheric Particulate Matter Pollution and the Unique Wind and Underlying Surface Impact in the Twain-Hu Basin in Winter .....	ZHU Yan, ZHAO Tian-liang, BAI Yong-qing, <i>et al.</i> (4669)
Conversion Characterizations of Sulfate Ion and Nitrate Ion in Particulate Matter from Coal-fired Power Plants .....	YANG Liu, HE Qing, SHENG Zhong-yi (4678)
Water Chemical Characteristics and Influence of Exogenous Acids in the Yangtze River Basin .....	WANG Qi, YU Shi, JIANG Ping-ping, <i>et al.</i> (4687)
Effects of Land Use on Nutrient Concentrations in the Inflow River of Lake Taihu, China .....	LIAN Xin-qiao, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4698)
Diversity of Zooplankton and Niche Characteristics of Keystone Species in the Weihe River Based on eDNA .....	LIANG Dong, XIA Jun, SONG Jin-xi, <i>et al.</i> (4708)
Occurrence, Distribution, and Ecological Risk Assessment of Pharmaceutical and Personal Care Products in the Aquatic Environment of Sanya City, China .....	REN Bing-nan, GENG Jing (4717)
Screening of Priority Pollutants and Risk Assessment for Surface Water from Shengjin Lake .....	GONG Xiong-hu, DING Qi-qi, JIN Miao, <i>et al.</i> (4727)
Long-term Changes and Drivers of Ecological Security in Shahe Reservoir, China .....	YANG Wen-bin, DUAN Wen-xiu, CUI Yang, <i>et al.</i> (4739)
Seasonal Variation and Influencing Factor Analysis of Antibiotic Resistance Genes in Water Supply Reservoirs of Central China .....	ZHANG Kai, XIN Rui, LI Kuang-jia, <i>et al.</i> (4753)
Geochemical Characteristics and Driving Factors of NO <sub>3</sub> -Type Groundwater in the Rapidly Urbanizing Pearl River Delta .....	LÜ Xiao-li, LIU Jing-tao, HAN Zhan-tao, <i>et al.</i> (4761)
Spatial Hydrochemical Characteristics and Controlling Factors of Surface Water in the Yancheng Area .....	WANG Jian, ZHANG Hua-bing, XU Jun-li, <i>et al.</i> (4772)
Identification of Dredging Depths Based on Sediment Vertical Distribution Profiles of Total Nitrogen and Total Phosphorus and Their Adsorption-desorption Equilibria .....	ZHOU Ya-ting, CHEN Xing-hong, LI Li-qing, <i>et al.</i> (4781)
Role of Borate and Phosphate Buffers in the Degradation of Organic Compounds in a PMS/Co <sup>2+</sup> System; Influencing Factors and Mechanisms .....	WAN Qi-qi, CHEN Zhu-hao, CAO Rui-hua, <i>et al.</i> (4789)
Degradation 2,2',4,4'-Tetrabromodiphenyl Ether by Activated Peroxymonosulfate Using Magnetic Biochar Supported $\alpha$ -MnO <sub>2</sub> .....	LI Xin, YIN Hua, LUO Hao-yu, <i>et al.</i> (4798)
Characteristics and Mechanisms of Bacteriophage MS2 Inactivation in Water by UV Activated Sodium Persulfate .....	ZHANG Chong-miao, YANG Hao-ming, WANG Zhen (4807)
Adsorption Characteristics of Phosphate on Cerium Modified Water Hyacinth Biochar .....	WANG Guang-ze, ZENG Wei, LI Shuai-shuai (4815)
Removal Efficiency and Mechanism of Ammonia Nitrogen in a Low Temperature Groundwater Purification Process .....	LI Dong, LIU Meng-hao, ZHANG Rui-miao, <i>et al.</i> (4826)
Speciation and Ecological Risk Assessment of Heavy Metal(loid)s in the Municipal Sewage Sludge of China .....	GENG Yuan-meng, ZHANG Chuan-bing, ZHANG Yong, <i>et al.</i> (4834)
Meta-analysis of Microbial Communities in the Activated Sludge of Wastewater Treatment Plants Under Different Climate Types .....	YANG Si-hang, QIN Ze-sheng, LIANG Man-chun (4844)
Partial Nitrification and Anaerobic Ammonia Oxidation Synergistic Denitrification to Remove Nitrogen and Carbon from Domestic Sewage .....	QIN Yan-rong, YUAN Zhong-ling, ZHANG Ming, <i>et al.</i> (4853)
Cultivation and Performance Analysis of Simultaneous Partial Nitrification, ANAMMOX, and Denitrification Granular Sludge .....	ZHOU Feng, LIU Yong-di, LI Wei (4864)
Application of Various Methods to Extract Microplastic from Typical Soils in China .....	ZHAO Xiao-li, LIU Zi-han, CONG Chen-yu, <i>et al.</i> (4872)
Evaluation and Sources of Heavy Metal Pollution in the Surface Soil of the Qaidam Basin .....	CHEN Liang, ZHANG Xi-ying, TANG Qi-liang, <i>et al.</i> (4880)
Content and Ecological Risks of Heavy Metals in Soil with Different Land Uses in a Rapidly Urbanizing Area .....	LI Meng-ting, SHEN Cheng, WU Jian, <i>et al.</i> (4889)
Selenium Geochemical Characteristics and Influencing Factors of Paddy Fields in Du'an County, Guangxi .....	LIU Fei, YANG Ke, XU Ren-ting, <i>et al.</i> (4897)
Carbonized Apple Branches Decrease the Accumulation and Damage of Cadmium on Apple Rootstock by Reducing DTPA-Cd in Soil .....	DENG Bo, XUN Mi, ZHANG Wei-wei, <i>et al.</i> (4908)
Accumulation and Health Risk of Heavy Metals in Cereals, Vegetables, and Fruits of Intensive Plantations in Hainan Province .....	YANG Jian-zhou, WANG Zhen-liang, GAO Jian-weng, <i>et al.</i> (4916)
Correlation Analysis among Environmental Antibiotic Resistance Genes Abundance, Antibiotics Concentrations, and Heavy Metals Concentrations Based on Web of Science Searches .....	MIAO Sun, CHEN Lei, ZUO Jian-e (4925)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics in Farmland Soil in Yinchuan .....	ZHANG Xiao-hong, TAO Hong, WANG Ya-juan, <i>et al.</i> (4933)
Effect of Manure from Different Sources on the Leaching of Antibiotics in Soil .....	LI Bin-xu, ZHU Chang-xiong, SONG Ting-ting, <i>et al.</i> (4942)
Analysis of the Traits of Nitrogen Metabolism Pathways for Several Forest Soils in Eastern China .....	LÜ Xue-li, ZHAO Yong-peng, LIN Qing-huo, <i>et al.</i> (4951)
Denitrification Rates and <i>nirS</i> -type Denitrifying Bacteria Community Structure Characteristics of Bulk and Rhizosphere Soil in Spring and Summer in the Alpine Wetlands of the Qinghai-Tibet Plateau .....	LI Yu-qian, MA Jun-wei, GAO Chao, <i>et al.</i> (4959)
Microbial Community Structure of Soil Methanogens and Methanotrophs During Degradation and Restoration of Reed Wetlands in the Songnen Plain .....	WANG Qiu-ying, WANG Na, LIU Ying, <i>et al.</i> (4968)
Characteristics of Bacterial Community Structure in Fluvio-aquic Soil Under Different Rotation Fallow .....	NAN Zhen-wu, LIU Zhu, DAI Hong-cui, <i>et al.</i> (4977)
Response of Photosynthetic Bacterial Community to Cadmium Contamination in Paddy Soil .....	LUO Lu-yun, JIN De-cai, WANG Dian-dong, <i>et al.</i> (4988)
Community Distribution of the Rhizospheric and Endophytic Bacteria of <i>Phragmites australis</i> and Their Limiting Factors in Iron Tailings .....	CAO Man-man, WANG Fei, ZHOU Bei-hai, <i>et al.</i> (4998)
Effects of Combination of Organic and Inorganic Nitrogen on Nitrification and Denitrification in Two Salinized Soils .....	ZHOU Hui, SHI Hai-bin, ZHANG Wen-cong, <i>et al.</i> (5010)
Response of Yield, CH <sub>4</sub> , and N <sub>2</sub> O Emissions from Paddy Fields to Long-term Elevated CO <sub>2</sub> Concentrations .....	YU Hai-yang, SONG Kai-fu, HUANG Qiong, <i>et al.</i> (5021)
Effects of Feedstock Material and Pyrolysis Temperature on Dissolved Organic Matter in Biochars .....	YAN Dai-hong, MA Ya-pei, SONG Kai-yue, <i>et al.</i> (5030)
Spatiotemporal Variations in Atmospheric Urban Heat Island Effects and Their Driving Factors in 84 Major Chinese Cities .....	LI Yu, ZHOU De-cheng, YAN Zhang-mei (5037)
Research Progress in the Odorants and Their Emissions from Indoor Building Decoration Materials .....	ZHANG Wan-zhong, ZHANG Peng-yi (5046)